



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TITULACIÓN**

***INGENIERÍA INDUSTRIAL***

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DETECCIÓN DE FALLOS EN  
RODAMIENTOS MEDIANTE  
ANÁLISIS DE ENERGÍA  
Y LÓGICA DIFUSA**

**Autor**

**Iván Martínez Aldana**

**Tutores:**

**Cristina Castejón Sisamón.**  
**Alberto Jr. Ordoñez Rangel**



**INDICE**

<b>1.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1.-ANTECEDENTES.....	5
1.2.-OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
1.3.-ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	7
<b>2.- FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE SEÑALES Y DE LÓGICA DIFUSA.....</b>	<b>9</b>
2.1.-INTRODUCCIÓN.....	11
2.2.-ANÁLISIS DE SEÑALES USANDO TRANSFORMADA WAVELET.....	11
2.2.1.-FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	11
2.2.2.-SHORT TIME FOURIER TRANSFORM.....	14
2.2.3.-ANÁLISIS DE SEÑALES USANDO LA TRANSFORMADA WAVELET.....	16
2.2.4.-TIPOS DE TRANSFORMADA WAVELET.....	19
2.2.5.-ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (MRA) Y WAVELET PACKET.....	20
2.3.-CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LÓGICA DIFUSA.....	25
2.3.1.-CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES CARACTERÍSTICAS.....	25
2.3.2.-REGLAS DIFUSAS.....	27
2.3.3.-DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA BASADO EN TÉCNICAS DE LÓGICA DIFUSA.....	28
2.3.4.-MECANISMOS DE INFERENCIA.....	28
2.3.5.-METODOS DE DESDIFUSIÓN.....	32
<b>3.-SISTEMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
3.1.-INTRODUCCIÓN.....	35
3.2.-EQUIPO DE ENSAYO.....	35
3.3.-ADQUISICIÓN DE DATOS.....	36
<b>4.-PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES.....</b>	<b>41</b>
4.1.-INTRODUCCIÓN.....	43
4.2.-PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.....	43
4.3.-ANÁLISIS MEDIANTE WAVELET PACKET.....	44
4.4.-ANÁLISIS DE BANDAS DE ENERGÍA.....	46
4.4.1.-DESCOMPOSICIONES DE PROFUNDIDAD 2.....	46
4.4.2.-DESCOMPOSICIONES DE PROFUNDIDAD 3.....	53
4.4.3.-DESCOMPOSICIÓN DE PROFUNDIDAD 4.....	58
4.4.4.-ANÁLISIS COMPARATIVO WAVELETS MADRE.....	60
4.5.-CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS.....	65
<b>5.-CLASIFICACIÓN CON LÓGICA DIFUSA.....</b>	<b>69</b>
5.1.-INTRODUCCIÓN.....	71
5.2.-EL EDITOR DE SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA (FIS EDITOR).....	71
5.3.-EDITOR DE FUNCIONES CARACTERÍSTICAS (MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR).....	72
5.3.1.-CREACIÓN DE FUNCIONES CARACTERÍSTICAS PARA LAS VARIABLES DE ENTRADA.....	74



5.3.2.-FUNCIONES DE LAS VARIABLES DE SALIDA. AGREGACIÓN Y DESDIFUSIÓN.....	76
5.4.-EDITOR DE REGLAS DIFUSAS (RULE EDITOR).....	78
5.4.1.-REGLAS DIFUSAS BÁSICAS.....	79
5.4.2.-REGLAS DIFUSAS PARTICULARES.....	80
5.5.-RESULTADOS.....	81
<b>6.- CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....</b>	<b>85</b>
6.1.-CONCLUSIONES.....	87
6.2.-FUTUROS DESARROLLOS.....	88
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>
ANEXO I: GUIA DE SEGURIDAD DE LA MÁQUINA.....	95
ANEXO II: CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO Y DEL ACELERÓMETRO.....	97
ANEXO III: PASOS A REALIZAR PARA EL MONTAJE DE TODO EL EQUIPO..	99
ANEXO IV: DESMONTAJE DE LA MÁQUINA PARA LA INSTALACIÓN DE UN RODAMIENTO.....	105
ANEXO V: FUNCIONES CARACTERÍSTICAS DE TODAS LAS VARIABLES DE ENTRADA DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA.....	109
ANEXO VI: REGLAS DIFUSAS UTILIZADAS.....	113
ANEXO VII: TABLAS DE RESULTADOS.....	115



# Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN





## 1.1 ANTECEDENTES.

Actualmente, el proceso de automatización ha llevado al empleo de un gran número de máquinas en una amplia variedad de sectores industriales como por ejemplo el sector de la automoción o el de la construcción. Este elevado uso de la maquinaria viene dado por la necesidad de reducir los tiempos y costes de fabricación de producto, sin olvidar la calidad de los mismos. No piense el lector que esto se trata de un fenómeno actual ya que la automatización del trabajo viene desde el principio de la era industrial.

Una característica importante deseable en una máquina es la fiabilidad, es decir que se produzcan pocas averías y, en caso de producirse, que sean de rápida y fácil solución. La mayoría de las veces estas averías surgen por causas externas como, por ejemplo, un mal montaje o un mal uso de la máquina por parte de los operarios que la manipulan o bien, averías por causas internas como por ejemplo el desgaste de componentes, la fatiga de los materiales o incluso un diseño erróneo. Si se produce una avería, por el motivo que sea, su reparación supondrá tener que detener la máquina, lo que llevará asociada la detención del proceso de fabricación que correspondiera a esa máquina y, en el caso de que no se tuviera sustitución de esa máquina en concreto, la parada total de la producción. Esto llevaría por tanto a una pérdida de tiempo y dinero al tener que paralizar la producción y gastar recursos en reparar los componentes deteriorados.

El proceso de solucionar una avería o incluso el estudio de cómo evitar que aparezca es lo que llamamos mantenimiento. En empresas grandes es frecuente que existan departamentos dedicados exclusivamente al mantenimiento de las máquinas para prevenir sus averías y evitar, a su vez, el paro de su producción. Este proceso de mantenimiento ha evolucionado desde el principio de la era industrial hasta nuestros días.

Al principio el mantenimiento era de tipo correctivo. Este tipo de mantenimiento consistía en reemplazar los componentes de las máquinas una vez que estos se averiaban. Esto significaba que la máquina se averiara en mitad del proceso productivo con la consiguiente parada del proceso y aumento de costes derivados de esta parada y del tiempo y dinero empleados para sustituir los componentes dañados.

Más tarde se buscó una reducción de los tiempos de mantenimiento y ahorro de costes lo que llevó al desarrollo del mantenimiento preventivo. Este mantenimiento consistía en tener un conocimiento mediante ensayos, estudios estadísticos o información del fabricante sobre duración del componente. Conociendo este tiempo de funcionamiento del componente, éste se cambiaba antes de que se cumpliera la vida útil y pudiera averiarse. Con ello se mejoró el tiempo de fabricación, ya que se podía programar en qué momento de la producción había que parar para cambiar determinado componente y saber el tiempo exacto que llevaba reemplazarlo y programar incluso los tiempos de mantenimiento para realizar la menor cantidad de paradas posibles de la producción. Sin embargo, un inconveniente de este tipo de mantenimiento es que la vida útil era calculada mediante estudios estadísticos por lo que un componente reemplazado podía seguir en buen estado y tener aún muchas horas de funcionamiento.



Actualmente el tipo de mantenimiento que se está intentando implantar es el mantenimiento predictivo. Este tipo de mantenimiento consiste en encontrar una función de estado real de los componentes de la máquina. Para este fin es necesaria una correcta diagnosis de la máquina y de todos sus componentes. De este modo la correcta diagnosis cobra tanta importancia a la hora de ahorrar tiempo y dinero en el mantenimiento como el correcto montaje y puesta en funcionamiento [14, 3, 4, 5].

Una gran parte de esos estudios mencionados se centra en la medida de las vibraciones en la máquina. Una máquina, en el caso ideal, no produciría vibraciones ya que toda la energía sería empleada en el trabajo a realizar. Las vibraciones se producen como consecuencia de la transmisión normal de fuerzas cíclicas por los mecanismos. Los elementos de la máquina reaccionan entre sí y se disipa energía en forma de vibraciones por toda la máquina [8].

En el presente documento se desarrollará un método de análisis y diagnosis de elementos mecánicos, todo ello dentro del concepto de mantenimiento predictivo. Concretamente en la diagnosis de fallos mecánicos en rodamientos de bola mediante el análisis de las vibraciones en dichos elementos.

Los rodamientos de bola forman parte del subsistema de apoyo de máquinas rotativas, soportando una gran porción de carga estática y dinámica del sistema, por lo que la posibilidad de un defecto incipiente en su estructura, es inherente a las tensiones involucradas en la conversión de energía del sistema.

Las vibraciones se pueden describir como una señal en el dominio del tiempo, es decir una señal que tenga como variables el tiempo y la amplitud. Dicha señal se puede representar como una función tiempo-amplitud. La representación de esta función o de la señal no siempre puede dar una información clara y útil para la diagnosis de fallo. Para obtener una información útil, que ayude a la identificación de fallos y defectos, es preferible observar la señal en el dominio de la frecuencia. Es decir, mediante un espectro que muestre las frecuencias existentes en la señal. El método universalmente conocido para observar las frecuencias propias de una señal es la Transformada de Fourier. Esta herramienta da buenos resultados en señales estacionarias pero no en señales no estacionarias como son las emitidas por un rodamiento con defecto. Por lo tanto se hace necesario el análisis de las señales de vibración utilizando otra herramienta más apropiada que será en el caso de este proyecto la Transformada Wavelet [14].

Aparte del correcto análisis de las señales con las herramientas apropiadas, se hace necesario también disponer de una herramienta que sea capaz de clasificar fácil y rápidamente qué tipo de señal está emitiendo el rodamiento a tratar en cuestión.

Estos dos últimos aspectos de análisis de señal y clasificación de la información son las dos grandes fases a implementar en los procesos modernos de diagnosis. Con el avance de la ciencia y la tecnología, y gracias a la colaboración de distintas disciplinas, han surgido nuevas herramientas para mejorar las técnicas de diagnosis de defectos.



## 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El objetivo principal del presente proyecto es desarrollar un método de diagnóstico de defectos en rodamiento. Se desarrollarán los dos aspectos comentados, tanto el análisis de la señal como la clasificación de la información de estos análisis.

En primer lugar para el análisis de las señales se utilizarán las herramientas derivadas del análisis Wavelet, más concretamente se utilizarán las llamadas Wavelet Packet o paquetes Wavelet y la energía de dichos paquetes. Es objetivo secundario de este proyecto diferenciar qué herramientas son más idóneas para la descomposición. En el capítulo siguiente se hará una exposición de lo que son las Wavelet madre, pero por el momento, para que el lector comprenda el segundo objetivo, las Wavelet madre son una parte del funcionamiento de la descomposición Wavelet y en el tratamiento de señales de rodamientos de este proyecto se utilizarán dos Wavelets madre distintas que será objeto de estudio averiguar si una es mejor que la otra. El significado concreto de cada aspecto del análisis Wavelet se llevará a cabo en el siguiente capítulo. A partir de este análisis se desarrollará un método para poder clasificar los rodamientos según el tipo de fallo que presenten.

En segundo lugar, una vez que se tenga el mencionado sistema de clasificación del estado de los rodamientos, se desarrollará un programa que sea capaz de, introduciendo una señal vibratoria de un rodamiento, identificar el fallo que presenta dicho elemento basándose en el modelo de clasificación obtenido realizado con Wavelet Packet. El funcionamiento de dicho programa utilizará la lógica difusa o borrosa, herramienta fácil y de sencilla programación que está adquiriendo cada vez más peso en ingeniería utilizándose para control de procesos. En capítulos siguientes se abordará las características de esta lógica que la hacen más idónea que la lógica tradicional.

Ambas herramientas mencionadas, tanto las Wavelet Packet y su energía como la programación en lógica difusa, serán tratadas a través del programa de cálculo Matlab<sup>®</sup> que presenta algoritmos ya preprogramados de estas herramientas.

## 1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.

La memoria de este documento se divide en seis capítulos más los anexos:

**Capítulo 1:** La presente introducción.

**Capítulo 2:** En este capítulo se expondrá toda la base teórica del proyecto. En primer lugar se llevará a cabo el desarrollo de la transformada Wavelet centrándose en los paquetes Wavelets y en cómo calcular la energía de cada uno de estos paquetes. Cerrando el capítulo se realizará una exposición sobre la lógica difusa que es la herramienta empleada para clasificación de las señales.

**Capítulo 3:** En este capítulo se llevará a cabo la descripción de la parte experimental de esta memoria, es decir se expondrá el método seguido para obtener las señales a tratar, el material utilizado y se detallarán las velocidades de giro elegidas así



como otros parámetros como la frecuencia de muestreo y la longitud o número de datos de cada señal.

**Capítulo 4:** Después de describir la forma de recoger las señales, en este capítulo se hará un análisis de las mismas, la decisión de qué Wavelet madre es más idónea y, por último, el patrón que se ha elegido para la diferenciación de las señales procedentes de cada rodamiento.

**Capítulo 5:** Una vez que se han identificado los patrones característicos de cada tipo de rodamiento, se llevará a cabo el desarrollo de la herramienta clasificadora basada en lógica difusa. Se mostrará el porcentaje de éxito y la viabilidad de este método como sistema predictivo.

**Capítulo 6:** Para terminar el proyecto, se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado, a partir de los resultados presentados en los capítulos 4 y 5, sobre el tratamiento de la señal y la clasificación de la misma.

En las últimas páginas del documento, se adjuntan unos anexos entre los que figuran las normas de seguridad de la máquina de ensayo y el montaje de los rodamientos. Aparte de estos anexos también se incluye la bibliografía empleada para este documento.



## **Capitulo 2**

# **FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE SEÑALES Y DE LÓGICA DIFUSA**





## 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan los conceptos fundamentales para comprender la teoría Wavelet y la teoría de lógica difusa y de este modo el lector tendrá conocimiento de toda la base teórica sobre la que se apoya este trabajo.

En primer lugar se desarrollarán los fundamentos del análisis en frecuencia utilizando las Transformadas de Fourier y Wavelet y se mostrarán las ventajas de la Wavelet en régimen transitorio sobre la transformada de Fourier. Se continuará con un desarrollo de los diferentes tipos de transformada y seguidamente se expondrá el análisis multirresolución que consiste, explicado a grandes rasgos, en el método de análisis de señales basado en el uso de la Transformada Wavelet y la variante de este método utilizado en el presente proyecto

En segundo lugar se muestra una breve introducción sobre el concepto de lógica difusa, herramienta utilizada para la clasificación de las señales. Se mostrarán las ideas generales centrándose en el modelo a aplicar en el presente documento.

## 2.2 ANÁLISIS DE SEÑALES USANDO TRANSFORMADA WAVELET

### 2.2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Como ya se comentó en la introducción del proyecto, muchos de los sistemas físicos pueden definirse mediante una señal en el dominio del tiempo. Si se representa esta señal se obtiene una función que tendría por variables el tiempo y la amplitud. Sin embargo esta función representada con estas dos variables no da información apropiada a no ser que sea tratada correctamente. Si en lugar de utilizar como variable el tiempo, se utilizara la frecuencia, la representación de la nueva función que se obtendría sería más útil a la hora de extraer información de ella [13,14]. Para ilustrar estas afirmaciones se propone un ejemplo de una señal con forma senoidal de frecuencia 10 Hz. En la Figura 2.1 se muestra la representación de la señal en las variables tiempo-amplitud y como puede verse no se ve claramente la frecuencia de la señal. Si aplicamos la Transformada de Fourier para cambiar la variable tiempo por la frecuencia, el aspecto de la gráfica cambia revelando bastante más información de la frecuencia, como se observa en la Figura 2.2.

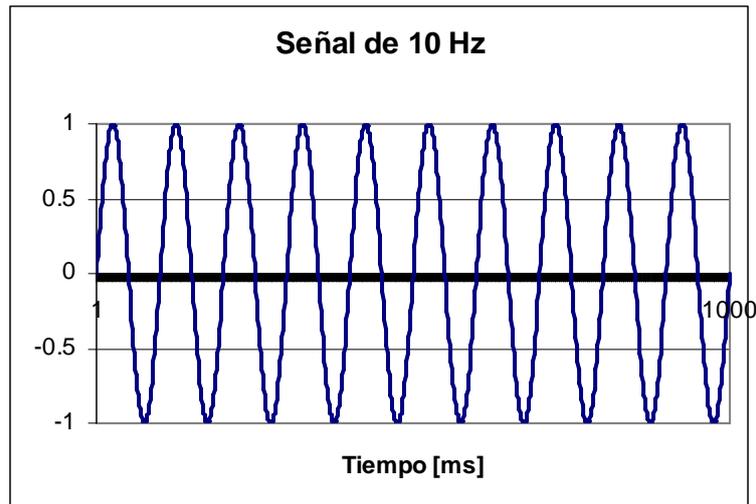


Figura 2.1 Señal senoidal de frecuencia 10 Hz

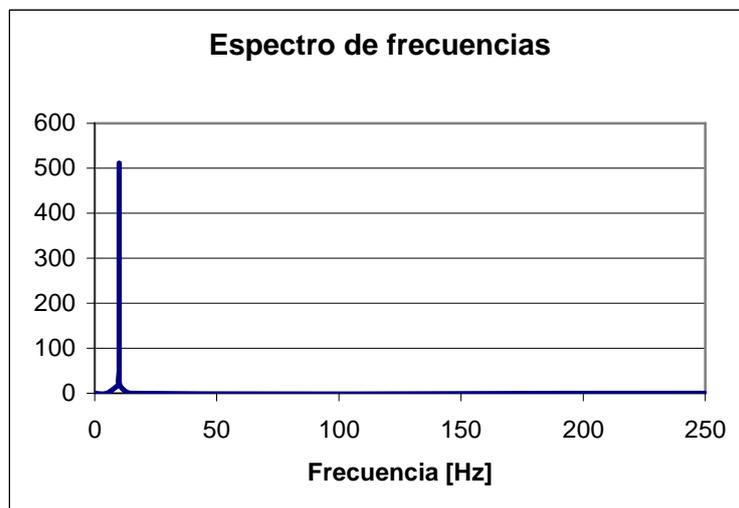


Figura 2.2 Espectro de frecuencias de la señal de 10 Hz.

La transformada de Fourier es muy útil para este tipo de señales estacionarias. Sin embargo el caso que se va a tratar en el presente proyecto es una señal no estacionaria donde, aparte de la frecuencia característica, también es importante saber en qué instante de tiempo aparece. Esta información, que es muy importante en señales no estacionarias no la proporciona este tipo de transformada. Como ejemplo se muestra en la Figura 2.3 una señal no estacionaria y en la Figura 2.4 su espectro de frecuencias hallado mediante la Transformada de Fourier.

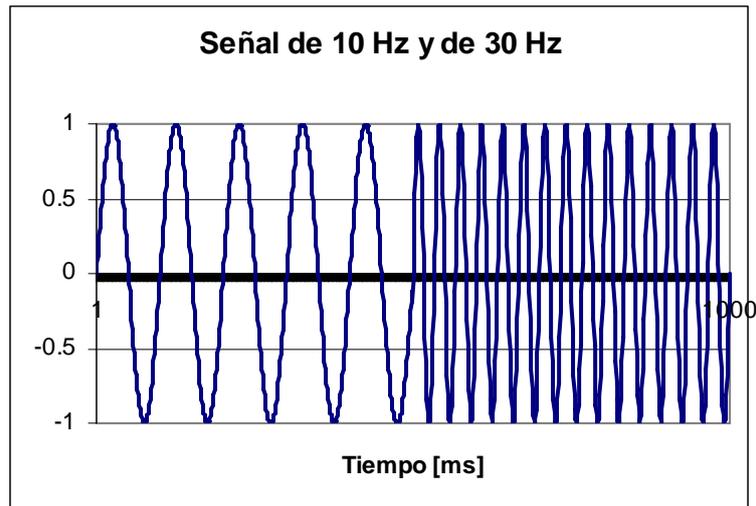


Figura 2.3 Señal compuesta de una señal de frecuencia de 10 Hz y otra de frecuencia 30 Hz

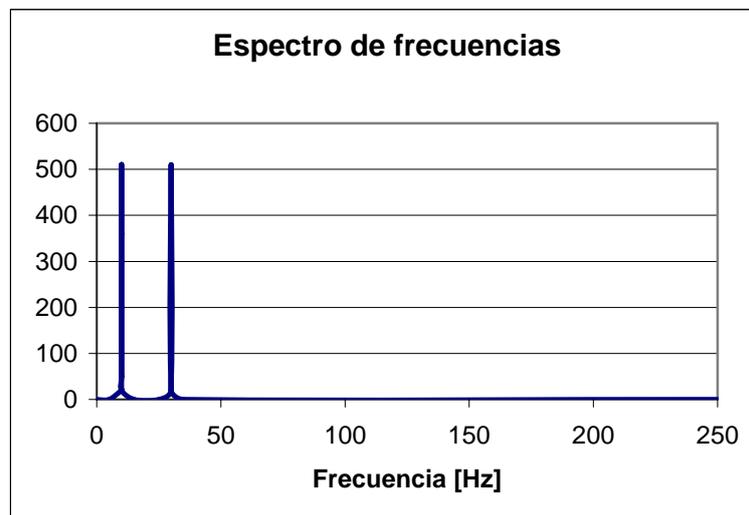


Figura 2.4 Espectro de frecuencias de la señal compuesta de la Figura 2.3.

En este caso la transformada de Fourier es capaz de averiguar las frecuencias características, pero no es capaz de predecir en que momento se produce cada una.

Antes de continuar con la Short Time Fourier Transform (STFT) que intenta solucionar el problema del transitorio, es necesario recordar cómo es la Transformada de Fourier (TF) simple. Esta transformada expresa una función periódica como suma de señales exponenciales complejas periódicas como se muestran en la Ecuación 2.1. En la Ecuación 2.2 se muestra la transformada inversa.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi f t} \cdot dt$$

Ecuación 2.1



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

Ecuación 2.2

Donde:

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

Como se aprecia en la Ecuación 2.1, la señal  $x(t)$  es multiplicada por un término sinusoidal de frecuencia  $f$ . Si la señal tiene una alta componente en frecuencia “ $f$ ” entonces el producto de la señal y del término senoidal es relativamente grande, esto indica que la señal  $x(t)$  tiene una fuerte componente en frecuencia “ $f$ ”. Sin embargo, si la señal no tiene componente en esa frecuencia  $f$  el producto tiende a cero. Aparte de este detalle también es importante señalar que el intervalo de integración va desde  $-\infty$  a  $+\infty$ , esto significa que la información proporcionada por la integral corresponde a todos los intervalos de tiempo y que no importa en qué instante de tiempo aparece la componente en frecuencia  $f$  porque no afectará al resultado de la integración. La TF sólo es capaz de dar información de la existencia o no de ciertas componentes en frecuencia [13].

## 2.2.2 SHORT TIME FOURIER TRANSFORM

Al no ser apropiada la transformada de Fourier para el análisis de señales no estacionarias, se desarrolló una nueva transformada llamada Short Time Fourier Transform (STFT) que, basándose en la transformada de Fourier, solucionaba el análisis en transitorio.

El método consiste básicamente en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria. Para este propósito la señal es multiplicada por una función ventana, cuya anchura debe ser igual a la parte de la señal que puede ser considerada como estacionaria. Esta función ventana inicialmente está localizada al inicio de la señal, es decir en el instante  $t=0$ . Si se asume que la anchura de la ventana es  $T$  segundos, entonces esta función se solapará con la señal para los primeros  $T/2$  segundos. La función ventana y la señal son entonces multiplicadas, de esta forma, solamente los primeros  $T/2$  segundos que están siendo escogidos de la señal. Una vez hecho esto, la nueva señal es el producto de la función ventana y la señal original a la que se le aplica la transformada de Fourier.

El resultado de esta transformación es la transformada de Fourier de los primeros  $T/2$  segundos de la señal original, si esta parte de la señal es estacionaria quiere decir que los resultados obtenidos mostrarán la representación en frecuencia exacta de los primeros  $T/2$  segundos. El próximo paso será desplazar esta ventana a una nueva localización hasta que toda la señal sea recorrida.

La expresión de la STFT se muestra en la Ecuación 2.3

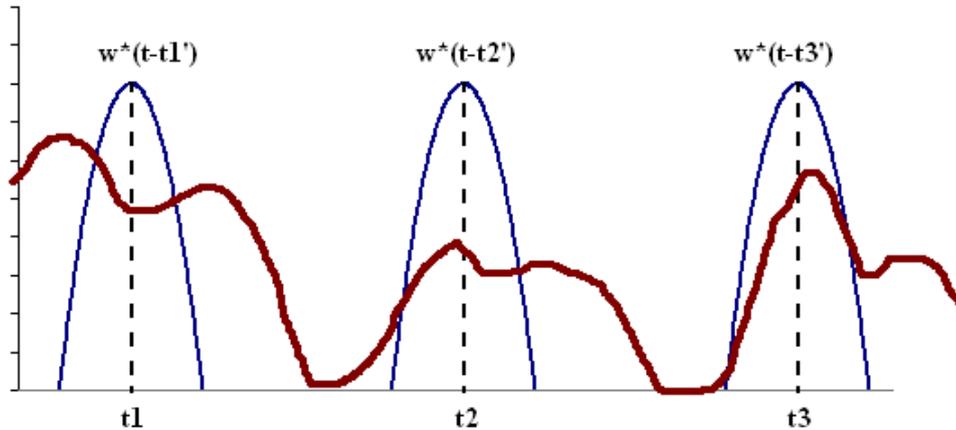
$$STFT_X^W(t', f) = \int_t [x(t) \cdot w^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi f t} \cdot dt$$

Ecuación 2.3

Donde:

$x(t)$ : señal original

$w^*$ : función ventana conjugada.



**Figura 2.5 Explicación gráfica de la STFT**

En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo orientativo del funcionamiento de la STFT. En cada instante  $t'$  y frecuencia  $f$  se calcula un nuevo coeficiente de la Transformada de Fourier.

Con lo anterior parecería que el problema de la representación tiempo – frecuencia de una señal estaría resuelto; sin embargo, existe un problema que tiene su base en el principio de incertidumbre de Heisenberg [14]; que en este caso se traduce en que no es posible la representación exacta tiempo-frecuencia de una señal, sino tan solo los intervalos de tiempo en los cuales existen determinadas bandas de frecuencia, por lo tanto, aparece un problema de resolución.

El problema consiste en que la ventana es de longitud finita, es decir que sólo se aplica a una parte de la señal, causando una disminución de la resolución en frecuencia, con lo cual sólo es posible conocer una banda de frecuencias y no un valor exacto de las frecuencias.

En conclusión, existe un compromiso entre una buena resolución en el tiempo o buena resolución en frecuencia. Para obtener una señal estacionaria, se elige una ventana lo suficientemente estrecha que permita ser considerada así. Cuanto mas estrecha sea la ventana mejor resolución en el tiempo se obtendrá y por lo tanto una mejor representación de la estacionalidad y peor resolución de la frecuencia.

En resumen:

- Ventana estrecha: Buena resolución en el tiempo y pobre en el dominio de la frecuencia.
- Ventana ancha: buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre en el dominio del tiempo.

El problema, por lo tanto, radica en una elección adecuada de la función ventana, que es única para todo el análisis. La elección no será una tarea fácil y dependerá de la señal a analizar y de la aplicación. Si las componentes en frecuencia de la señal están bien separadas entre si, entonces, se podría sacrificar algo de resolución en frecuencia y preferir una buena resolución temporal, ya que las componentes espectrales están bien separadas. Pero si la señal no presenta estas características la elección de una buena ventana se complica [1].

Por lo tanto, se debe encontrar una transformada que, dando información tiempo-frecuencia de la señal solucione el problema implícito en la STFT. La transformada Wavelet (WT: *Wavelet Transform*) resuelve este problema, como se detalla en el siguiente apartado.

### 2.2.3 ANÁLISIS DE SEÑALES USANDO LA TRANSFORMADA WAVELET

La transformada Wavelet continua (CWT: *Continuous Wavelet Transform*) fue desarrollada como una técnica alternativa a la STFT como una manera de superar el problema de resolución. El análisis Wavelet se efectúa de manera similar al análisis STFT, en el sentido de que la señal es multiplicada por una función (función Wavelet) de manera similar a la función ventana en la STFT, y la transformada se calcula separadamente para distintos segmentos de la señal en el dominio del tiempo. Sin embargo, la diferencia principal entre la STFT y la CWT consiste en que el ancho de la ventana varía a medida que se evalúa la transformada para cada componente del espectro, esto es probablemente la característica más significativa de la Transformada Wavelet.

La transformada Wavelet continua se define con la Ecuación 2.4:

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{\tau, s}^*(t) dt \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

$$\psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Como se observa en la Ecuación 2.4, la señal transformada es una función de dos variables,  $\tau$  y  $s$ , los parámetros de translación y escala respectivamente.

$\Psi_{\tau, s}(t)$  es la función de transformación que se le denomina Wavelet madre, este nombre deriva de dos importantes propiedades del análisis Wavelet:

- a) El término Wavelet significa “onda pequeña”. La pequeñez se refiere al hecho que esta función ventana es de longitud finita y el término onda se refiere a la condición de que esa señal es de naturaleza oscilatoria.
- b) El término madre da a entender que las funciones con diferentes regiones de actuación que se usan en el proceso de la transformación provienen de una función principal o Wavelet madre. Es decir, la Wavelet madre es un prototipo para generar las otras funciones ventana.

En la Tabla 2.1 se muestran las transformaciones básicas utilizadas en el análisis Wavelet y en la Figura 2.6 se presentan algunas Wavelet madres clásicas.

Traslación	Cambio de escala	Traslación y cambio de escala
$\psi(t-b)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t}{a}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$

Tabla 2.1 Transformaciones básicas aplicadas al cálculo de la WT.

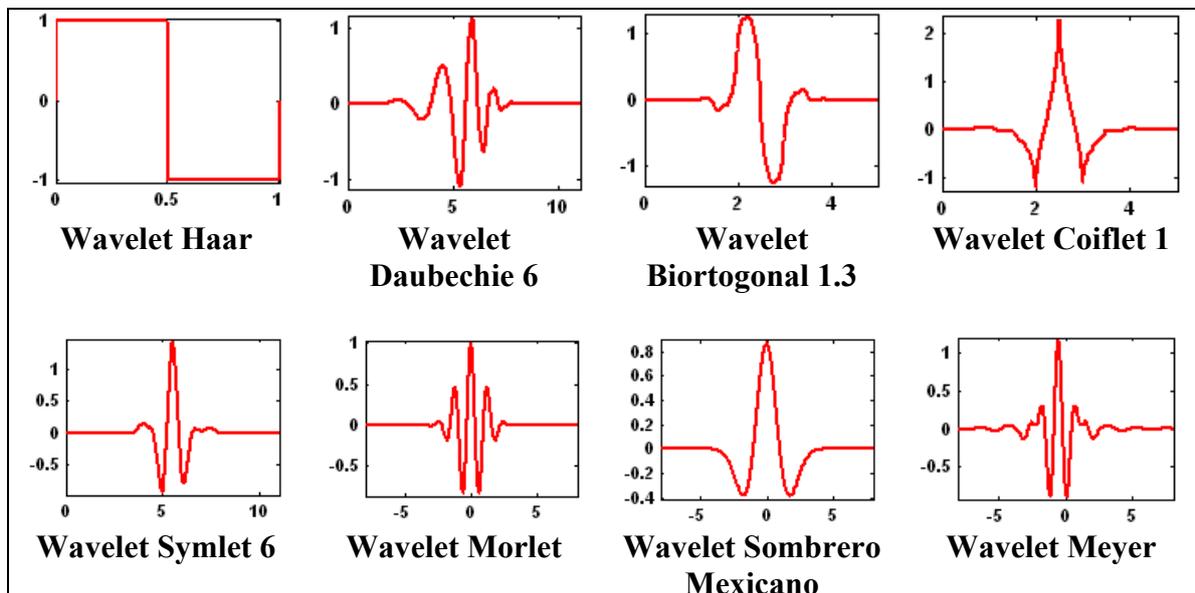


Figura 2.6 Wavelets madre más utilizadas.

Las Wavelets vienen definidas según un eje de tiempo continuo. El número indica la cantidad de momentos de desvanecimiento [10, 14, 9].

En este proyecto se han elegido como Wavelet madre la Daubechie 6 y la Daubechie 10. El motivo de esta elección es que ambas son las más adecuadas a la hora de tratar señales procedentes de rodamientos. Un objetivo a tratar será averiguar cual de las dos es la más apropiada, por ello se realizará una comparación de ambas en posteriores capítulos.

Dos aspectos característicos de la Transformada Wavelet son la escala y la translación que se explican a continuación.

### 2.2.3.1 Traslación

El término traslación se usa en el mismo sentido en el que ya fue utilizado para la STFT y está relacionado con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a través de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado. Sin embargo, no se tiene un parámetro que sea la frecuencia como antes se tenía en el caso de la STFT [1, 8, 9].

### 2.2.3.2 Escala.

En el análisis Wavelet el parámetro escala es análogo al parámetro escala de los mapas, es decir, las altas escalas corresponden a una visión global no detallada de la señal y las bajas escalas corresponden a una visión detallada. De igual manera, en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global de la señal que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal que comúnmente dura un tiempo relativamente pequeño [9].

Para comprender correctamente esta idea se muestra la Figura 2.7 donde se observa la función seno con distintas frecuencias. A frecuencias mayores se van teniendo escalas menores con lo que la señal es capaz de captar detalles más pequeños. Si se corta la función por 200 ms por ejemplo, en el caso de las altas frecuencias se observa sin problemas la forma de la función representada. A bajas frecuencias ( $f=1$ ), sin embargo, no es posible distinguir la forma de la función.

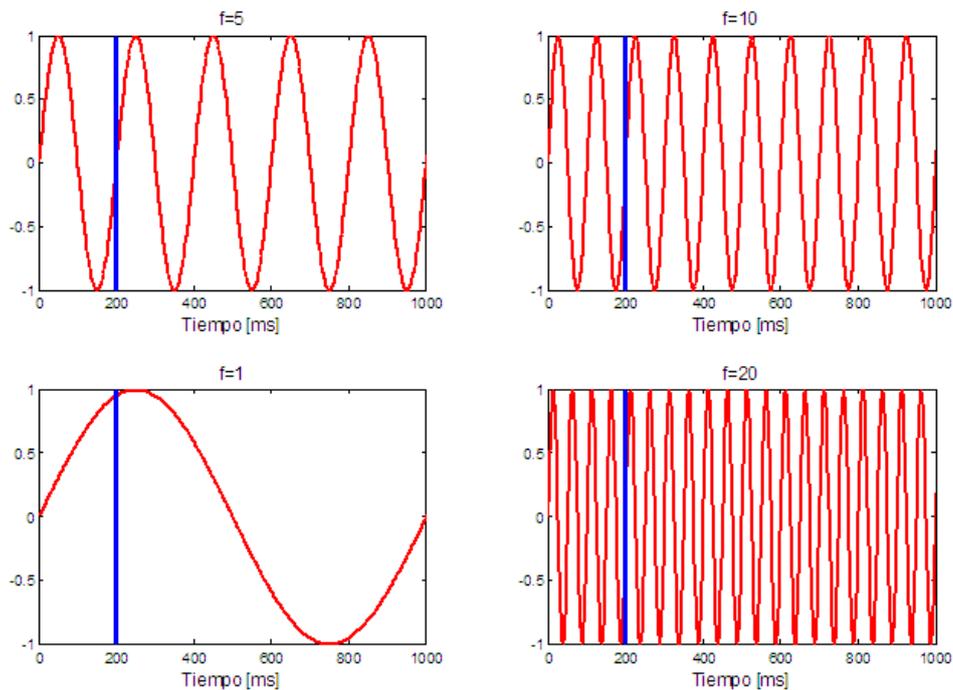


Figura 2.7 Ejemplo de una función seno para distintas escalas.

La relación entre estos dos términos, escala y frecuencia, viene dada por la Ecuación 2.6.

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot \Delta T}$$

Ecuación 2.6

Donde:

a es la escala.

$\Delta T$  es el período de muestreo.

$F_c$  es la frecuencia central de la Wavelet en hertzios.

$F_a$  es la pseudo-frecuencia correspondiente a la escala a en hertzios.

## 2.2.4 TIPOS DE TRANSFORMADA WAVELET

Existen dos tipos de Transformada Wavelet: continua (CWT) y discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica principalmente en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados en el segundo caso.

La CWT ya se ha descrito en el apartado 2.2.3. En este caso los parámetros cambien de manera continua. Desde un punto de vista intuitivo, la CWT consiste en calcular un índice de semejanza entre la señal que está siendo analizada, y la Wavelet, tal como se muestra en la Figura 2.8.

El proceso de cálculo de la CWT puede ser descrito en cuatro pasos como:

- Seleccionar una Wavelet madre.
- Dados dos valores de  $\tau$  y  $s$ , calcular un coeficiente ( $\tau, s$ ) mediante la Ecuación 2.4 y la Ecuación 2.5, que represente la correlación entre la Wavelet y la sección de la señal bajo análisis. Cuanto mayor sea éste, mayor es la similitud, con lo cual es interesante resaltar que los resultados dependerán de la forma Wavelet elegida.
- Desplazar la Wavelet en el sentido positivo del eje temporal, y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal.
- Escalar la Wavelet en el tiempo y repetir los pasos anteriores.

Un ejemplo del proceso se muestra en el Figura 2.8. Se toma la Wavelet madre y se calcula su correlación con una sección de la señal, del mismo modo que cuando se trabajaba con ventanas en la STFT. Se desplaza la Wavelet en el eje temporal y se calcula la correlación con la siguiente sección. Al terminar, se escala la Wavelet madre y se repite el proceso, tal como se muestra en el tercer caso de la Figura 2.8.

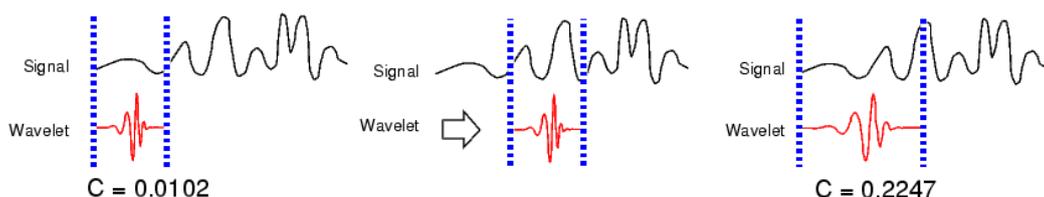


Figura 2.8 Esquema del funcionamiento de la CWT.

Por otra parte cuando la señal a analizar es una función discreta  $f[n]$  se utilizará la DWT. En este caso la transformada Wavelet de esta señal viene dada por la Ecuación 2.7

$$C[j, k] = \sum_Z f[n] \psi_{j,k}[n] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde  $\Psi_{j,k}$  es una Wavelet discreta definida como:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi[2^{-2j}n - k] \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Los parámetros  $\tau$  y  $s$  están definidos según la escala diádica, de manera que  $\tau=2^j$ ,  $s=2^j k$ , con la diferencia respecto a la CWT que la señal bajo estudio es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como se muestra en la Ecuación 2.9 [10,9]:

$$f[n] = \sum_Z \sum_Z C[j, k] \cdot \psi_{j,k}[n] \quad \text{Ecuación 2.9}$$

### 2.2.5 ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (MRA) Y WAVELET PACKET.

El MRA procesa una señal discreta  $X[n]$  a diferentes bandas de frecuencia y con diferentes resoluciones, al descomponer la señal en una información de aproximación y otra de detalle con filtros recursivos.

El primer paso de la descomposición Wavelet de una señal discreta  $X[n]$  con un ancho de banda determinado y un número de muestras  $N$ , consiste en la aplicación de dos filtros de media banda, el primero de paso alto con respuesta de impulso  $g[n]$ , y el segundo de paso bajo con respuesta de impulso  $h[n]$ . Tras el proceso de filtrado, se obtiene el mismo número de muestras de  $X[n]$  en las dos señales resultantes, aunque con la mitad de banda de frecuencia. Aplicando la regla de Nyquist, se justifica la eliminación de la mitad de las muestras sin pérdida de información relevante, tomando una de cada dos muestras consecutivas. Este procedimiento constituye el primer nivel de descomposición (nivel 1), y se puede expresar matemáticamente para todas las descomposiciones, en la Ecuación 2.10 y en la Ecuación 2.11 que se muestran a continuación [8, 9]. El proceso desarrollado se ilustra en la Figura 2.9 para una señal  $X[n]$  con un ancho de banda entre 0 y  $\pi$  rad/s.

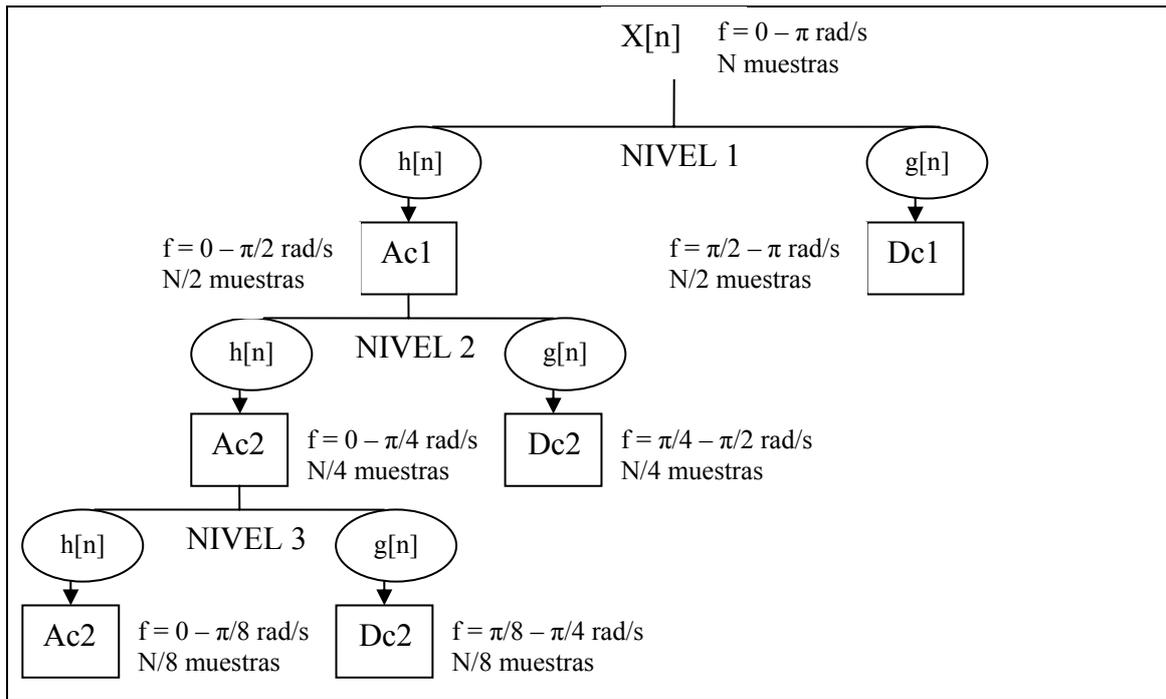


Figura 2.9 Esquema del MRA que genera la Descomposición Wavelet.

$$Dc[k] = y_{alto}[k] = \sum_n X[n]g[2k - n] \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$Ac[k] = y_{bajo}[k] = \sum_n X[n]h[2k - n] \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde  $y_{alto}$  o Dc representa la salida del filtro de paso alto (g), que son los denominados coeficientes de detalle, e  $y_{bajo}$  o Ac representa la salida del filtro de paso bajo (h), denominada coeficientes de aproximación. El término k representa el nivel de descomposición y 2k determina el submuestreo por un factor de dos. Ambas salidas conforman los Coeficientes de la Descomposición Wavelet, para el nivel de análisis correspondiente.

Para alcanzar niveles superiores de descomposición, se repite el procedimiento de filtrado y submuestreo para la señal de salida del filtro de paso bajo (el nivel de aproximación). En general, como muestra la Figura 2.9. Para cada nivel de descomposición N, corresponde la mitad del número de muestras del nivel anterior N-1.

Todo este proceso puede hacerse reversible mediante la siguiente síntesis, representada en la Ecuación 2.12

$$X[n] = \sum_{k=1}^{\infty} Dc[k]g(2k - n) + Ac[k]h(2k - n) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

La Ecuación 2.12 permite reconstruir la señal original mediante la suma de los coeficientes de detalle de la descomposición (a todos los niveles), multiplicados por el

filtro de paso alto  $g[n]$ , y los coeficientes de aproximación de último nivel de descomposición multiplicados por el filtro de paso bajo  $h[n]$ .

Como ha podido verse, el análisis y síntesis de la Descomposición Wavelet se realiza por medio de filtros. Este proceso, puede representarse a través del diagrama mostrado en la Figura 2.10

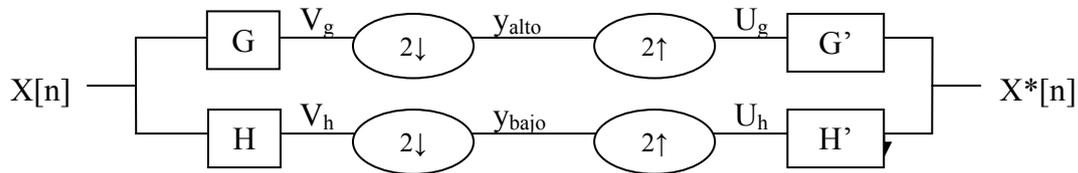


Figura 2.10 Banco de filtros de dos canales.

Siendo  $X[n]$  la señal original,  $V_g$  y  $V_h$  son las salidas de los filtros de media banda sin submuestrear, es decir, con el mismo número de muestras que el nivel anterior de descomposición. Para el proceso de síntesis,  $U_g$  y  $U_h$  representan los coeficientes Wavelet sobremuestreados, que producen la señal reconstruida  $X^*[n]$ .

El inconveniente que presenta el MRA es la pérdida de información al no descomponer los coeficientes de detalle, y sólo descomponer los coeficientes de aproximación. Esta restricción se observa en la Figura 2.9. Una técnica de análisis que es extensión de la MRA, y soluciona la pérdida de información comentada, es la Transformada de Paquetes Wavelet (Wavelet Packet).

El procedimiento de descomposición es prácticamente idéntico, con la única diferencia de que la información de detalle también genera información en niveles posteriores de descomposición. Es decir que cada descomposición pasa a ser la raíz de un nuevo árbol de descomposición. Tal procedimiento se ilustra en la Figura 2.11

Las ecuaciones para la descomposición son idénticas a las del MRA presentadas anteriormente. Se debe tener presente que ahora pueden existir distintos coeficientes de detalle y coeficientes de aproximación para un nivel determinado, por lo que la nomenclatura resulta más compleja.

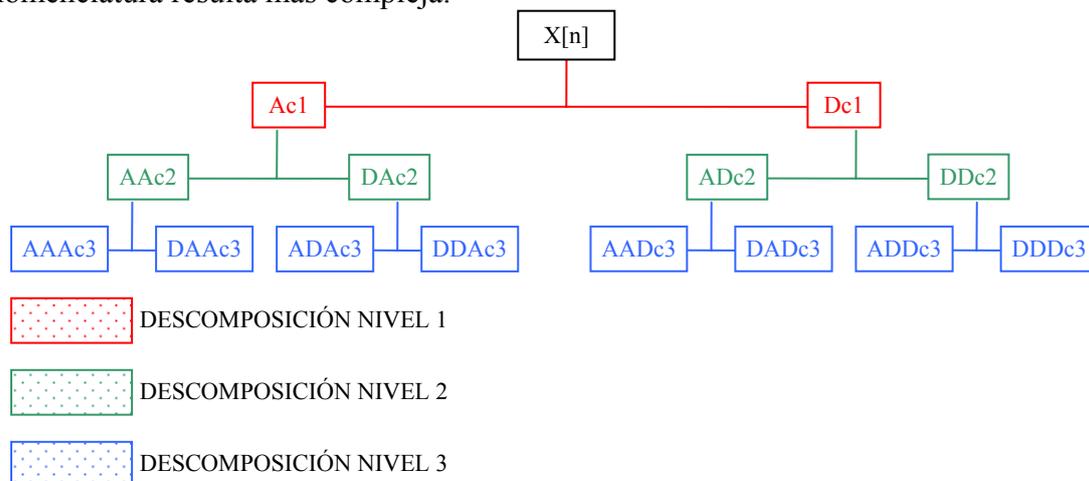


Figura 2.11 Diagrama de la Descomposición por Paquetes Wavelet



Ac1 = Coeficientes de Aproximación del Nivel 1

Dc1 = Coeficientes de Detalle del Nivel 1.

AAc2 = Coeficientes de Aproximación de Ac1, correspondientes al Nivel 2

DAc2 = Coeficientes de Detalle de Ac1, correspondientes al Nivel 2

ADc2 = Coeficientes de Aproximación de Dc1, correspondientes al Nivel 2

DDc2 = Coeficientes de Detalle de Dc1, correspondientes al Nivel 2

AAAc3 = Coeficientes de Aproximación de AAc2, correspondientes al Nivel 3.

DAAc3 = Coeficientes de Detalle de AAc2, correspondientes al Nivel 3.

ADAc3 = Coeficientes de Aproximación de DAc2, correspondientes al Nivel 3.

DDAc3 = Coeficientes de Detalle de DAc2, correspondientes al Nivel 3.

AADc3 = Coeficientes de Aproximación de ADc2, correspondientes al Nivel 3.

DADc3 = Coeficientes de Detalle de ADc2, correspondientes al Nivel 3.

ADDc3 = Coeficientes de Aproximación de DDc2, correspondientes al Nivel 3.

DDDc3 = Coeficientes de Detalle de DDc2, correspondientes al Nivel 3.

Considerando, por ejemplo, una señal discreta  $X[n]$  con un ancho de banda de  $0-\pi$  rad/s y  $N$  número de muestras, las bandas de frecuencia correspondientes a cada una de las descomposiciones, son las que se muestran en la Tabla 2.2.

Descomposición	Nivel	Número de muestras	Banda de frecuencia
Ac1	1	$N/2$	$0 - \pi/2$
Dc1	1	$N/2$	$\pi/2 - \pi$
AAc2	2	$N/4$	$0 - \pi/4$
DAc2	2	$N/4$	$\pi/4 - \pi/2$
ADc2	2	$N/4$	$\pi/2 - 3\pi/4$
DDc2	2	$N/4$	$3\pi/4 - \pi$
AAAc3	3	$N/8$	$0 - \pi/8$
DAAc3	3	$N/8$	$\pi/8 - \pi/4$
ADAc3	3	$N/8$	$\pi/4 - 3\pi/8$
DDAc3	3	$N/8$	$3\pi/8 - \pi/2$
AADc3	3	$N/8$	$\pi/2 - 5\pi/8$
DADc3	3	$N/8$	$5\pi/8 - 3\pi/4$
DDAc3	3	$N/8$	$3\pi/4 - 7\pi/8$
DDDc3	3	$N/8$	$7\pi/8 - \pi$

Tabla 2.2 Bandas de frecuencia de la Descomposición por Paquetes Wavelet para la señal  $X[n]$

Para los Paquetes Wavelet el proceso de síntesis varía, ya que el total de ancho de banda de la señal esta repartido en un mayor numero de coeficientes, y la reconstrucción se puede representar mediante la Ecuación 2.13, en donde solo se introduce información del último nivel de descomposición [8].

$$X[n] = \sum_k Dc[k]g(2k - n) + \sum_k Ac[k]h(2k - n) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Este método de análisis es el que se utilizará en este trabajo para descomponer las señales porque, como se comentó anteriormente, no se pierde información en las descomposiciones, como ocurría con el método MRA. Los rangos de frecuencia de las descomposiciones se mostrarán más adelante cuando se obtengan las frecuencias de adquisición de datos y el número de datos de cada señal, pero los pasos a seguir son los mostrados en este último caso.

Una vez realizada la descomposición de la señal utilizando el método Wavelet Packet, se calculará la energía de cada paquete [7, 9] que será diferente para condición de rodamiento. Esta diferencia se basa en que al aparecer un tipo determinado de defecto, aparecerán las frecuencias que lleva asociadas dicho defecto [8]. Las frecuencias de defecto estarán en alguno de los paquetes de energía haciendo que éstos tengan un valor superior a otros tipos de defecto que tengan frecuencias distintas no presentes en este paquete. Para comprender este razonamiento se presenta el siguiente ejemplo sencillo: Supóngase que se tienen dos rodamientos, uno normal y otro con un defecto tal que genera una frecuencia alrededor de 750 Hz, y el ancho de banda de las señales adquiridas de los rodamientos es de 0 a 1000 Hz. Al hacer una descomposición de profundidad 1 se crearán dos paquetes Wavelet, uno de 0 a 500 Hz y otro de 500 Hz a 1000 Hz. La frecuencia de defecto en el rodamiento en mal estado estará incluida en este segundo paquete con lo que su energía será mayor que la que presente el rodamiento libre de defecto para el mismo paquete. En la Figura 2.12 y 2.13 se muestra la representación de este ejemplo.

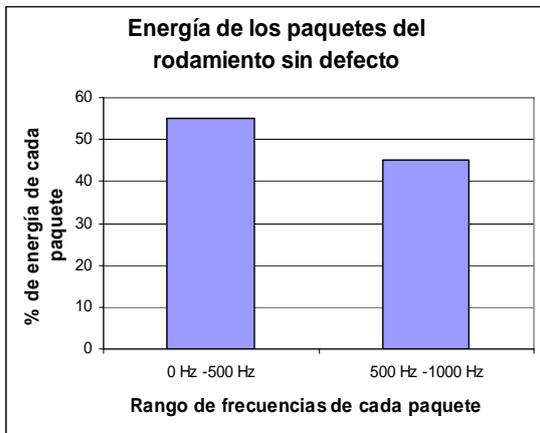


Figura 2.12 Representación de la energía de los paquetes Wavelet de una descomposición de profundidad 1. Rodamiento sin defecto

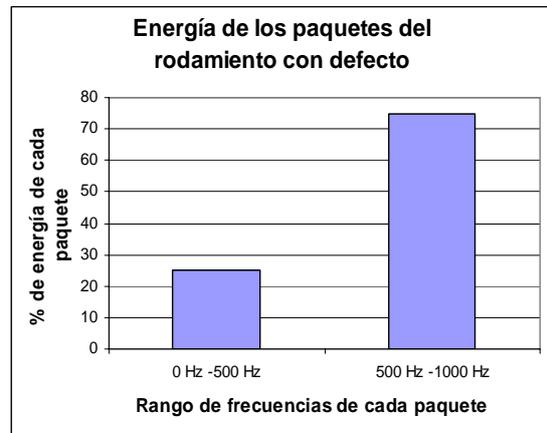


Figura 2.13 Representación de la energía de los paquetes Wavelet de una descomposición de profundidad 1. Rodamiento con defecto

Por último, señalar que para hacer el cálculo de la energía de los paquetes Wavelet se utiliza la Ecuación 2.14 [7, 9].

$$E(n) = \frac{\sum_{j,n,L} x_{j,n,L}^2}{\sum_k x_k^2}$$

Ecuación 2.14

Donde:

$x_{j,n,L}$  es la muestra número L del paquete n a nivel j

$x_k$  es la muestra k de la señal original.

Esta diferencia energética entre paquetes es en lo que esta basado la diferenciación entre cada tipo de defecto estudiado en esta memoria.

## 2.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LÓGICA DIFUSA

En esta sección se hará una breve descripción de la lógica difusa como sistema clasificador, una de las disciplinas matemáticas con mayor número de seguidores actualmente. La novedad de este tipo de lógica es que usan expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total. La lógica difusa permite tratar información imprecisa, como por ejemplo, estatura media o temperatura baja. En el presente proyecto se utilizará la lógica difusa como sistema para la determinación de la condición de fallo de un rodamiento en función del tipo de defecto. Los sistemas basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos difusos, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida [18].

### 2.3.1 CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES CARACTERÍSTICAS.

Para ilustrar el concepto de conjunto difuso, se va a utilizar el conjunto denominado “hombres altos”. Según la lógica clásica los hombres con una estatura mayor a un valor determinado (1.80 m por ejemplo) estarán dentro de este conjunto y los hombres de estatura inferior a este valor estarán fuera del conjunto. Sin embargo no parece muy lógico afirmar que un hombre es alto y otro no cuando su altura difiera dos centímetros por ejemplo. Este mismo conjunto, tratado desde el punto de vista de la lógica difusa, sería un conjunto sin una frontera clara y definiría la transición de alto a no alto mediante una función que asigne un grado de pertenencia al conjunto entre 0 y 1. Por ejemplo un hombre que mida 1.79 podría pertenecer al conjunto difuso de hombres altos con un grado de 0.8 de pertenencia, por otro lado un hombre que mida 1.81 pertenecería con un grado de 0.85 y un hombre de 1.50 pertenecería con un grado de 0.1. En la Figura 2.14 se ilustra este ejemplo [18].

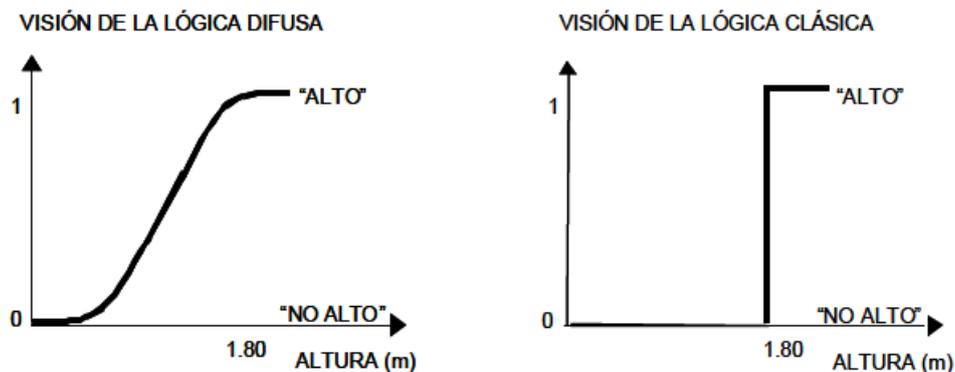


Figura 2.14 Lógica difusa versus lógica clásica.

La teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada  $x$  la función característica proporciona el grado de pertenencia de este valor de  $x$  al conjunto difuso  $A$ .

La forma de la función característica utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y variará en función de la cultura, geografía o punto de vista del usuario. La única condición que debe cumplir una función característica es que tome valores entre 0 y 1 y que sea continua en todos sus puntos. Las funciones características más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gamma, pi, campana, etc... (En la Figura 2.15 se presentan las funciones más comunes). Existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano del usuario, y la segunda aproximación consiste en utilizar una colección de datos para diseñar a función.

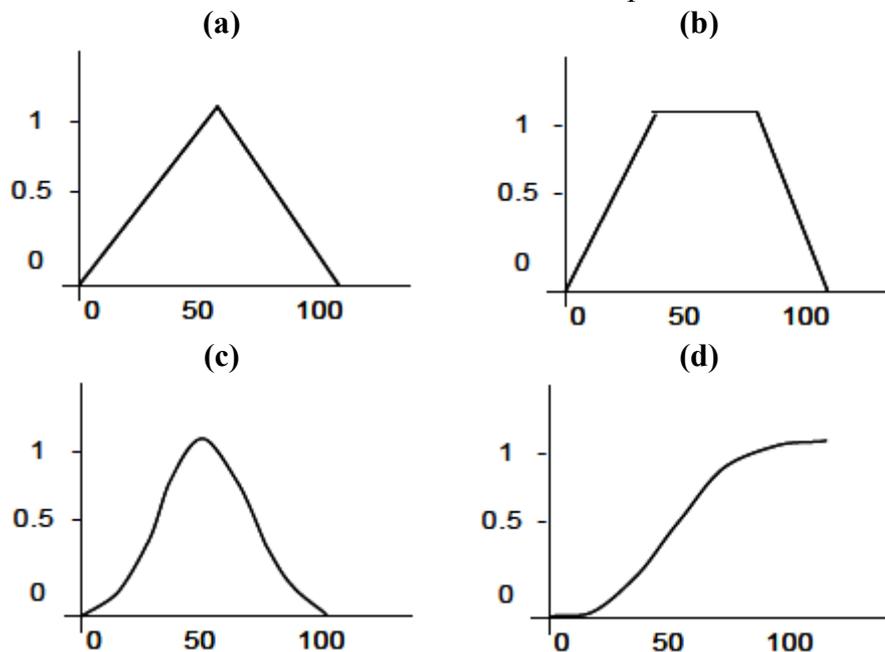


Figura 2.15 Algunas de las funciones características más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) sigmoideal.

El número de funciones características asociadas a una misma variable es elegido por el usuario: a mayor número de funciones características tendremos mayor resolución pero también mayor complejidad computacional; además estas funciones pueden estar solapadas o no, el hecho de estar solapadas pone de manifiesto un aspecto clave de la lógica difusa: una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez, es decir, “el vaso puede estar medio lleno y medio vacío a la vez” [12].



### 2.3.2 REGLAS DIFUSAS

Se llaman reglas difusas al conjunto de proposiciones SI – ENTONCES que modelan el problema que se quiere resolver. Una regla difusa simple tiene la forma:

“SI  $u_1$  es  $A_1$  y  $u_2$  es  $A_2$  y...  $u_p$  es  $A_p$ , ENTONCES  $v$  es  $B$ ”

Donde  $A_i$  y  $B$  son conjuntos difusos pertenecientes a los universos de discurso  $U_i$  y  $V_i$  respectivamente. Los elementos  $u_i$  ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) pertenecen respectivamente a los universos  $U_i$  y el elemento  $v$  pertenece al universo  $V$ .

Esta regla tiene además la particularidad de que es una regla multiantecedente, es decir, combina varias variables de entrada. Este tipo de reglas es el más utilizado en el diseño de sistemas difusos. Un sistema difuso estará formado por varias reglas difusas base, con uno o varios consecuentes [12].

Existen dos caminos para obtener el conjunto de reglas correspondiente a un conjunto de datos numéricos:

- Dejar que los datos establezcan los conjuntos difusos que aparecen en los antecedentes y los consecuentes, es decir ver como se relacionan los datos recogidos y establecer los conjuntos y reglas en consecuencia.
- Predefinir los conjuntos difusos para antecedentes y consecuentes y luego asociar los datos a esos conjuntos. Este método se utiliza cuando se sabe que los datos tienen que cumplir un patrón determinado al que han de ajustarse.

Para llegar a obtener el conjunto completo de reglas que modelan un problema se pueden considerar todas las combinaciones de reglas que es posible establecer teóricamente, entre el número de antecedentes  $p$  y el número de conjuntos difusos de entrada  $A_p$  considerados para cada antecedente. Así, para cada consecuente, el número teórico de reglas posibles vendrá dado por la Ecuación 2.15:

$$P_t = \prod_n A_n \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde  $P_t$  son todas las combinaciones de reglas posibles y  $n$  varía de 1 hasta  $p$ .

Sin embargo entre estas  $P_t$  reglas teóricamente posibles para cada consecuente, habrá algunas que no tengan sentido físico y otras que no se ajusten a las características del problema a resolver. Se deberá pues seleccionar, de entre todas las reglas posibles, el conjunto de reglas más adecuadas al problema que se considera [18].

### 2.3.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA BASADO EN TÉCNICAS DE LÓGICA DIFUSA.

El esquema de un sistema basado en técnicas de lógica difusa se presenta en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Esquema general de un sistema basado en lógica difusa

Este sistema se compone de los siguientes bloques:

- Bloque difusor:** A cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se ha considerado, mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.
- Bloque de inferencia:** Bloque que, mediante los mecanismos de inferencia que veremos más adelante, relaciona conjuntos difusos de entrada y de salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.
- Desdifusor:** A partir del conjunto difuso obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de desdifusión, se obtiene un valor concreto de la variable de salida, es decir, el resultado.

### 2.3.4 MECANISMOS DE INFERENCIA.

Los mecanismos de inferencia son aquellos en los que se usan los principios de la lógica difusa explicados en el apartado 2.3.2 para realizar un mapeo de los conjuntos difusos de entrada a los conjuntos difusos de salida. Es decir, el bloque de inferencia es aquel en el cual se realiza la “traducción matemática” de las reglas difusas. Como ya se ha mencionado anteriormente, las reglas más utilizadas para diseñar un sistema basado en lógica difusa toman la forma [12]:

“SI  $u_1$  es  $A_1$  y  $u_2$  es  $A_2$  y  $u_3$  es  $A_3$  ENTONCES  $v$  es  $B$ ”

El conjunto difuso de salida  $B$ , es el resultado de la agregación de todas las reglas que componen la regla base, es decir, de la combinación de los conjuntos difusos resultantes de cada una de las reglas. Más adelante se verá como se hace cada una de esas combinaciones.



Para procesar la información contenida en las reglas y obtener un resultado se deben elegir los operadores matemáticos que corresponden a los siguientes operadores lógicos:

- Los conectivos lógicos entre antecedentes, es decir, los operadores Y, O y NO:
- El operador lógico ENTONCES ( $\rightarrow$ ): implicación.
- La unión del resultado de todas las reglas: agregación

A continuación se detalla cómo se realizan estas tres operaciones.

#### 2.3.4.1 Conectivos lógicos entre antecedentes.

Los conectivos lógicos entre antecedentes serán los mismos que los utilizados en lógica clásica, es decir: Y, O y NO (AND, OR, NOT). Como la lógica clásica es un caso extremo de la lógica difusa, en este caso límite las tablas de verdad de los operadores lógicos clásicos y difusos deben coincidir. Las tablas de verdad de este caso se muestran en la Tabla 2.3.

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Y</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>O</b>		
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>A</b>	<b>NO A</b>
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>		

**Tabla 2.3** Tablas de verdad en lógica clásica de los operadores Y, O y NO.

Por lo tanto, se establece una equivalencia entre la lógica clásica y la lógica difusa, teniendo en cuenta que, la equivalencia de estas tablas de verdad en lógica difusa debe preservar estos resultados y extender los demás valores a números reales entre 0 y 1. La posibilidad para esta equivalencia, consiste en la siguiente asociación de los conectivos lógicos a las operaciones matemáticas que se muestran a continuación:

A Y B:  $\min(A,B)$   
 A O B:  $\max(A,B)$   
 NO A:  $1-A$

Como el lector puede comprobar, se siguen cumpliendo las tablas de verdad de la Tabla 2.3 que como ya se advirtió representa el caso extremo de la lógica clásica donde los conjuntos valen 0 o 1. En la Figura 2.17 se muestran unos ejemplos gráficos de cómo trabajan estos operadores [18].

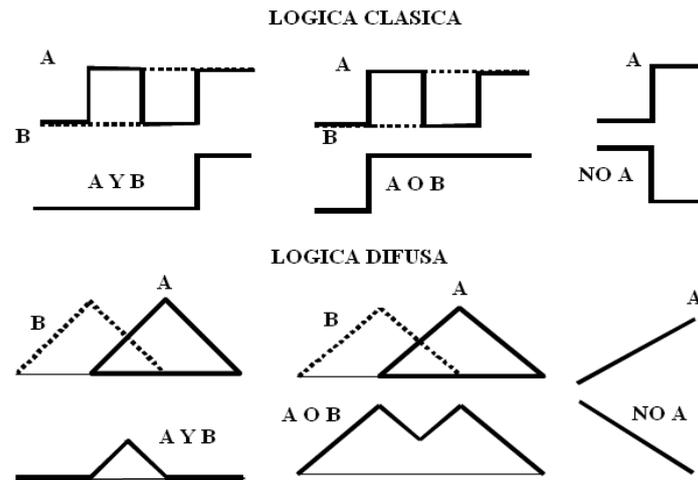


Figura 2.17 Actuación de los operadores Y, O y NO según la lógica clásica y difusa

Para terminar con esta explicación, se expone en la Figura 2.18 un ejemplo que se irá desarrollando en los próximos apartados para comprender los siguientes pasos. En este ejemplo se presentan dos variables de entrada de valores 2.5 y 60 a dos conjuntos difusos, A y B respectivamente. El valor 2.5 tiene un grado de pertenencia para A de 0.49 mientras que el valor 60 tiene un grado de pertenencia de 0 en el conjunto B. Conectando estos dos conjuntos con el operador O, se tiene un valor de salida de 0.49.

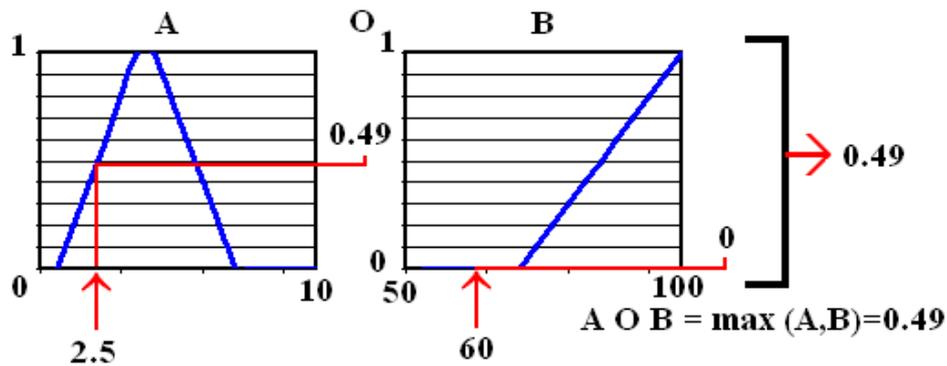


Figura 2.18 Ejemplo de conjuntos difusos y reglas difusas

### 2.3.4.2 Implicación difusa.

El conectivo lógico ENTONCES (THEN) representa una implicación entre el antecedente y el consecuente. Este operador relaciona el valor resultante de la operación en el antecedente con el conjunto difuso del consecuente. Aparte de esto cada regla puede tener un peso distinto a otras, es decir, que la salida de los antecedentes sea multiplicada por un factor que el usuario considere oportuno antes de ver el resultado en los consecuentes [18].

Para dar una mejor explicación se seguirá desarrollando el ejemplo de la Figura 2.18. En primer lugar supóngase que la salida del sistema general es una variable definida por el conjunto difuso C, el cual está definido por tres funciones características,  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , que se muestran en la Figura 2.19.

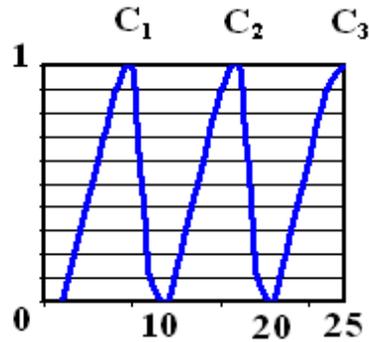


Figura 2.19 Funciones características del conjunto difuso de salida C

Si se desarrolla la regla del ejemplo se podría tener: “SI A O B ENTONCES C1”. Al introducir el valor de salida de la regla con la que se trabaja se obtiene un conjunto modificado. Gráficamente esta regla quedaría como se muestra en la Figura 2.20.

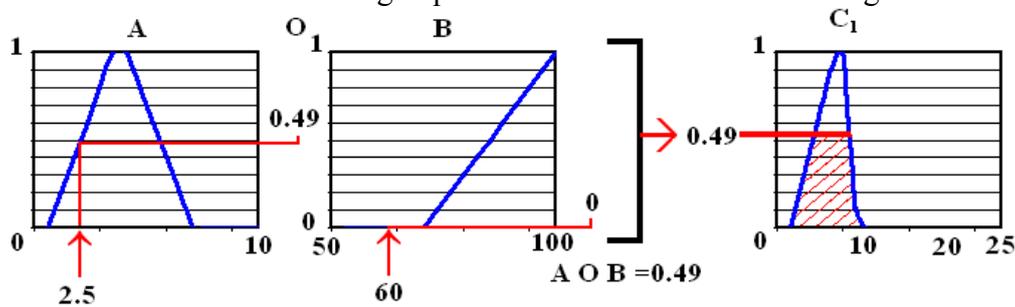


Figura 2.20 Regla de lógica difusa expresada gráficamente.

### 2.3.4.3 Agregación lógica.

Una vez evaluadas todas las reglas y obtenidos los conjuntos difusos de salida modificados, hay que realizar la agregación de todas las reglas para obtener un resultado único de la actuación de todas ellas. Esta agregación es una unión lógica que se define como máximo o suma algebraica de los conjuntos de salida, obteniéndose así un conjunto de salida único, asociado a la variable de salida [12, 18]. Siguiendo con el ejemplo anterior, supóngase que el sistema está formado por dos reglas más cuyas salidas estén referidas a las funciones  $C_2$  y  $C_3$ . Aunque no se exponen los antecedentes de estas reglas, para seguir con el ejemplo se va a suponer que los valores de salida son: 0.39 la regla asociada a  $C_2$  y 0.18 la asociada a  $C_3$ . En la Figura 2.21 se muestran estas salidas y la agregación de todas las salidas para la obtención de un conjunto de salida único.

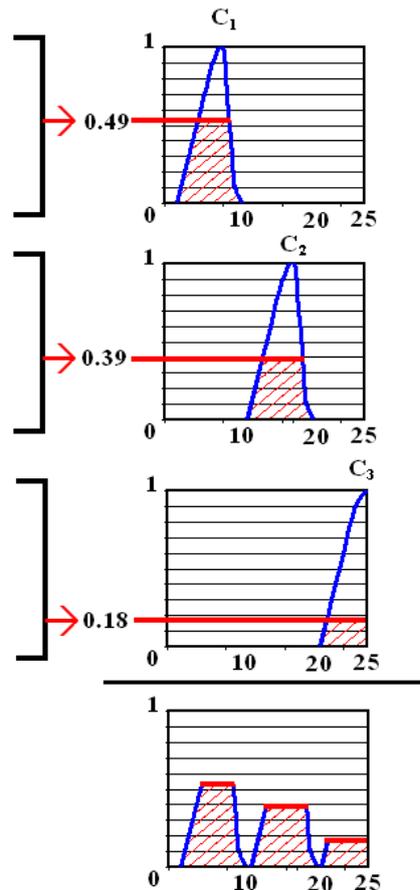


Figura 2.21 Salida de varias reglas difusas y agregación para la obtención del conjunto final

### 2.3.5 METODOS DE DESDIFUSIÓN

El bloque desdifusor realiza la función contraria al difusor. El difusor tiene como entradas valores concretos de las variables de entrada y como salidas grados de pertenencia a conjuntos difusos (entre 0 y 1). La entrada al bloque desdifusor es el conjunto difuso de salida, resultado del bloque de inferencia y la salida es un valor concreto. Para obtener, a partir del conjunto difuso de salida que resulta de la agregación de todas las reglas, un resultado escalar, se aplican métodos matemáticos. Ejemplos sencillos de algunos de estos métodos de cálculo son [12]:

- Método del máximo:** Se elige como valor para la variable de salida aquél para el cual la función característica del conjunto difuso de salida es máxima.
- Método del centroide:** Utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida.
- Método de la altura:** Se calcula para cada regla el centro de gravedad del conjunto difuso de la salida y después se calcula la salida del sistema como la media ponderada.



# Capítulo 3

## SISTEMA EXPERIMENTAL



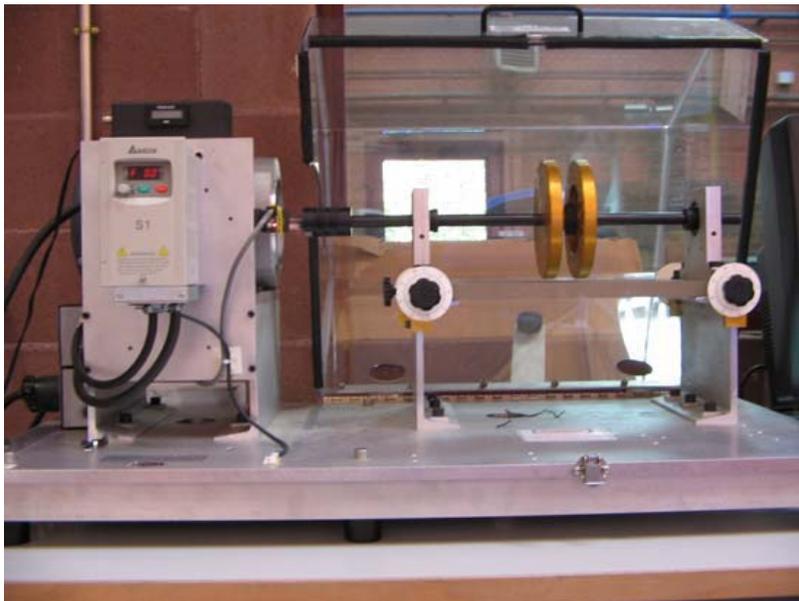
### 3.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo desarrolla el método para conseguir las señales de vibración de rodamientos para su estudio posterior. En primer lugar se mostrará el equipo necesario para la realización del ensayo dándose una breve descripción del mismo y de sus aspectos técnicos. Seguidamente se describirá la forma en la que se van a capturar los datos, es decir la frecuencia de muestreo utilizada, las velocidades de rotación del eje a las que se va a registrar los datos y la cantidad de datos que necesita cada velocidad para tener una muestra representativa.

### 3.2 EQUIPO DE ENSAYO.

En primer lugar se comenzará dando una descripción de los aparatos utilizados para la realización del ensayo:

1. Máquina de ensayo de rodamientos (Figura 3.1). La máquina ha sido diseñada por la empresa Spectra Quest, Inc. para el ensayo de rodamientos y elementos rotatorios y puede ser utilizada a altas velocidades por lo que en todo momento el funcionamiento se hará con el cristal de seguridad bajado. Esta medida de seguridad junto con otras más se adjuntan en el Anexo I al final del presente documento.



**Figura 3.1 Máquina de ensayo de rodamientos.**

2. Rodamientos de prueba. Se dispondrá de un rodamiento en perfecto estado y tres en estado defectuoso. Se trabaja con tres tipos de rodamientos defectuosos para la realización de los ensayos: defecto en una de las bolas, defecto en la pista interna y defecto en la pista externa. El modelo de rodamiento es el ER10K de la empresa MB Manufacturing de 5/8 pulgadas de diámetro interno. Las características de este modelo se muestra en el Anexo II de este documento. El rodamiento tendrá su anillo exterior fijo y el anillo interior se mueve solidario al eje de la máquina de ensayo. En la Figura 3.2 se muestra el alzado y planta de uno de los rodamientos.



Figura 3.2 Vista en alzado (a) y en planta del rodamiento (b)

### 3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Equipo necesario para la adquisición de datos:

1. Acelerómetro y amplificador (Figura 3.3). El primero es un acelerómetro de la marca MMF y modelo KD 37V cuya hoja de características se encuentra en el Anexo II. El amplificador es también de la marca MMF, modelo M32 de un canal, con un ancho de banda de 30 KHz., y cuyos factores de amplificación pueden variar entre 1, 10 y 100  $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ . Durante el ensayo se fijara en posición x10.



Figura 3.3 Acelerómetro (a) y amplificador (b) con la ganancia en la posición x10.

2. Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100 de ocho canales, con una frecuencia de muestreo máxima de 1 MHz por canal. Presenta entradas tanto analógicas como digitales, aunque en este proyecto solamente se utilizarán entradas analógicas.

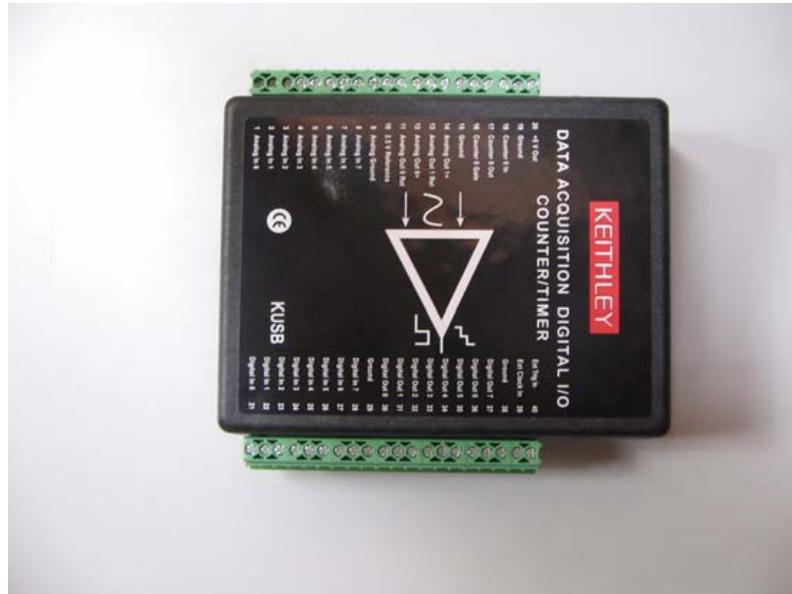


Figura 3.4 Tarjeta de adquisición de datos.

3. Ordenador personal equipado con el programa de adquisición de datos Test Point. Debe tener incluido además dos puertos USB. Uno de ellos para la entrada de señales y otro disponible para el hardware de protección del programa de adquisición de datos.
4. Programa de adquisición de datos. Se trata de un módulo programado con el Software Test Point<sup>TM</sup>, basado en programación gráfica en lugar de órdenes escritas, es decir que la forma de programar consiste en ir seleccionando iconos, cada uno con una función equivalente a las órdenes de los lenguajes tradicionales. El módulo de adquisición de datos es bastante sencillo de utilizar, únicamente se tendrá que seleccionar la frecuencia de muestreo en el recuadro rate(Hz) (ver Figura 3.5) y el número de muestras a tomar en el recuadro # points. El botón Acquire & Graph grabará la señal que esté entrando en ese momento al ordenador y la mostrará en el recuadro Acquired Data. Para guardar la señal a un fichero se utilizará el botón Save data to disk. El otro botón que aparece, Frequency Spectrum, calcula y muestra la Transformada de Fourier de la señal adquirida.

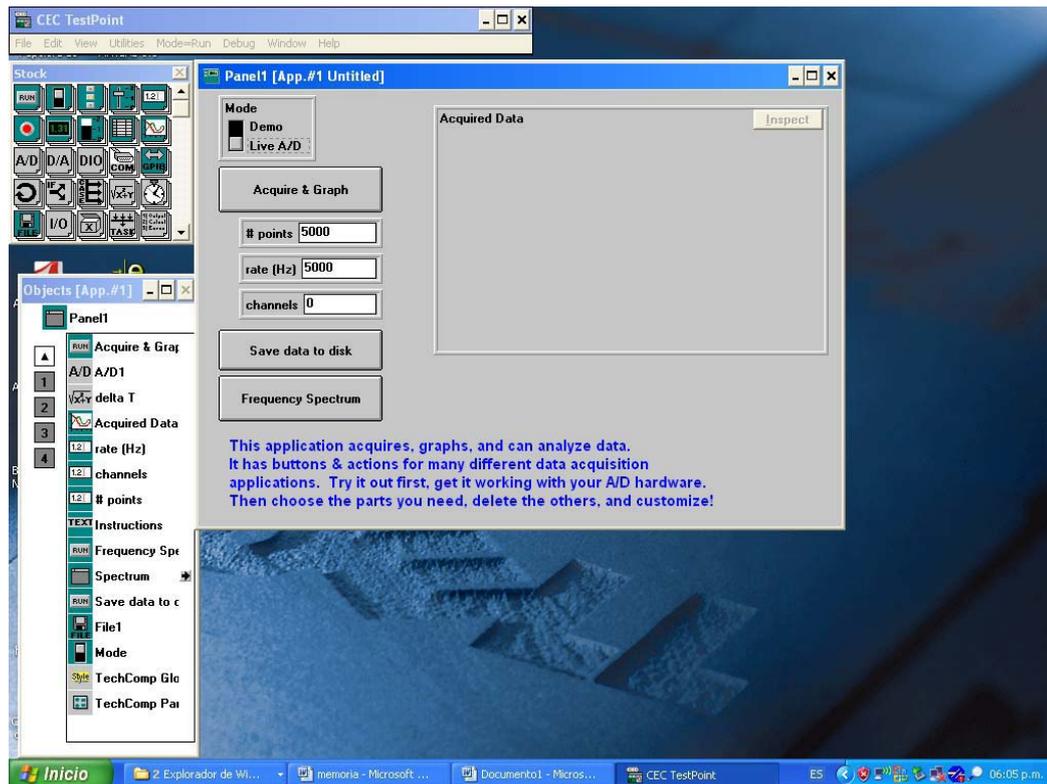


Figura 3.5 Programa de adquisición de datos.

5. Kit de llaves hexagonales para el montaje y desmontaje de los distintos rodamientos (5/16, 5/32 y 3/32) y cables de conexión: acelerómetro-amplificador, amplificador-tarjeta, tarjeta-PC. (Figura 3.6)

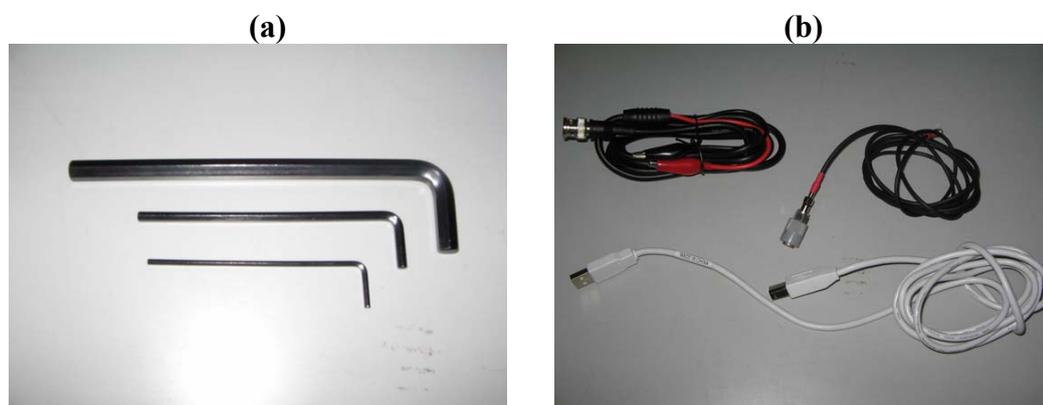


Figura 3.6 Kit de llaves de distintos tamaños (a) y cables de conexión entre los distintos aparatos mencionados (b).

En el Anexo III se muestran los pasos a realizar para el montaje de todo el equipo y en el Anexo IV el desmontaje de la máquina de ensayos para la extracción y colocación de rodamientos.

Como ya se explicó en la introducción del presente proyecto, el objetivo buscado es encontrar un patrón en la energía de las señales procedentes de las vibraciones de un rodamiento que varíe dependiendo de si el rodamiento a tratar es un rodamiento sin defecto o con alguno de los defectos comentados:



1. Fallo en el elemento rodante (una de las bolas)
2. Fallo en la pista interna.
3. Fallo en la pista externa.

La máquina de ensayo de rodamientos, está configurada de tal forma que se eliminan o reducen gran parte de los defectos provocados por la propia máquina (deslizamientos, vibraciones en el motor...) con el fin de que en la señal adquirida predomine la señal procedente del rodamiento. Se tomarán medidas para los valores de velocidad del eje de 600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm. El motivo por el cual se tienen en cuenta señales a distintas velocidades es para observar cómo afecta la velocidad en las señales producidas por los rodamientos con y sin defecto. No se consideran valores superiores de velocidad debido a que la máquina empezaría a funcionar a valores no recomendados para su correcto funcionamiento.

Para el programa de adquisición de datos se establecerá una frecuencia de muestreo de 5000 Hz. Esta frecuencia indica el número de muestras que toma en un segundo, en este caso serían 5000 muestras por segundo.

Como se comentó en el apartado 3.2, el rodamiento tiene su anillo exterior fijo y el anillo interior se mueve solidario al eje. De manera que lo que se intenta obtener es un giro completo del anillo interior del rodamiento para poder asegurar que se han tomado señales cuando la bola pasa por el defecto, ya sea de pista interior como de pista exterior, en el resto de los casos (bola y rodamiento normal) en teoría no debería variar la señal en función del número de muestras.

Para el tamaño de la señal experimental, es decir el número de muestras representativas, se debe recoger una muestra suficientemente grande como para tener una cantidad de datos cercana al correspondiente al giro de un rodamiento. Dada la velocidad de giro del rodamiento ( $\omega$ ) y la frecuencia de muestreo ( $\Delta f$ ), la cantidad de muestras necesarias para registrar un giro del rodamiento vendrá dada por la siguiente ecuación.

$$N^{\circ} \text{muestras} = \frac{\Delta f}{\omega} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El tiempo que tarda el rodamiento en completar una vuelta (periodo T) se calcula como la inversa de la velocidad de giro (en Hz). Así para las velocidades propuestas la cantidad de datos necesaria para registrar una vuelta completa se muestra en la Tabla 3.1

$\omega$ (RPM)	$\Omega$ (Hz)	T (s)	Muestras necesarias
600	10	0.1	500
1200	20	0.05	250
1800	30	0.0333	167

**Tabla 3.1 Velocidades de giro de la máquina de ensayo y número de muestras correspondiente**

La señal a menor velocidad corresponderá a la de mayor número de muestras. Como después al comparar señales deberán tener la misma longitud de puntos, se tomarán 500 muestras en cada señal. Aún así habrá que tener en cuenta en las



velocidades mayores (1200 y 1800 rpm) las señales recogidas con 500 muestras representan varias veces el periodo.

Una vez definida la frecuencia de muestreo y el número de muestras necesarias mínimas para registrar un período completo de la velocidad más lenta, se puede proceder a recoger las muestras. Es fácil darse cuenta de que si se toma una señal de 500 muestras se tendrá un período correspondiente a la velocidad de 600 rpm, pero si se tomase una señal de 5000 muestras se tendrán realmente 10 períodos registrados en el caso de 600 rpm y en el caso de 1800 rpm, 29.9 períodos registrados. Así por tanto para tener una buena cantidad de señales recogidas para después procesarlas en el siguiente capítulo, se grabarán señales con gran número de muestras. Las señales que se han tomado: 5 de 50000 muestras, 5 de 25000, 5 de 20000, 5 de 15000, 5 de 10000 y otras tantas de 5000 por cara rodamiento.

El motivo por el que registrar los archivos con distinta longitud (50000,10000...) es para que, una vez que se tenga el programa clasificador realizado con lógica difusa, evaluar la influencia del número de muestras en el resultado final y también conocer cuanto tiempo es necesario para tratar distintas longitudes de señal. Con el tiempo y la fiabilidad se puede determinar una longitud de señal óptima que proporcione unos resultados fiables en un tiempo de procesado que el usuario considere oportuno para su aplicación real concreta.



## **Capitulo 4**

# **PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES**



## 4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo trata en primer lugar de cómo adecuar la señal pura obtenida del sistema experimental a una señal lista para ser tratada directamente en el programa de procesamiento desarrollado en este proyecto que ha sido realizado en Matlab<sup>®</sup>. A continuación del acondicionamiento de la señal, se pasará a su análisis mediante descomposición en Wavelet Packet. Para ello Matlab<sup>®</sup> lleva incluido el complemento Wavelet Toolbox que contiene comandos para realizar análisis Wavelet Packet y el cálculo de la energía de cada paquete que es, como ya se expuso en capítulos anteriores, lo que va a definir cada tipo de defecto y hacerlo distinguibles entre sí. La energía se irá calculando cada vez para descomposiciones de mayor nivel de profundidad hasta llegar a un nivel adecuado donde se vea claramente un patrón distinto para cada rodamiento. Las descomposiciones se realizarán con dos Wavelets madre distintas: la Daubechie 6 primero y la Daubechie 10 posteriormente, con el fin de averiguar que Wavelet madre es la más idónea para trabajar en el análisis de la condición de un rodamiento. La mejor solución será aquella Wavelet madre cuyas descomposiciones, al nivel ya elegido, presenten menos variabilidad o dispersión dentro de un mismo tipo de rodamiento y velocidad.

En la Figura 4.1 se muestra un diagrama de los pasos que se van a seguir para transformar la señal recogida en el ensayo en sus bandas de energía.

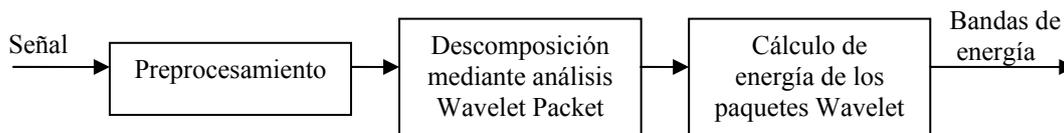


Figura 4.1 Diagrama de bloques del método de trabajo.

## 4.2 PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

El archivo que se ha obtenido con el programa de adquisición de datos es un archivo que no puede ser tratado por Matlab directamente sino que hay que aplicarle varias transformaciones sencillas antes de ser tratado con un análisis Wavelet. Estas transformaciones son lo que se ha denominado preprocesamiento.

En primer lugar se escogerá un archivo de los obtenidos en el apartado anterior que como recordará el lector tenían longitudes de 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 y 50000 datos. La gran cantidad de datos que presentan estos archivos no pueden ser tratados a la vez por Wavelet Packet, sino que hay que agruparlos para formar señales más pequeñas que puedan ser tratadas convenientemente. Según las leyes de muestreo [13] cada señal tiene que estar compuesta por  $2^n$  datos. Las señales tomadas proceden de las velocidades de giro de 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz así que lo mejor es trabajar con un número de datos en los que aparezca el período de cada una pero teniendo en cuenta que tiene que ser el mismo número de datos para todas las velocidades luego habrá que elegir el que mejor se ajuste a las 3 velocidades. Recordará el lector que en el capítulo anterior se mostraba la cantidad de datos que se necesitaba para representar un período a cada una de las velocidades en la Tabla 3.1: 500 datos para la velocidad de 10 Hz, 250

para la de 20 Hz y 167 para la de 30 Hz. Al ser una potencia de 2 el número de datos a elegir, podrían usar cantidades cercanas como 128, 256 y 512. Para 512 se representarían varios periodos de la señal de velocidad 30 Hz que daría lugar a información redundante, y con 128 sólo se representaría la cuarta parte de la velocidad de 10 Hz y en este caso se perdería mucha información. Luego entonces la solución de compromiso sería elegir una longitud de señal de 256 datos.

Una vez elegida la longitud de la señal de 256 datos, se trocearán los archivos adquiridos con TexPoint™ en grupos de dicha cantidad. Cada grupo de 256 datos serán los archivos que se procesarán con el programa Matlab® para analizarlos mediante Wavelet Packet y después calcular la energía de cada paquete obtenido. Como cada paquete representa un conjunto de frecuencias entre dos valores fijos, a partir de ahora se denominará a los paquetes, bandas de frecuencia y su energía correspondiente banda de energía. En la Figura 4.2 se muestran cuatro tipos de señales correspondientes a el funcionamiento de un rodamiento con defecto en bola, con defecto en pista externa, con defecto en pista interna y por último un rodamiento normal, todas ellas sin tratar a velocidad de 30 Hz que va a ser la velocidad con la que se va a trabajar a partir de ahora.

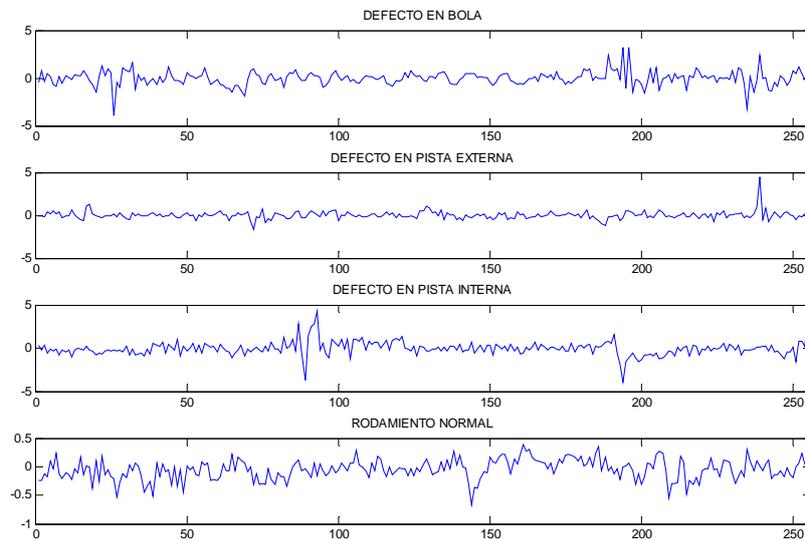
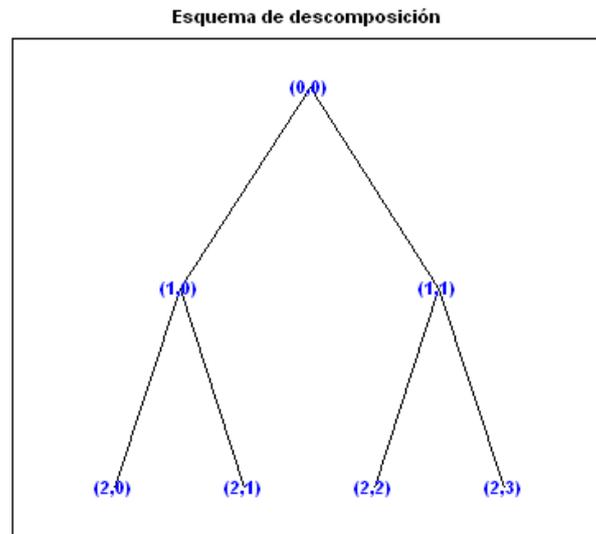


Figura 4.2 Señales procedentes de cada uno de los rodamientos

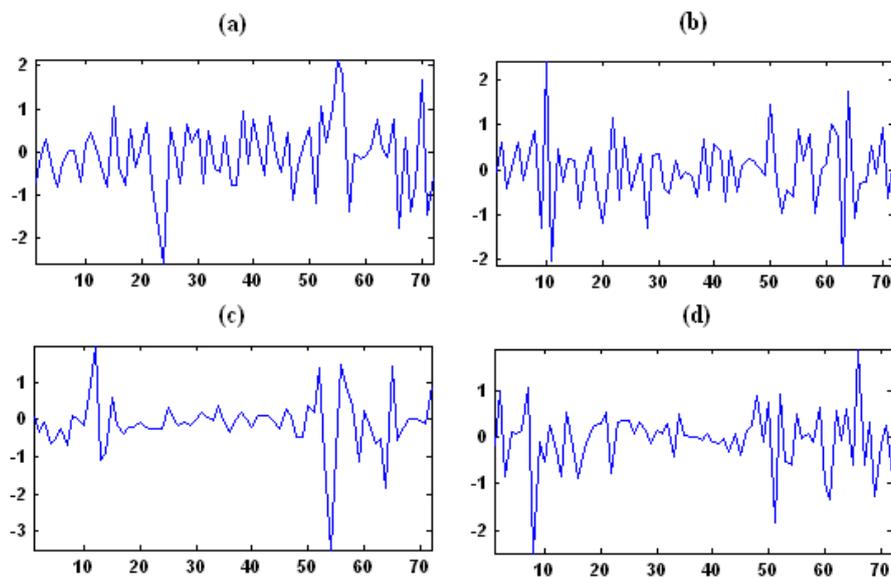
### 4.3 ANÁLISIS MEDIANTE WAVELET PACKET.

Una vez que se tiene la señal de un tamaño de 256 datos lista para ser leída por los comandos de Matlab®, se procede a su descomposición mediante Wavelet Packet. El proceso a seguir ha sido explicado en el apartado 2.2.5. Para comenzar se va a trabajar con un nivel de descomposición de profundidad dos, el esquema de la descomposición de la señal a ese nivel se muestra en la Figura 4.3



**Figura 4.3 Esquema de Descomposición en paquetes Wavelet**

Cada nodo inferior de la Figura 4.3 representa un paquete Wavelet. Como la señal original tiene un ancho de banda de 5000 Hz, cada paquete agrupa 1250 Hz, es decir el nodo (2,0) representa una banda de frecuencia de 0 Hz a 1250 Hz, el (2,1) de 1250 Hz a 2500 Hz, el nodo (2,2) de 2500 Hz a 3750 Hz y el (2,3) de 3750 Hz a 5000 Hz. En la Figura 4.4 se muestran paquetes obtenidos de una señal con defecto en bola. El paquete (a) es el nodo (2,0) del esquema de la Figura 4.3, en (b) es el nodo (2,1), el (c) el (2,2) y el (d) el (2,3).



**Figura 4.4 Paquetes obtenidos de la descomposición de una señal con defecto en bola.**

En los paquetes mostrados en la Figura 4.4, se observa como los paquetes (a) y (b) tienen mayor amplitud que los paquetes (c) y (d). El hecho de tener una mayor amplitud indica que la señal presentará una mayor energía, por lo tanto aplicando la Ecuación 2.14 para el cálculo de la energía se tendrá un valor para cada paquete o banda que lo distinga claramente de los demás paquetes de la misma señal.



## 4.4 ANÁLISIS DE BANDAS DE ENERGÍA

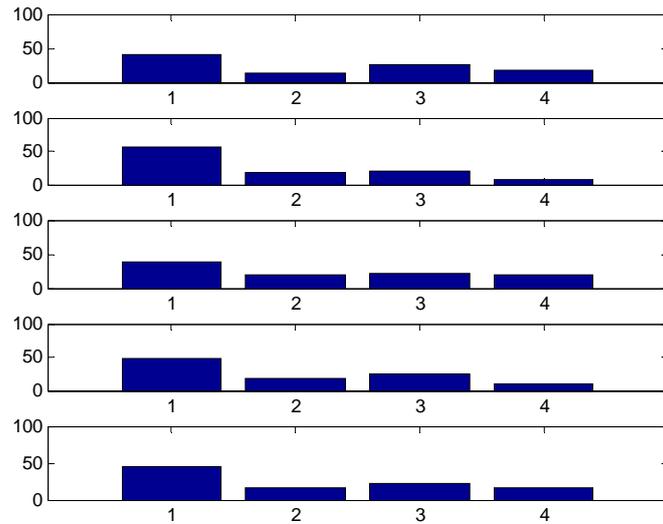
En este apartado se procederá a realizar el cálculo de la energía de cada paquete Wavelet para conocer los patrones que identifican cada tipo de defecto. El método de trabajo consistirá en tratar 50 señales distintas de un mismo tipo de rodamiento a la misma velocidad: En este caso, se ha elegido 30 Hz como se ha apuntado en los anteriores apartados ya que a mayor velocidad los defectos tienen mayor presencia en las vibraciones. Se harán los cálculos de energía de cada una de las señales del grupo de 50 y se calculará la media y desviación típica del grupo. Aparte de estos dos datos, de las gráficas correspondientes a la media de energía de las 50 señales y de las señales individuales, se ha programado en Matlab® una salida formada por dos matrices que se ha considerado denominar matriz de posición absoluta y matriz de posición porcentual. Estas dos matrices muestran la cantidad de veces en número absoluto o en porcentaje que una determinada banda ocupa una determinada posición. Las matrices de posición serán muy útiles más adelante cuando se programe el sistema de lógica difusa. Aparte de este futuro uso, también pueden ayudar a ver la dispersión que tiene cada una de las bandas de energía. Es decir, se puede ver si una banda se concentra en una posición determinada manteniendo, por tanto, el mismo valor de energía de una señal a otra, o por el contrario, aparece en multitud de posiciones según se van analizando más señales del mismo rodamiento. Lo preferible, para simplificar el proceso de clasificación, es que tenga poca dispersión, es decir, que siempre se mueva en las mismas posiciones. Con estas matrices y su representación gráfica se podrá ver esta dispersión. Este método de dispersión junto con un análisis de la desviación típica serán la base para decidir qué Wavelet madre es más adecuada si la Daubechie 6 (db6) o la Daubechie 10 (db10).

### 4.4.1 DESCOMPOSICIONES CON NIVEL DE PROFUNDIDAD 2.

Como se expuso en la introducción del presente capítulo, se irá calculando la energía a desde niveles inferiores a los más altos. Empezaremos con un nivel de profundidad 2, ya que una descomposición de profundidad 1 sólo genera dos bandas de energía por lo que sería imposible encontrar 4 patrones distintos. A continuación se muestran las descomposiciones para cada tipo de rodamiento.

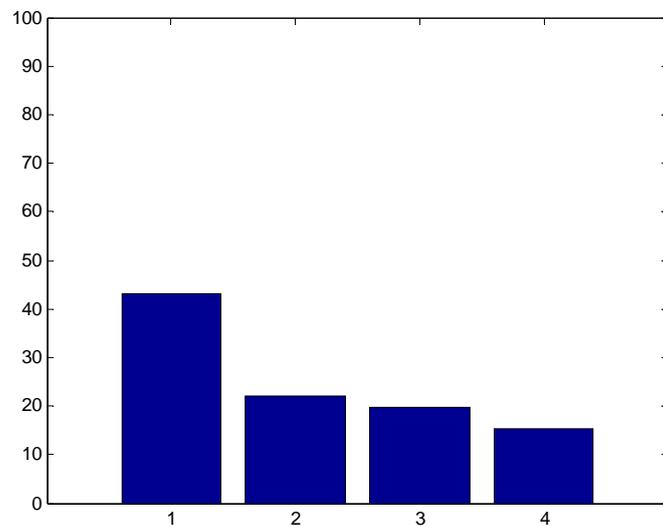
#### 4.4.1.1 *Análisis del rodamiento con defecto en bola.*

En primer lugar se muestra en la Figura 4.5 un grupo de señales del rodamiento con fallo en bola a las que se le ha aplicado la descomposición al nivel de profundidad dos, utilizando la Wavelet madre db6.



**Figura 4.5 Energía de 5 señales de rodamiento con defecto en bola con nivel de descomposición 2.**

La banda 1 corresponde a las frecuencias comprendidas entre 0 Hz y 1250 Hz, la banda número 2 corresponde a las frecuencias comprendidas entre 1250 Hz y 2500 Hz, la número 3 corresponde a las frecuencias comprendidas entre 2500 Hz y 3750 Hz y por último la número 4 que corresponde a las frecuencias entre 3750 y 5000 Hz. En la Figura 4.6 se muestra la media de las energías de cada banda de las 50 señales tratadas y en la Tabla 4.1 los valores numéricos de dichas medias.



**Figura 4.6 Media de energía de las 50 señales.**

<b>1</b>	<b>0 Hz – 1250 Hz</b>	<b>: 43.05%</b>
<b>2</b>	<b>1250 Hz – 2500 Hz</b>	<b>: 21.93%</b>
<b>3</b>	<b>2500 Hz – 3750 Hz</b>	<b>: 19.74%</b>
<b>4</b>	<b>3750 Hz – 5000 Hz</b>	<b>: 15.28%</b>

**Tabla 4.1 Media de energía de las 50 señales**

Como se observa en la Figura 4.6 y en la Tabla 4.1 la energía se concentra en la primera banda con más del 40%. El resto se reparte entre las otras 3 bandas con valores muy parecidos aunque el orden es primero la segunda banda, después la tercera banda y por último la cuarta banda. En la Tabla 4.2 se muestra la matriz de posición absoluta y en la Tabla 4.3 la matriz de posición porcentual.

		N° DE BANDA			
		1	2	3	4
POSICIÓN	1	46	2	2	0
	2	3	28	16	3
	3	1	11	23	15
	4	0	9	9	32

Tabla 4.2 Matriz absoluta

		N° DE BANDA			
		1	2	3	4
POSICIÓN	1	92	4	4	0
	2	6	56	32	6
	3	2	22	46	30
	4	0	18	18	64

Tabla 4.3 Matriz porcentual

La información de ambas matrices es la misma por lo que a partir de ahora solamente se mostrará la matriz porcentual. Para hacerla más visible se representará también gráficamente en un diagrama de barras como se puede ver en la Figura 4.7. Las pertenecientes al mismo color representan la misma banda de energía.

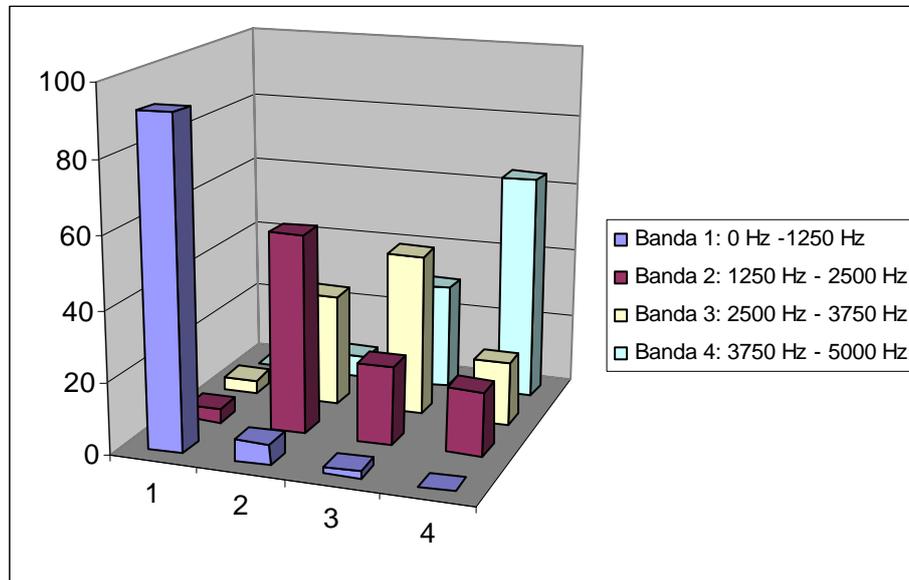


Figura 4.7 Gráfica correspondiente a la matriz de posición porcentual.

La primera banda ocupa más del 90% de las veces la primera posición para las 50 señales analizadas. La segunda banda ocupa un 56 % de las veces la segunda posición. De igual manera la tercera banda ocupa la tercera posición un 46 % y la cuarta banda ocupa 64% de las veces la última posición. Es interesante señalar que en la segunda posición y la tercera hay varias bandas con valores parecidos lo que llevará a que



cambien las posiciones y en señales individualmente analizadas presenten patrones distintos. Aún así el patrón obtenido es en este caso: 1ª, 2ª, 3ª y 4ª banda.

Para el caso de la descomposición utilizando db10 se van seguir los mismos pasos. En la Figura 4.8 se muestra un grupo de señales analizadas utilizando como Wavelet madre la db10:

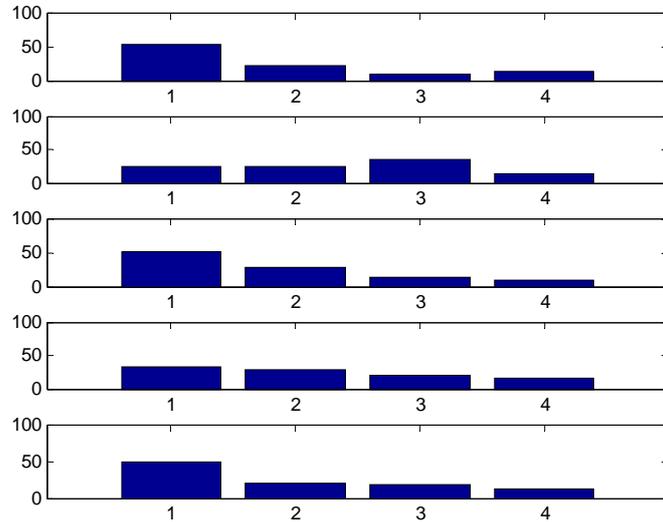


Figura 4.8 Energía de 5 señales con nivel 2 de descomposición

Los valores de cada banda son los mismos que se tenían en el caso para db6. A continuación se en la Figura 4.9 y en la Tabla 4.4 la media de energía para las 50 señales:

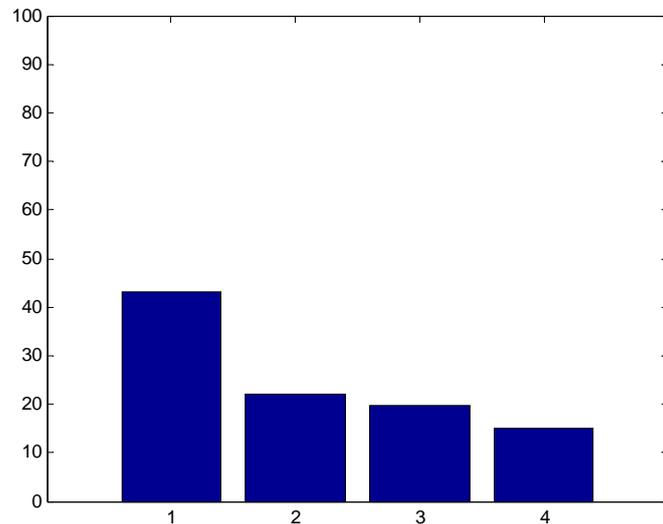


Figura 4.9 Media de energía de las 50 señales

1	0 Hz – 1250 Hz	: 43.15%
2	1250 Hz – 2500 Hz	: 22.16%
3	2500 Hz – 3750 Hz	: 19.70%
4	3750 Hz – 5000 Hz	: 14.99%

Tabla 4.4 Media de energía de las 50 señales



Al igual que en el caso de la Wavelet madre db6, se observa que la energía se concentra con más del 40% en la primera banda repartiéndose entre las otras 3 con valores más cercanos entre sí. En la Tabla 4.5 se muestra la matriz de posición porcentual y en la Figura 4.10 la gráfica correspondiente.

		Nº DE BANDA			
		1	2	3	4
POSICIÓN	1	90	4	6	0
	2	10	52	30	8
	3	0	38	44	18
	4	0	6	20	74

Tabla 4.5 Matriz porcentual

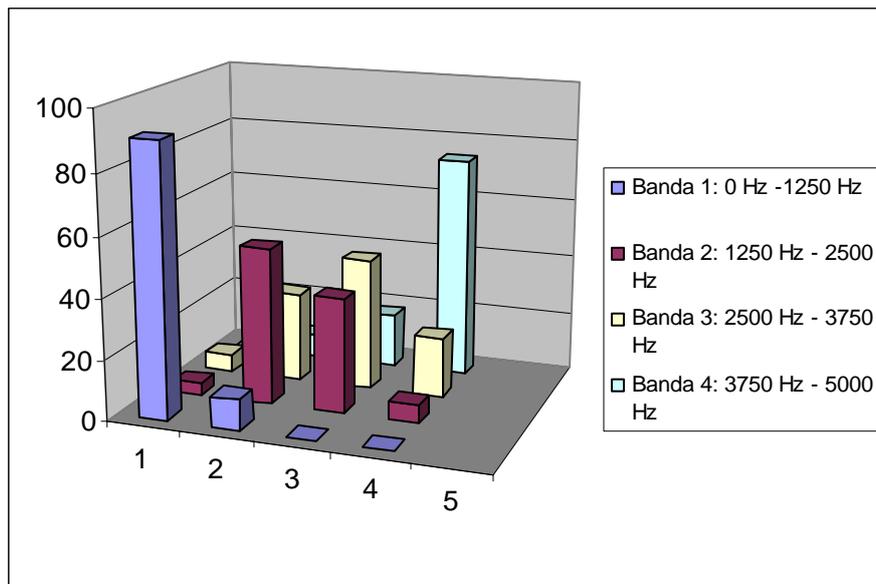


Figura 4.10 Gráfica correspondiente a la matriz de posición porcentual

Al igual que en la anterior Daubechie, la primera banda está el 90% en la primera posición. La segunda banda está el 50% de las veces en la segunda posición, la tercera banda presenta más variación y donde más veces aparece es en la tercera posición con un 44%. Por último la cuarta banda se encuentra en la última posición el 74 % de las veces. Al igual que en el caso anterior se ve que existe bastante semejanza en las posiciones centrales lo que conllevará el problema antes comentado. El patrón es el mismo que el visto con la Daubechie 6.

Como se puede comprobar el análisis realizado es igual que el realizado con la otra Daubechie así que a partir de ahora no se expondrá. Únicamente se comentará al final del análisis con db6 si coincide el patrón encontrado con db10 o si no coincide indicar cual es, pero nada más. De igual forma para los siguientes rodamientos se

mostrarán únicamente las gráficas y tablas de resultados ya que los pasos a seguir son los mismos.

**4.4.1.2 Análisis del rodamiento con defecto en pista externa.**

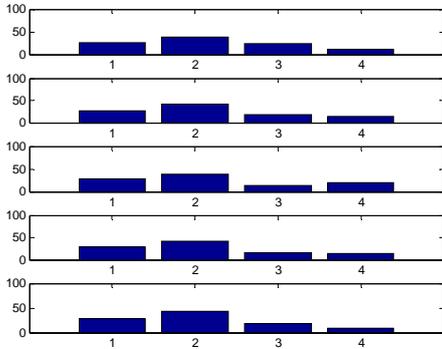


Figura 4.11 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 2

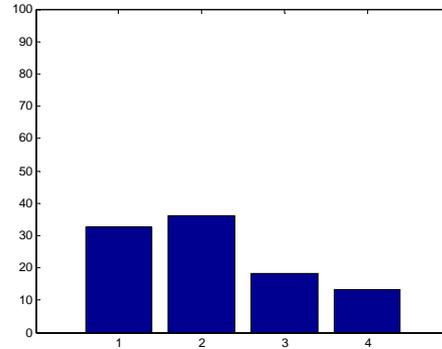


Figura 4.12 Media de energía de las 50 señales

1	0 Hz – 1250 Hz	: 32.48 %
2	1250 Hz – 2500 Hz	: 35.98 %
3	2500 Hz – 3750 Hz	: 18.29 %
4	3750 Hz – 5000 Hz	: 13.27 %

Tabla 4.6 Media de energía de las 50 señales.

		Nº DE BANDA			
		1	2	3	4
POSICIÓN	1	36	58	6	0
	2	56	32	10	2
	3	6	10	68	16
	4	2	0	16	82

Tabla 4.7 Matriz porcentual

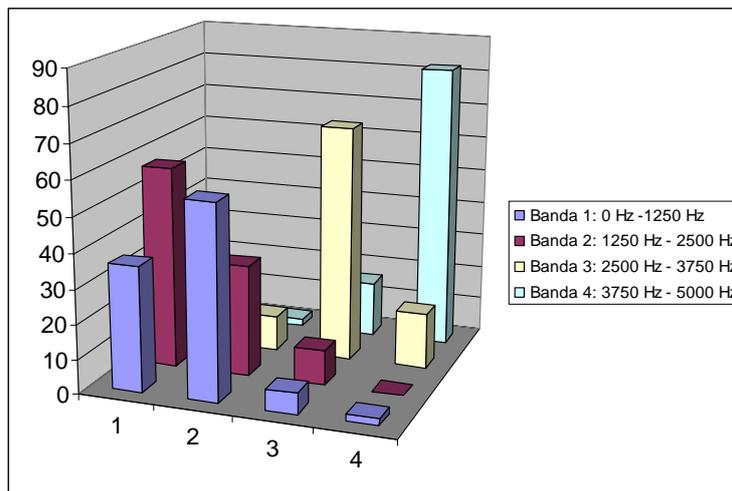


Figura 4.13 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual.

En este rodamiento el patrón buscado es: 2<sup>a</sup>, 1<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> y 4<sup>a</sup> banda. Utilizando la Wavelet madre db10 también se obtiene este patrón.

4.4.1.3 Análisis del rodamiento con defecto en pista interna.

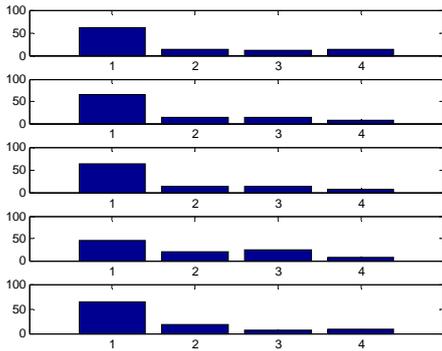


Figura 4.14 Energía de 5 señales descompuesta a nivel 2.

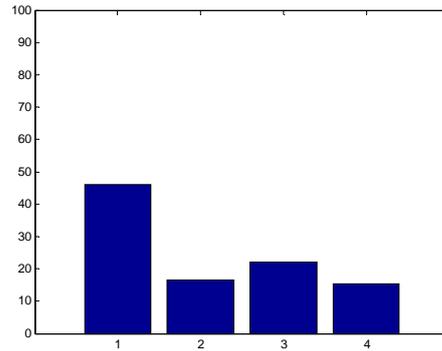


Figura 4.15 Media de energía de las 50 señales

1	0 Hz – 1250 Hz	: 46.17 %
2	1250 Hz – 2500 Hz	: 16.46 %
3	2500 Hz – 3750 Hz	: 22.10 %
4	3750 Hz – 5000 Hz	: 15.26 %

Tabla 4.8 Media de energía de las 50 señales

		Nº DE BANDA			
		1	2	3	4
POSICIÓN	1	44	2	4	0
	2	5	10	26	9
	3	1	17	10	22
	4	0	21	10	19

Tabla 4.9 Matriz porcentual

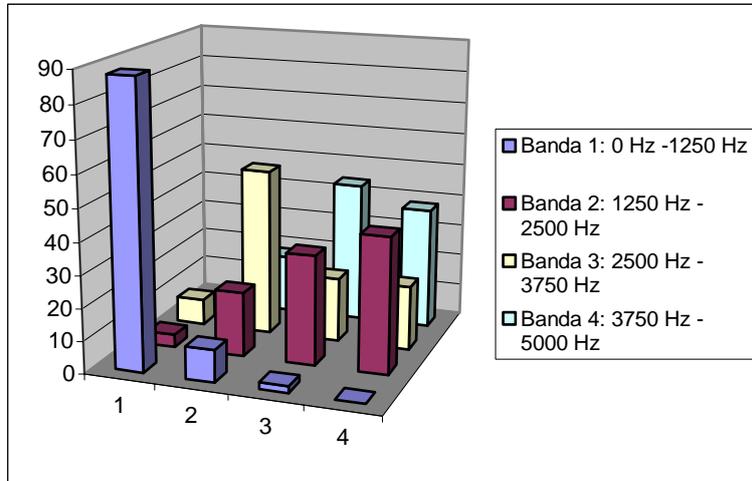


Figura 4.16 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual.

En este caso el patrón buscado es 1ª, 3ª, 4ª y 2ª banda. Dicho patrón también coincide con el obtenido utilizando la db10 en este rodamiento.

4.4.1.4 Análisis del rodamiento sin defecto.

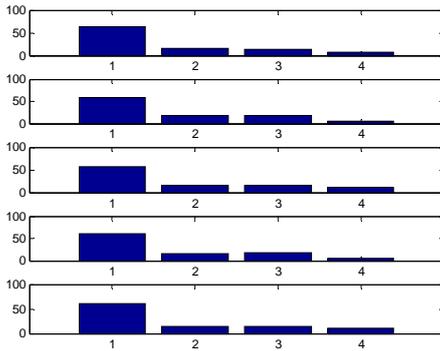


Figura 4.17 Energía de 5 señales descompuestas al nivel 2.

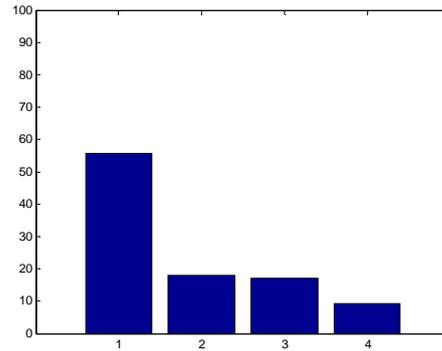


Figura 4.18 Media de energía de las 50 señales

1	0 Hz – 1250 Hz	: 55.77
2	1250 Hz – 2500 Hz	: 17.84
3	2500 Hz – 3750 Hz	: 17.17
4	3750 Hz – 5000 Hz	: 9.22

Tabla 4.10 Media de energía de las 50 señales

Al analizar este cuadro, se observa que el patrón sería: 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> y 4<sup>a</sup> banda, patrón que coincide con el rodamiento de defecto en bola. Como las bandas tercera y segunda tienen valores muy parecidos es lógico pensar que intercambiarán la posición, por lo tanto, en ese caso coincidiría también con el patrón del rodamiento con defecto en pista interna. Para la Wavelet madre db 10 se tienen los mismos patrones por lo que se deduce que no es conveniente utilizar esta profundidad de descomposición ya que se considera insuficiente. Debido a estas conclusiones no se realizará el análisis de la matriz porcentual.

4.4.2 DESCOMPOSICIÓN CON NIVEL DE PROFUNDIDAD 3

Como la descomposición a nivel 2 no ha dado buenos resultados, se aumenta un nivel la descomposición Wavelet Packet. Los pasos a seguir son los mismos que en el apartado anterior por lo tanto solamente se expondrán las tablas de resultados y conclusiones de cada análisis.

4.4.2.1 Análisis del rodamiento con defecto en bola.

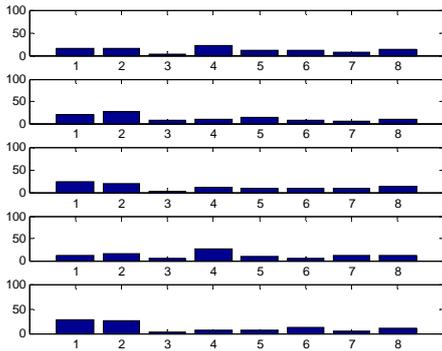


Figura 4.19 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 3.

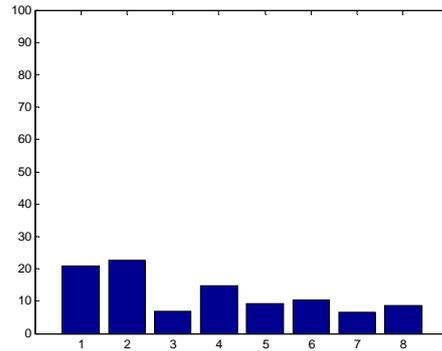


Figura 4.20 Media de energía de las 50 señales.

1	0 Hz – 625 Hz	: 20.96%
2	625 Hz – 1250 Hz	: 22.61%
3	1250 Hz – 1875 Hz	: 6.95%
4	1875 Hz – 2500 Hz	: 14.90%
5	2500 Hz – 3125 Hz	: 9.09%
6	3125 Hz – 3750 Hz	: 10.31%
7	3750 Hz – 4375 Hz	: 6.49%
8	4375 Hz – 5000 Hz	: 8.68%

Tabla 4.11 Media de energía de las 50 señales.

		N° DE BANDA							
		1	2	3	4	5	6	7	8
POSICIÓN	1	28	52	0	12	0	8	0	0
	2	34	36	2	18	6	2	0	2
	3	26	6	2	30	12	18	2	4
	4	4	6	14	28	10	22	4	12
	5	8	0	8	4	18	22	6	34
	6	0	0	20	4	24	12	22	18
	7	0	0	18	4	26	10	20	22
	8	0	0	36	0	4	6	46	8

Tabla 4.12 Matriz porcentual.

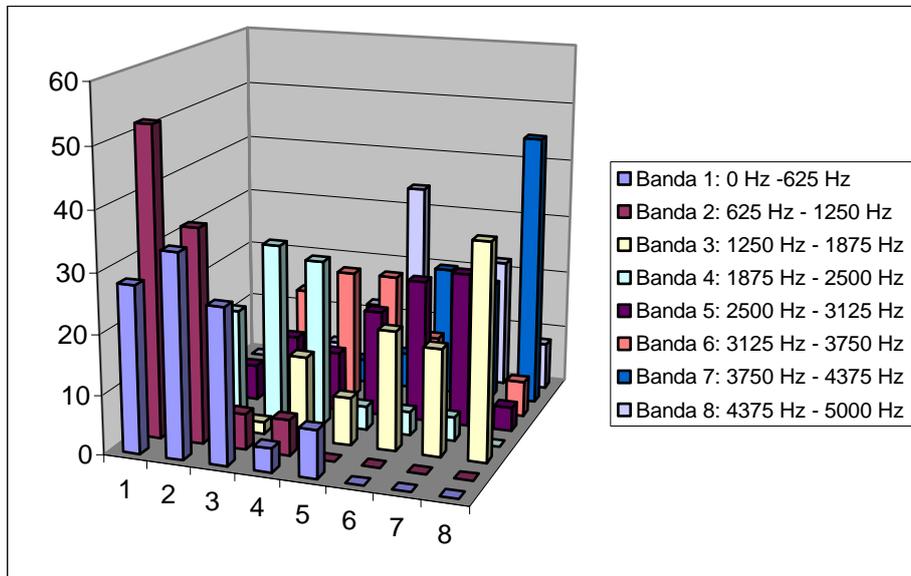


Figura 4.21 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual.

En este primer caso de descomposición de profundidad 3 se observa que el orden de las bandas de mayor energía a menor energía es: 2ª, 1ª, 4ª, 6ª, 5ª, 8ª, 3ª y 7ª banda. La Wavelet madre db10 presenta este mismo patrón.

4.4.2.2 Análisis del rodamiento con defecto en pista externa.

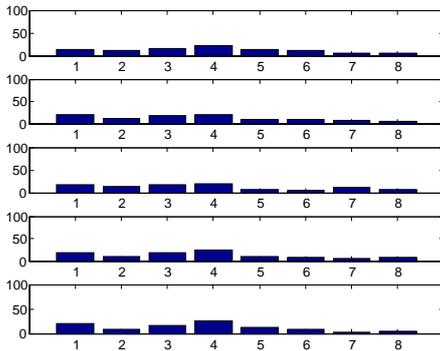


Figura 4.22 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 3

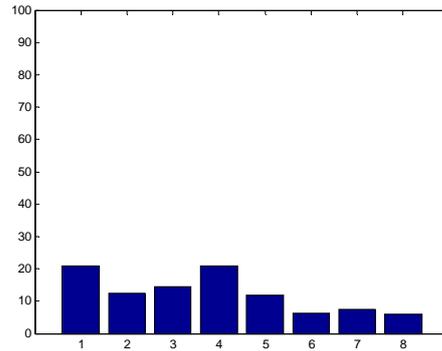


Figura 4.23 Media de la energía de las 50 señales.

1	0 Hz – 625 Hz	: 20.78 %
2	625 Hz – 1250 Hz	: 12.51 %
3	1250 Hz – 1875 Hz	: 14.34 %
4	1875 Hz – 2500 Hz	: 20.91 %
5	2500 Hz – 3125 Hz	: 11.82 %
6	3125 Hz – 3750 Hz	: 6.35 %
7	3750 Hz – 4375 Hz	: 7.35 %
8	4375 Hz – 5000 Hz	: 5.95 %

Tabla 4.13 Media de la energía de las 50 señales

		Nº DE BANDA							
		1	2	3	4	5	6	7	8
POSICIÓN	1	36	2	6	44	12	0	0	0
	2	28	8	16	42	2	0	4	0
	3	22	30	30	4	12	0	2	0
	4	6	34	28	2	22	2	2	4
	5	6	14	12	6	34	8	18	2
	6	2	6	8	2	14	22	26	20
	7	0	4	0	0	4	30	20	42
	8	0	2	0	0	0	38	28	32

Tabla 4.14 Matriz porcentual.

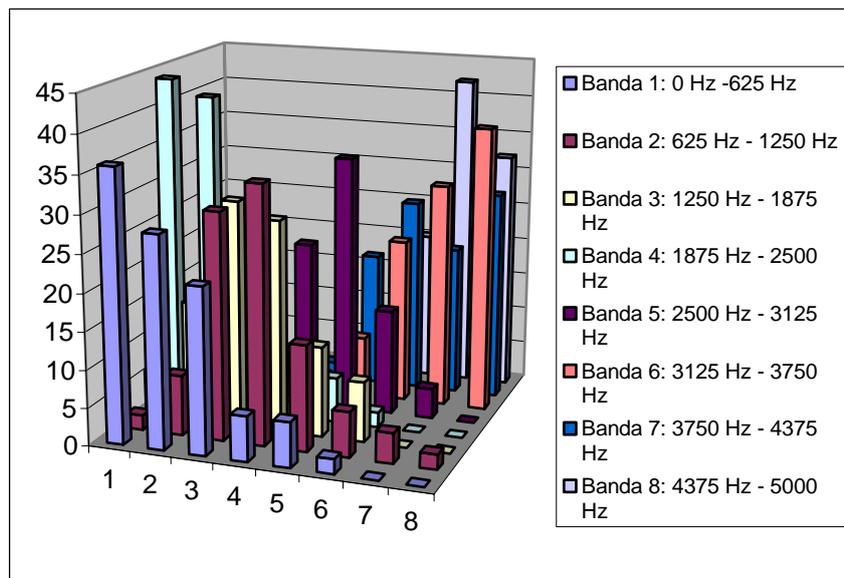


Figura 4.24 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual.

El patrón para este rodamiento es: 4<sup>a</sup>, 1<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup> y 8<sup>a</sup> banda. Analizando el mismo caso utilizando la Wavelet madre db10 se tiene el mismo patrón expuesto.



4.4.2.3 Análisis del rodamiento con defecto en pista interna.

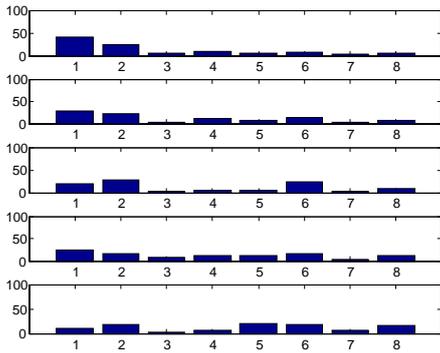


Figura 4.25 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 3.

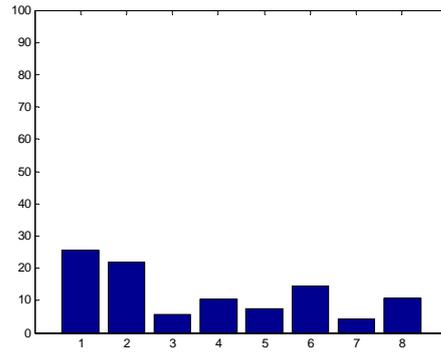


Figura 4.26 Media de energía de las 50 señales.

1	0 Hz – 625 Hz	: 25.47 %
2	625 Hz – 1250 Hz	: 21.67 %
3	1250 Hz – 1875 Hz	: 5.60 %
4	1875 Hz – 2500 Hz	: 10.49 %
5	2500 Hz – 3125 Hz	: 7.35 %
6	3125 Hz – 3750 Hz	: 14.50 %
7	3750 Hz – 4375 Hz	: 4.20 %
8	4375 Hz – 5000 Hz	: 10.72 %

Tabla 4.15 Media de energía de las 50 señales

		N° DE BANDA							
		1	2	3	4	5	6	7	8
POSICIÓN	1	52	34	0	2	4	8	0	0
	2	22	44	2	4	0	18	0	10
	3	12	14	2	20	6	30	0	16
	4	0	4	4	30	6	28	0	28
	5	8	2	10	24	16	14	2	24
	6	6	2	26	12	30	2	6	16
	7	0	0	24	8	26	0	36	6
	8	0	0	32	0	12	0	56	0

Tabla 4.16 Matriz porcentual.

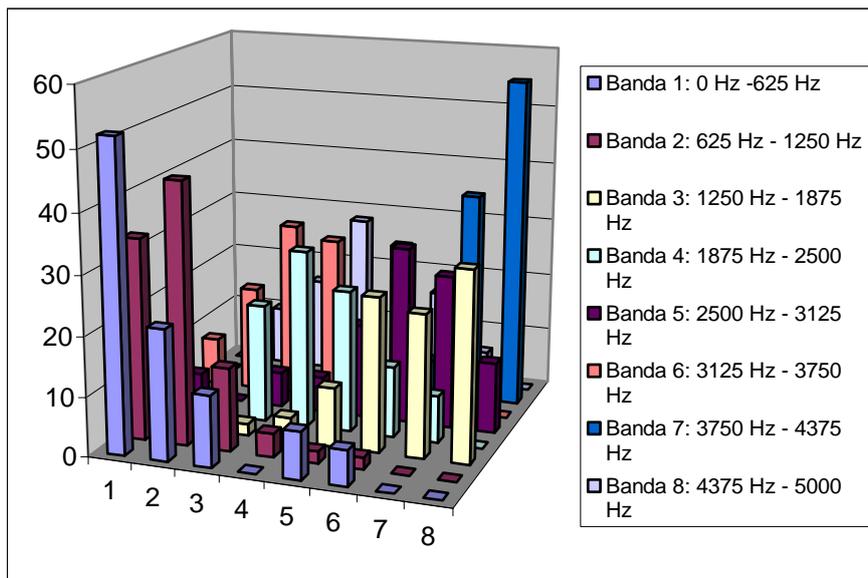


Figura 4.27 Gráfica correspondiente a la matriz porcentual.

El patrón de este rodamiento es: 1ª, 2ª, 6ª, 8ª, 4ª, 5ª, 3ª y 7ª banda. En el caso de realizar el análisis con la Wavelet madre db10 se tendría una pequeña variación en las bandas centrales siendo el patrón: 1ª, 2ª, 6ª, 4ª, 8ª, 5ª, 3ª y 7ª.

4.4.2.4 *Análisis del rodamiento sin defecto.*

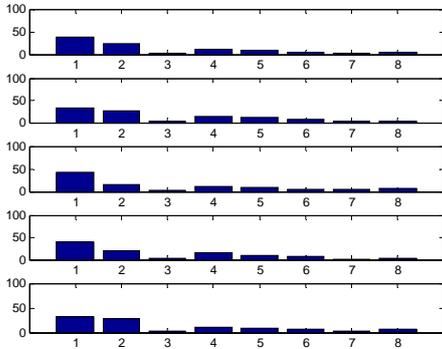


Figura 4.28 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 3.

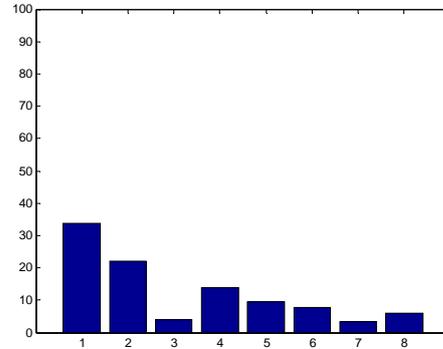


Figura 4.29 Media de energía de las 50 señales

1	0 Hz – 625 Hz	: 33.72 %
2	625 Hz – 1250 Hz	: 22.10 %
3	1250 Hz – 1875 Hz	: 3.91 %
4	1875 Hz – 2500 Hz	: 13.97 %
5	2500 Hz – 3125 Hz	: 9.37 %
6	3125 Hz – 3750 Hz	: 7.69 %
7	3750 Hz – 4375 Hz	: 3.38 %
8	4375 Hz – 5000 Hz	: 5.86 %

Tabla 4.17 Media de energía de las 50 señales

		Nº DE BANDA							
		1	2	3	4	5	6	7	8
POSICIÓN	1	86	14	0	0	0	0	0	0
	2	12	76	0	6	6	0	0	0
	3	2	8	0	78	8	2	0	2
	4	0	2	0	10	48	36	0	4
	5	0	0	0	6	24	42	2	26
	6	0	0	16	0	12	14	4	54
	7	0	0	54	0	0	6	30	10
	8	0	0	30	0	2	0	64	4

Tabla 4.18 Matriz porcentual.

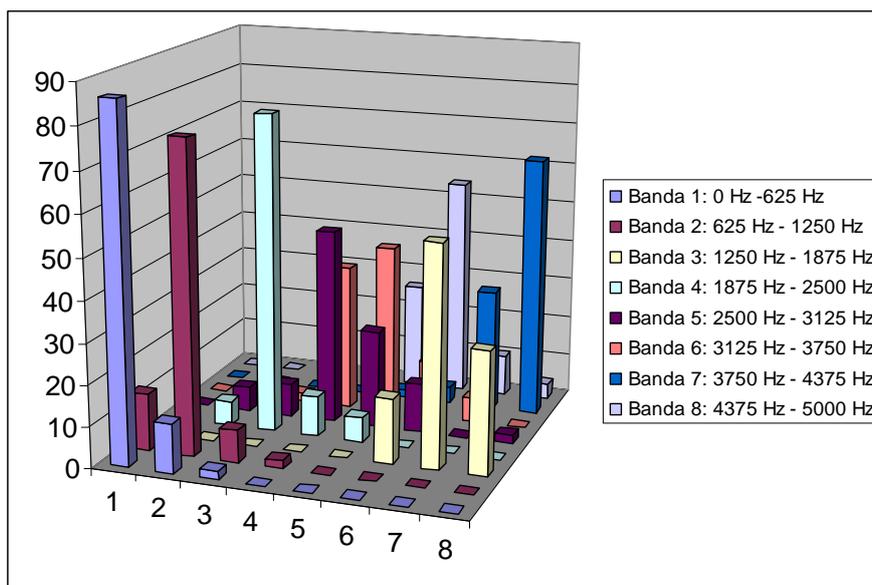


Figura 4.30 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual.

En este rodamiento es necesario comentar que, a diferencia de las condiciones de rodamiento anteriores, existe una posición predominante en cada banda, existiendo muy poca dispersión. Aparte de este comentario, el patrón obtenido aquí es: 1ª, 2ª, 4ª, 5ª, 6ª, 8ª, 3ª, 7ª banda. La Wavelet madre db10 presenta el mismo patrón. Como se ha obtenido un patrón distinto para cada rodamiento, ya se podría elegir esta descomposición para pasar a diseñar el sistema de lógica difusa. Aún así se va a descomponer las señales con un nivel de profundidad más.

#### 4.4.3 DESCOMPOSICIÓN CON NIVEL DE PROFUNDIDAD 4.

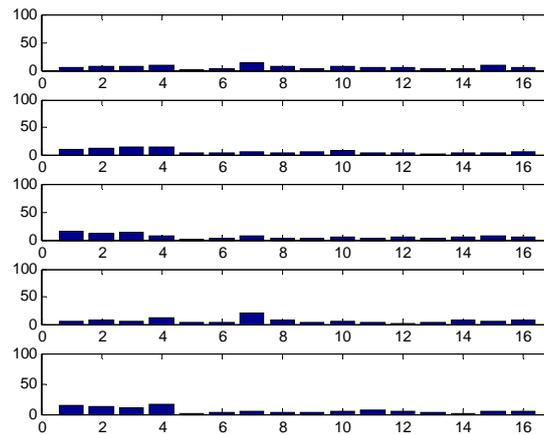


Figura 4.31 Energía de 5 señales descompuestas a nivel 4.

Antes de mostrar el gráfico de medias, se puede ver en la Figura 4.31 que la energía en la señales está demasiado repartida y muchas bandas toman valores muy parecidos dentro de una misma señal. Este fenómeno provocará que al cambiar de una señal a otra se obtenga un patrón distinto. En la Figura 4.32 se muestra el gráfico de medias y los valores de dichas medias en la Tabla 4.19 y se volverá a ver este reparto de energía ya comentado:

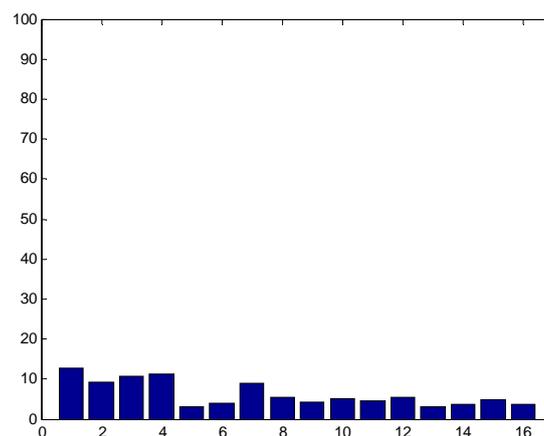


Figura 4.32 Media de energía de las 50 señales.



1	0 Hz – 312.5 Hz	: 12.66%
2	312.5 Hz – 625 Hz	: 9.21%
3	625 Hz – 937.5 Hz	: 10.76%
4	937.5 Hz – 1250 Hz	: 11.35%
5	1250 Hz – 1562.5 Hz	: 3.20%
6	1562.5 Hz – 1875 Hz	: 4.03%
7	1875 Hz – 2187.5 Hz	: 8.97%
8	2187.5 Hz – 2500 Hz	: 5.55%
9	2500 Hz – 2812.5 Hz	: 4.16%
10	2812.5 Hz – 3125 Hz	: 5.05%
11	3125 Hz – 3437.5 Hz	: 4.68%
12	3437.5 Hz – 3750 Hz	: 5.28%
13	3750 Hz – 4062.5 Hz	: 2.94%
14	4062.5 Hz – 4375 Hz	: 3.70%
15	4375 Hz - 4687.5 Hz	: 4.69%
16	4687.5 Hz – 5000 Hz	: 3.78%

Tabla 4.19 Media de energía de las 50 señales.

		N° DE BANDA															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
POSICIÓN	1	22	10	16	28	0	2	12	0	4	2	4	0	0	0	0	0
	2	20	14	20	18	0	0	12	4	0	0	0	8	2	0	2	0
	3	18	16	18	14	2	2	12	4	2	2	0	2	2	0	4	2
	4	14	10	18	10	0	2	14	8	2	10	4	2	0	2	4	0
	5	10	10	14	8	0	0	18	8	0	4	10	8	2	2	4	2
	6	4	14	6	10	4	6	6	16	2	8	2	8	2	2	4	6
	7	0	0	6	4	4	14	8	2	8	16	8	8	0	6	12	4
	8	4	8	2	4	4	4	6	6	6	8	10	18	0	4	16	0
	9	6	6	0	0	10	6	4	8	12	6	4	6	0	18	6	8
	10	2	2	0	0	4	8	2	10	10	14	8	6	4	4	10	16
	11	0	0	0	0	6	6	0	8	6	10	8	6	6	16	14	14
	12	0	2	0	4	10	10	0	10	6	2	14	14	12	4	2	10
	13	0	2	0	0	2	6	6	10	10	6	8	6	12	14	6	12
	14	0	2	0	0	16	12	0	4	16	0	6	4	12	14	2	12
	15	0	2	0	0	16	14	0	2	6	10	4	0	20	10	8	8
	16	0	2	0	0	22	8	0	0	10	2	10	4	26	4	6	6

Tabla 4.20 Matriz porcentual.

El gráfico correspondiente a la matriz porcentual de la Tabla 4.20 no se ha mostrado debido a la gran cantidad de datos que se manejan en esta descomposición que hacen que el gráfico no se visualice de forma clara. Como se aprecia en la Tabla 4.20 la posición de las bandas es muy variable debido a que la energía se reparte entre demasiadas bandas como ya se comentó anteriormente en esta sección. Un ejemplo claro de lo comentado se observa en la misma Tabla 4.20, en la banda 7 resaltado en color. Aunque ocupa las primeras posiciones, todas las posiciones son prácticamente del mismo valor. En la banda contigua, la 8, se observa como al repartirse tanto la energía, el mayor valor de repetición es un 16% pero aparecen valores prácticamente iguales en todas las posiciones. Casos similares se pueden observar en el resto de bandas. Por lo



tanto en este caso sería agrupar esas bandas y volver a la descomposición anterior. El análisis realizado con la Wavelet madre db10 presenta también el mismo problema.

#### 4.4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO WAVELETS MADRE.

Una vez que ya se ha logrado ver que la descomposición adecuada es la de nivel 3, es hora de ver que tipo de Wavelet madre es más idónea para la descomposición. Por un lado se ha utilizado la Wavelet madre Daubechie 6 (db6) y por otro la db10. Como se comentó anteriormente se han utilizado las dos porque algunos autores sostienen que la db10 es mejor que la db6 [7] mientras que otros prefieren argumentar lo contrario [3, 8]. Antes de hacer distinción alguna hay que aclarar que para realizar el análisis, a la vista de los resultados en el apartado anterior, ambas Daubechies valdrían perfectamente ya que con ambas se pueden identificar patrones iguales o prácticamente iguales. Aún así, para elegir la más adecuada de las dos, se utilizará las desviaciones típicas obtenidas en los análisis anteriores del agrupamiento de las 50 señales y por otro lado el gráfico de posición de dicho agrupamiento. El modo de actuar será comparar, por un lado, cuál de las dos Wavelets madre tiene menor desviación típica comparando la desviación típica de cada banda. La desviación típica es un dato que da una idea de cómo se distribuyen los datos en una muestra. Según la regla de Chebyshev [15] por lo menos el 75% de los datos están a menos de dos desviaciones típicas de la media y por lo menos el 88,88% están a menos de 3 desviaciones típicas. Así pues el valor más bajo querrá decir que tiene los datos más agrupados. La fórmula para el cálculo de la desviación utilizada se muestra en la Ecuación 4.1 .

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 4.1

Esta fórmula depende de los valores de los datos obtenidos así como de la media y del número de datos. No se puede pasar por alto que algún dato atípico afecte a este valor por lo que paralelamente se hará un análisis visual utilizando los gráficos de posición. El modo de actuar con estos gráficos será observar para cada banda cuál está más agrupada.

El siguiente análisis también se realiza con los datos reales obtenidos con la velocidad de giro de 30 Hz.

##### 4.4.4.1 Rodamiento con defecto en bola.

En primer lugar se muestran las desviaciones típicas de ambas dbs en la Tabla 4.21.

		DB6	DB10	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA
1	0 Hz – 625 Hz	7.65	6.68	DB10
2	625 Hz – 1250 Hz	6.53	7.15	DB6
3	1250 Hz – 1875 Hz	2.91	3.88	DB6
4	1875 Hz – 2500 Hz	4.77	5.12	DB6
5	2500 Hz – 3125 Hz	3.59	2.77	DB10
6	3125 Hz – 3750 Hz	4.02	4.68	DB6
7	3750 Hz – 4375 Hz	2.44	2.57	DB6
8	4375 Hz – 5000 Hz	3.06	3.20	DB6

Tabla 4.21 Comparación de la desviación típica de db6 y db10.

En principio parece ser que la Daubechie 6 muestra menor desviación típica. Aunque la diferencia es muy poco significativa lo que quiere decir que como ya se expuso anteriormente, podría utilizarse cualquiera de las dos Wavelets madre para hacer el análisis. A continuación se analizan los gráficos correspondientes a las matrices de posición. El correspondiente a la db6 se muestra en el apartado anterior. Corresponde a la Figura 4.21, mientras que el correspondiente a la db10 se muestra en la Figura 4.33 a continuación.

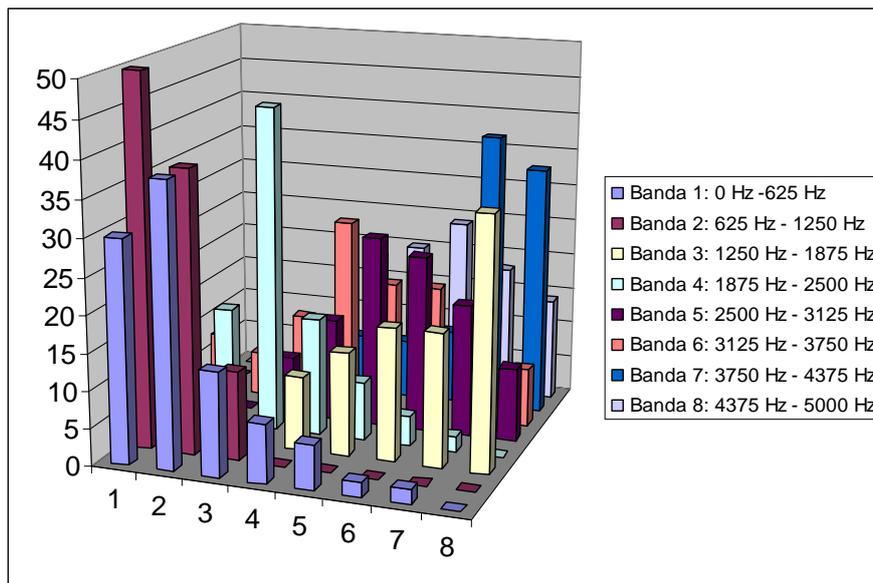


Figura 4.33 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual de las señales del rodamiento con defecto en bola descompuesto con la Daubechie 10

En primer lugar se puede ver como la banda primera para la db6 ocupa menos posiciones que para la db10 por lo tanto es preferible a la db10. En la Tabla 4.22 se muestran los resultados para cada banda y cada Wavelet madre. Para la segunda banda es la db10 la que presenta menor número de bandas ocupadas. La tercera banda presenta en ambas señales prácticamente las mismas bandas ocupadas y aunque parezca que es preferible la db10, se concentra mas energía en ciertas posiciones de la db6 que no se concentra con los mismos valores en la db10, por lo tanto, en esta banda no sería posible determinar una preferencia. Para la cuarta banda es la db10 la más indicada, porque aunque ocupe una banda más, sólo es ocupada con un 2% y se ve claramente como la banda tiende a aparecer con mayor porcentaje en la tercera posición que en la db6. La quinta banda también presenta una mayor concentración en el gráfico db10 ya que presenta menos bandas ocupadas y mayor porcentaje en cada banda. Para la banda



sexta se observa también mayor concentración para las bandas centrales en la db6 aunque en este caso la diferencia es mínima. En el caso de la séptima banda, también se observa mayor concentración en la db6 y sobre todo en la última posición, aspecto que se ve muy bien en el gráfico. Para la octava banda en db6 hay una posición más ocupada pero solamente con un 2% por otro lado en las posiciones con mayor valor están más concentradas en la db6 que en la db10.

	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA	DB MÁS APROPIADA EN GRÁFICA
1	0 Hz – 625 Hz	DB10
2	625 Hz – 1250 Hz	DB6
3	1250 Hz – 1875 Hz	DB6
4	1875 Hz – 2500 Hz	DB6
5	2500 Hz – 3125 Hz	DB10
6	3125 Hz – 3750 Hz	DB6
7	3750 Hz – 4375 Hz	DB6
8	4375 Hz – 5000 Hz	DB6

Tabla 4.22 Comparación entre la menor desviación típica y la menor variabilidad observada.

En la Tabla 4.22 se observa que, algunas bandas presentan menor desviación típica con una db y gráficamente parece ser que tienen menos dispersión con la otra db. La db que más coincide entre un análisis y otro es la db6. Como el método gráfico es muy visual siempre tendrá algo de mas peso el análisis de desviación típica por tanto en este caso será la db6 la Wavelet madre elegida como la más adecuada.

4.4.4.2 Rodamiento con defecto en pista externa.

Ya se ha visto el método de analizar las señales por lo tanto a partir de ahora se presentarán las tablas y gráficas únicamente con los resultados comentados al final.

	DB6	DB10	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA	
1	0 Hz – 625 Hz	7.72	7.74	DB6
2	625 Hz – 1250 Hz	3.38	3.48	DB6
3	1250 Hz – 1875 Hz	4.80	5.02	DB6
4	1875 Hz – 2500 Hz	5.94	6.16	DB6
5	2500 Hz – 3125 Hz	5.83	5.45	DB10
6	3125 Hz – 3750 Hz	2.52	2.63	DB6
7	3750 Hz – 4375 Hz	3.70	2.83	DB10
8	4375 Hz – 5000 Hz	1.95	2.79	DB6

Tabla 4.23 Comparación de la desviación típica entre distintas dbs.

En la Tabla 4.23 se muestra la db que presenta menor desviación típica y a continuación en la Figura 4.34 se muestra el gráfico correspondiente a la db10 mientras que en Figura 4.24 ya se presentó el correspondiente a la db6.

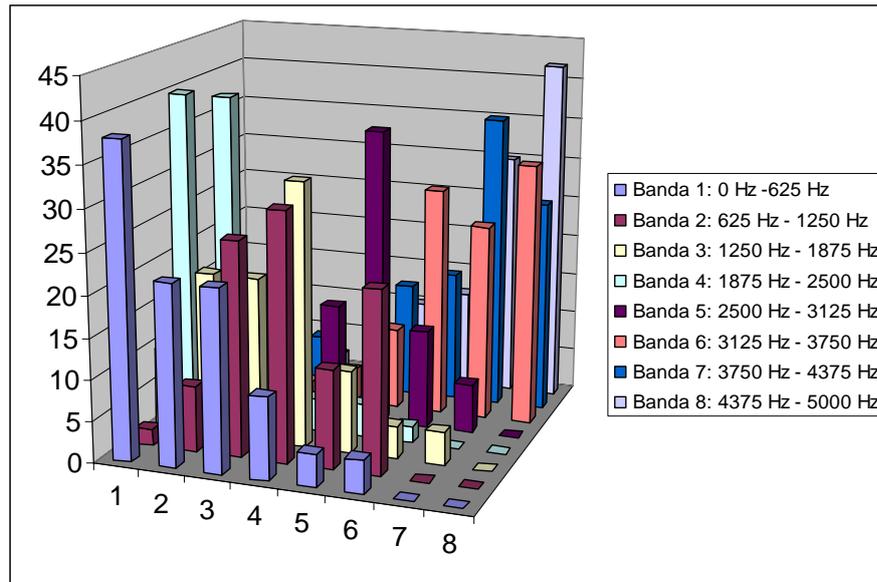


Figura 4.34 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual de las señales del rodamiento con defecto en pista externa descompuesto con la Daubechie 10.

	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA	DB MÁS APROPIADA EN GRÁFICA
1	0 Hz – 625 Hz	DB6
2	625 Hz – 1250 Hz	DB6
3	1250 Hz – 1875 Hz	DB6
4	1875 Hz – 2500 Hz	DB6
5	2500 Hz – 3125 Hz	DB10
6	3125 Hz – 3750 Hz	DB6
7	3750 Hz – 4375 Hz	DB10
8	4375 Hz – 5000 Hz	DB6

Tabla 4.24 Comparación entre la menor desviación típica y la menor variabilidad observada

En este caso no hay duda de que la Wavelet madre más adecuada es preferiblemente la Daubechie 6.

#### 4.4.4.3 Rodamiento con defecto en pista interna.

En la Tabla 4.25 se muestra qué db presenta menor desviación típica en cada banda.

	DB6	DB10	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA
1	11.41	10.30	DB10
2	7.91	7.89	DB10
3	3.60	3.11	DB6
4	3.94	5.31	DB6
5	4.64	3.33	DB6
6	5.92	6.69	DB10
7	1.81	1.75	DB10
8	4.53	4.16	DB10

Tabla 4.25 Comparación de la desviación típica de db6 y db10.

En la Figura 4.27 se muestra el gráfico correspondiente a db6 y en la Figura 4.35 el correspondiente a la db10.

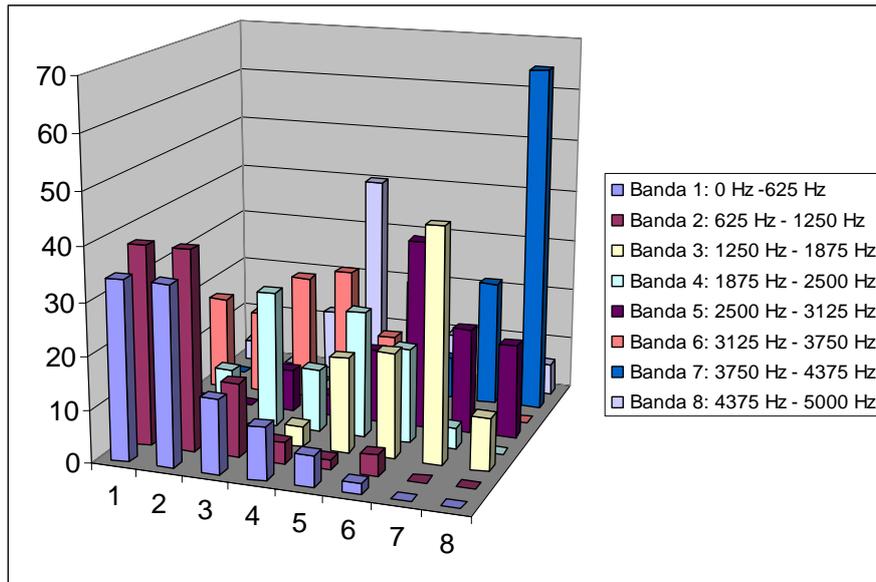


Figura 4.35 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual de las señales del rodamiento con defecto en pista interna descompuesto con la Daubechie10

	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA	DB MÁS APROPIADA EN GRÁFICA
1 0 Hz – 625 Hz	DB10	DB6
2 625 Hz – 1250 Hz	DB10	DB6
3 1250 Hz – 1875 Hz	DB6	DB10
4 1875 Hz – 2500 Hz	DB6	DB6
5 2500 Hz – 3125 Hz	DB6	-
6 3125 Hz – 3750 Hz	DB10	DB6
7 3750 Hz – 4375 Hz	DB10	DB10
8 4375 Hz – 5000 Hz	DB10	DB10

Tabla 4.26 Comparación entre la menor desviación típica y la menor variabilidad observada.

En principio la menor desviación típica se presenta con la Daubechie 10 pero gráficamente sería la db6. Por lo tanto no se podría elegir que db sería mas adecuada en este caso. Si se diera más peso a la desviación típica como se ha dicho anteriormente sería la db10 la más apropiada en este caso.

#### 4.4.4.4 Rodamiento normal.

En la Tabla 4.27 se muestra qué db tiene menor desviación típica para cada banda.

	DB6	DB10	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA
1 0 Hz – 625 Hz	7.68	7.27	DB10
2 625 Hz – 1250 Hz	5.17	5.55	DB6
3 1250 Hz – 1875 Hz	1.06	1.51	DB6
4 1875 Hz – 2500 Hz	3.45	3.95	DB6
5 2500 Hz – 3125 Hz	3.49	3.30	DB10
6 3125 Hz – 3750 Hz	2.41	2.60	DB6
7 3750 Hz – 4375 Hz	1.40	1.09	DB10
8 4375 Hz – 5000 Hz	2.02	2.72	DB6

Tabla 4.27 Comparación de la desviación típica de db6 y db10.

En la Figura 4.30 se mostró el gráfico correspondiente a la db6 y en la Figura 4.36 el correspondiente a la db10.

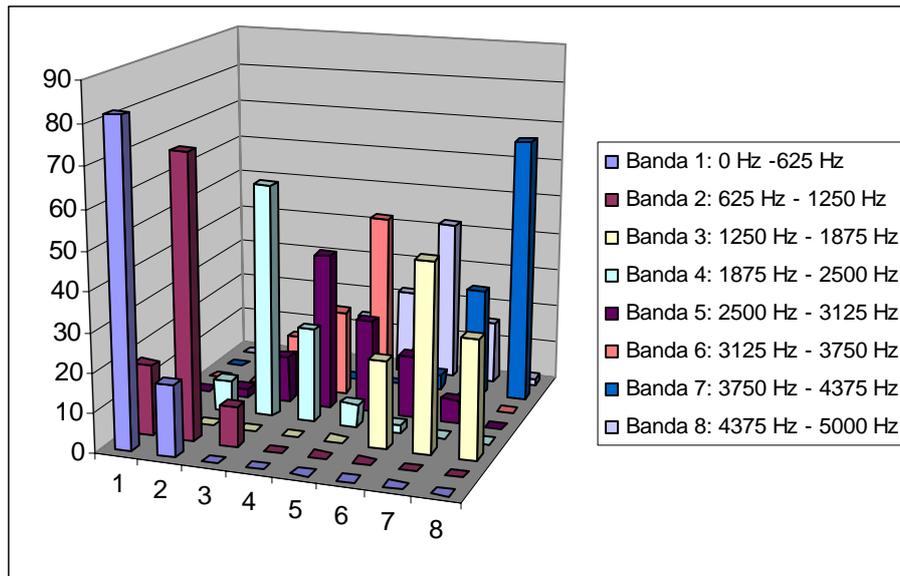


Figura 4.36 Gráfico correspondiente a la matriz porcentual de las señales del rodamiento sin defecto descompuesto con la Daubechie10.

	MENOR DESVIACIÓN TÍPICA	DB MÁS APROPIADA EN GRÁFICA
1	0 Hz – 625 Hz	DB10
2	625 Hz – 1250 Hz	DB10
3	1250 Hz – 1875 Hz	-
4	1875 Hz – 2500 Hz	DB6
5	2500 Hz – 3125 Hz	DB6
6	3125 Hz – 3750 Hz	DB6
7	3750 Hz – 4375 Hz	DB10
8	4375 Hz – 5000 Hz	DB6

Tabla 4.28 Comparación entre la menor desviación típica y la menor variabilidad observada.

En este caso la Wavelet madre más apropiada sería la db6.

En general en el caso de la velocidad de giro de 30 Hz la db más apropiada sería la Daubechie 6. Estos mismos métodos se han aplicado para velocidades de giro distintas, 20 y 10 Hz. Ambas velocidades han mostrado el mismo resultado que el expuesto aquí, es decir que la Wavelet madre db6 parece ser que presenta menos dispersión que la Wavelet db10.

## 4.5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS.

Después de realizar los análisis anteriores, el principal punto a destacar es que la descomposición idónea para un análisis energético es la descomposición con nivel de profundidad 3, ya que ha sido la única que ha proporcionado patrones diferenciados. En cuanto a los otros dos niveles de profundidad utilizadas, la descomposición de nivel 2 ha demostrado ser una descomposición con patrones poco discriminantes ya que al tener solamente 4 bandas de energía los patrones buscados eran muy similares y en el caso del rodamiento sin defecto el patrón obtenido era idéntico al del rodamiento con defecto en bola. En cuanto a la descomposición 4, se vio en el análisis que era una descomposición demasiado profunda con un elevado número de bandas que hacía que se repartiese la energía demasiado haciendo que no fuera posible obtener un patrón



estable para cada tipo de defecto, ya que los valores de las bandas eran muy próximos entre sí. Dentro del mismo tipo de rodamiento por el mismo motivo se podrían dar patrones muy diversos lo que confundiría a un algoritmo clasificador. Por lo tanto la descomposición elegida es la descomposición de profundidad 3 cuyos patrones según la velocidad de giro se encuentran resumidos en la Tabla 4.29. Dichos patrones han sido hallados utilizando la Wavelet madre Daubechie 6 que en el último análisis se vio que presentaba menor dispersión que la Wavelet madre db10.

VELOCIDADES	TIPOS DE DEFECTO EN RODAMIENTOS			
	EN BOLA	EN PISTA EXTERNA	EN PISTA INTERNA	NORMAL
10 Hz	1 5 6 2 4 8 7 3	1 2 5 4 6 3 7 8	1 2 8 4 5 6 3 7	1 2 5 6 8 4 7 3
20 Hz	1 6 5 2 8 4 7 3	1 4 5 3 2 7 6 8	1 2 8 4 6 5 3 7	1 5 2 6 4 8 7 3
30 Hz	2 1 4 6 5 8 3 7	4 1 3 2 5 7 6 8	1 2 6 8 4 5 3 7	1 2 4 5 6 8 3 7

Tabla 4.29 Lista de patrones observados para cada tipo de rodamiento.

En la Tabla 4.29 puede verse como cada rodamiento presenta un patrón distinto con respecto a los demás para cada velocidad. En algunos tipos de rodamientos este patrón es parecido de una velocidad a otra variando en algunos casos debido a que al aumentar la velocidad de giro se amplifica el impacto del defecto en la señal.

Como este análisis está pensando para ser integrado en un posible sistema de mantenimiento preventivo, es muy importante conocer el tiempo que dura ese tratamiento. Como se han agrupado 50 señales para obtener los patrones, el tiempo que se tarda en procesar esas señales será el que determine si es factible este agrupamiento o si sería mejor realizar otro tipo de agrupamiento con menos señales o por el contrario se podrían incluso agrupar más ya que el tiempo de procesado lo permite. En la Tabla 4.30 se muestran los distintos tiempos obtenidos para el tratamiento de cada rodamiento. El programa de tratamiento en este caso ha sido modificado para mostrar solamente la media de las señales ya que es lo que se va a introducir al elemento clasificador.

Nº DE SEÑALES	TIEMPO (s)
1	1.04
5	1.42
10	1.87
20	2.79
30	3.71
40	4.62
50	5.53

Tabla 4.30 Tiempo de procesamiento del PC para analizar cada grupo de señales.

El tiempo que tarda en procesar 50 señales son 5.53 segundos en un ordenador personal con procesador Intel Pentium III de velocidad 1 Gigahertzio y memoria RAM de 256 MB. Los tiempos representados en la Tabla 4.30 sólo recogen la descomposición Wavelet y cálculo de energía ya que la captura de datos se realiza con el programa Test Point™. Dependiendo del tipo de mantenimiento a realizar y de cada cuanto tiempo se realiza, este tiempo será permisible o no teniendo que reducir el número de señales a analizar. También, por otra parte, es posible analizar mas señales para saber cuanto tiempo se tardaría. Se han representado los tiempos obtenidos en la Figura 4.37 y, como se puede observar, se pueden aproximar a una recta. La expresión de la recta de mínimos cuadrados de muestra en la Ecuación 4.2. Con esa fórmula se podría calcular cuánto tiempo llevaría el análisis de un número distinto de señales no presentes en la tabla. Interpretando los términos de la ecuación, el programa tarda unos 92 ms en



procesar 1 señal de 256 datos, longitud elegida al principio de este capítulo, y 0.956 segundos en arrancar el programa y ejecutar órdenes previas.

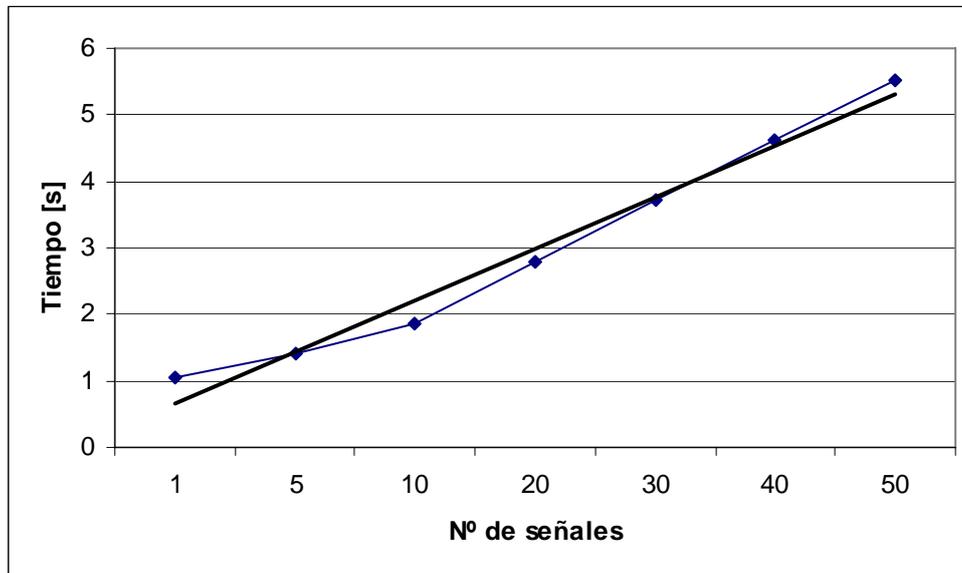


Figura 4.37 Representación gráfica de los tiempos que tarda el PC en analizar el grupo de señales. En azul están representados los tiempos reales y en negro la recta de aproximación.

$$tiempo = 0.092 \cdot (N^{\circ} \text{señales}) + 0.956$$

Ecuación 4.2

Una vez conocidos los tiempos de cálculo que pueden llevar los diferentes análisis, con la descomposición encontrada en la que se ha visto que cada rodamiento presenta un patrón distinto se puede proceder a introducir los valores de las descomposiciones en un sistema clasificador cuya función será la de averiguar qué tipo de condición de rodamiento se tiene, si es de funcionamiento normal o si presenta algunos de los defectos vistos.





# **Capítulo 5**

# **CLASIFICACIÓN CON LÓGICA DIFUSA**



## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollará un programa basado en las leyes de la lógica difusa cuyo marco teórico se desarrolló en el Capítulo 2. El programa tendrá como cometido distinguir entre los distintos tipos de defectos en rodamientos. Como variables de entrada del sistema clasificador se tendrán las bandas de energía obtenidas al hacer una descomposición de nivel de profundidad 3 tal y como ya se desarrolló en el Capítulo anterior. Las variables de salida serán las probabilidades de que el rodamiento pertenezca a cada uno de los cuatro tipos de rodamientos que se han visto hasta ahora: rodamiento con defecto en bola, con defecto en pista externa, con defecto en pista interna y rodamiento sin defecto o normal. El desarrollo del programa paso a paso, desde la definición de variables, las funciones características de los conjuntos difusos, la definición de reglas difusas y el método de agregación lógica y desdifusión es el cuerpo principal de este capítulo, finalizando con la muestra de los resultados que arroja el programa al introducir grupos de señales. Como ya se ha comentado se utilizará, al igual que en el análisis Wavelet Packet, el programa de cálculo Matlab<sup>®</sup>, el cual lleva instalado un asistente de aplicación de lógica difusa. Para activar este asistente basta con ejecutar en Matlab<sup>®</sup> la orden: *fuzzy*.

## 5.2 EDITOR DE SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA (FIS EDITOR).

Al ejecutar la orden *fuzzy* en Matlab<sup>®</sup>, se abrirá el asistente de lógica difusa. Su utilización es bastante sencilla y no es necesario utilizar una programación compleja para describir las reglas y demás procesos. La ventana que aparece corresponde al FIS EDITOR que es desde donde se pueden agregar las variables de salida o entrada. Dicha ventana es similar a la mostrada en la Figura 5.1.

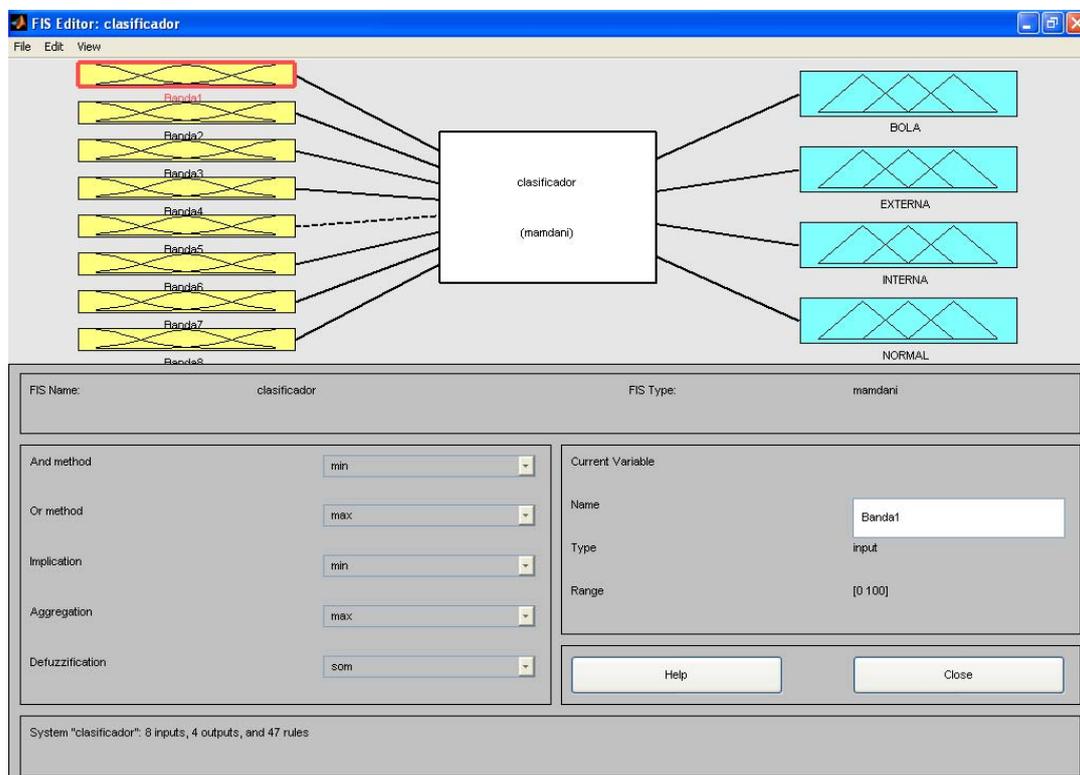


Figura 5.1 FIS EDITOR de Matlab<sup>®</sup>



En la Figura 5.1 se muestra el caso que ocupa este proyecto. Como variables de entrada se muestran las 8 bandas de energía que se calculan desde la señal inicial, y como salida del sistema se tienen cuatro variables que corresponden a cada tipo de rodamiento.

Para introducir una variable nueva basta con desplegar el menú EDIT y seleccionar ADD VARIABLE y seguidamente se selecciona el tipo de variable que se quiera introducir, una variable de entrada (INPUT) o de salida (OUTPUT). En el recuadro NAME de la derecha se puede cambiar el nombre de la variable seleccionada. Debajo de este recuadro el programa nos informa del tipo de variable y el rango sobre el pueden ser introducidos los valores de entrada para dicha variable, este rango se modifica en otros menús que se comentarán más adelante.

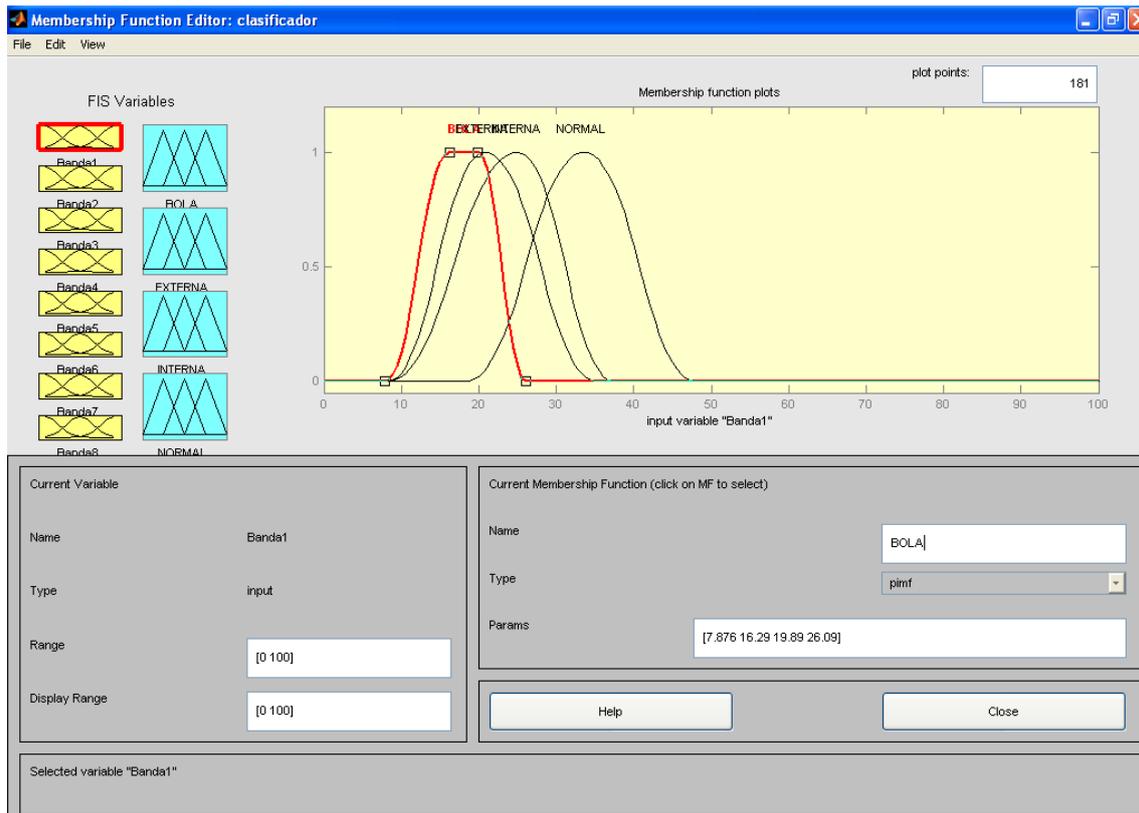
En la parte inferior izquierda de la Figura 5.1, se encuentran una serie de parámetros para el funcionamiento del sistema difuso. La elección del modo de funcionamiento del método de agregación lógica y de desfusión se harán con la experiencia del usuario, es decir, se elegirá haciendo pruebas mientras se escriben las reglas difusas y funciones características.

Todos los parámetros han sido explicados en el Capítulo 2 en la parte de teoría de lógica difusa. El método de desfusión y agregación, aunque se selecciona en este menú, se explicará más adelante cuando se detalle la función característica de las variables de salida.

Para continuar con la programación de este sistema se elegirá en el menú EDIT la opción MEMBERSHIP FUNCTIONS que abrirá una nueva ventana para introducir las funciones características de los conjuntos asociados a las variables [18].

### **5.3 EDITOR DE FUNCIONES CARACTERÍSTICAS (MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR)**

La nueva ventana que se abre en el asistente es del aspecto de la mostrada en la Figura 5.2, aunque en este proyecto se muestra modificada, con las variables que se han introducido, para el sistema que se está desarrollando.



**Figura 5.2 MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR**

En esta nueva ventana se van a introducir las funciones características de los conjuntos difusos presentes en cada variable. Para las variables de entrada se han propuesto los conjuntos difusos: BOLA, EXTERNA, INTERNA Y NORMAL, que representan los cuatro tipos de condición de rodamientos con los que se trabajan. Las variables de salida presentan solamente un conjunto de salida: conjunto BOLA para la variable BOLA, conjunto EXTERNA para la variable EXTERNA y así sucesivamente. Se dedicará un apartado para la explicación de cómo se introducen las funciones en el sistema que se está diseñando.

En el caso general, si se quiere introducir una función, se ha de seleccionar la variable deseada en la zona superior izquierda. Seguidamente en el menú EDIT se elegirá la opción ADD MFs donde se podrá seleccionar el tipo de función y el número de funciones de ese tipo que se desea que aparezcan para esa variable. Una vez creada se debe introducir el rango en el cuadro RANGE para definir en qué intervalo se van a mover los valores de entrada para la función. En el recuadro NAME se elegirá el nombre para esa función y siempre se podrá modificar el tipo de función seleccionado en la lista desplegable del recuadro TYPE. Los parámetros son lo que dan la forma deseada a la función y son las coordenadas de los recuadros blancos que aparecen sobre la gráfica de la función seleccionada que se muestra en rojo como se observa en la Figura 5.2. Para variar la forma de la función bastará con escribir esos parámetros o bien arrastrarlos con el ratón para hacer pasar la función por el punto que se considere [18].



### 5.3.1 CREACIÓN DE FUNCIONES CARACTERÍSTICAS PARA LAS VARIABLES DE ENTRADA.

Para construir las funciones de entrada se utilizarán las tablas de las matrices porcentuales vistas en el capítulo anterior. En la Tabla 5.1 se muestra la correspondiente al rodamiento sin defecto o rodamiento normal.

		N° DE BANDA							
		1	2	3	4	5	6	7	8
POSICIÓN	1	86	14	0	0	0	0	0	0
	2	12	76	0	6	6	0	0	0
	3	2	8	0	78	8	2	0	2
	4	0	2	0	10	48	36	0	4
	5	0	0	0	6	24	42	2	26
	6	0	0	16	0	12	14	4	54
	7	0	0	54	0	0	6	30	10
	8	0	0	30	0	2	0	64	4

Tabla 5.1 Matriz porcentual del rodamiento sin defecto.

Seleccionado, por ejemplo, la banda segunda y representando esos valores en un gráfico, se tiene la curva mostrada en la Figura 5.3.

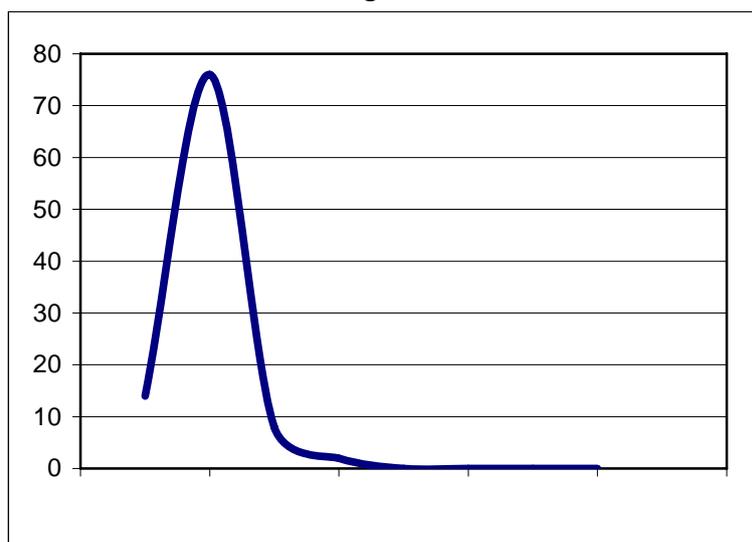


Figura 5.3 Representación de los valores porcentuales de aparición de la banda 2 correspondiente al rodamiento sin defecto

Como se observa en la Figura 5.3, los datos se asemejan bastante a una función gaussiana. Aunque es uno de los tipos de función que maneja el programa, se elegirá la función *trimf* que es también una gaussiana pero más acorde con el sistema que se estudia, ya que permite que las curvas de caída no sean simétricas o que se pueda variar la anchura del vértice dando lugar a vértices más planos. El rango que se va a fijar será de 0 a 100 que son los valores entre los que se mueve la energía de las bandas.

El gráfico de la Figura 5.3, por tanto, está dando una posible función característica para la banda 2. Para escribir este gráfico como función de pertenencia se utilizan los valores de energía obtenidos en el capítulo anterior correspondientes a este tipo del rodamiento (Tabla 5.2).

1	0 Hz – 625 Hz	: 33.72 %
2	625 Hz – 1250 Hz	: 22.10 %
3	1250 Hz – 1875 Hz	: 3.91 %
4	1875 Hz – 2500 Hz	: 13.97 %
5	2500 Hz – 3125 Hz	: 9.37 %
6	3125 Hz – 3750 Hz	: 7.69 %
7	3750 Hz – 4375 Hz	: 3.38 %
8	4375 Hz – 5000 Hz	: 5.86 %

Tabla 5.2 Valores de energía para el rodamiento con defecto en bola.

El valor del vértice superior se va a situar por tanto en el valor 22.10% del eje inferior de la Figura 5.4, correspondiente al asistente de Matlab<sup>®</sup>, para calcular por donde pasan las curvas de caída hay que fijarse en la Tabla 5.1 y ver que un 14% de las veces está en la primera posición que en la Tabla 5.2 tiene de valor un 33.72%. Si el valor 22.10% corresponde, al ser el máximo valor, al valor 1 en el eje vertical de la Figura 5.4 se aplica una sencilla regla de tres para calcular el valor del eje vertical por donde pasará la gráfica en el punto 33.72%: si el 76% corresponde al valor 1, el valor 14% corresponde al valor 0.18. Por lo tanto la gráfica pasara por el punto (33.72%-0.18). Ya se tendría por tanto una curva de caída de la función, para calcular la otra curva se repite la operación con los valores correspondientes.

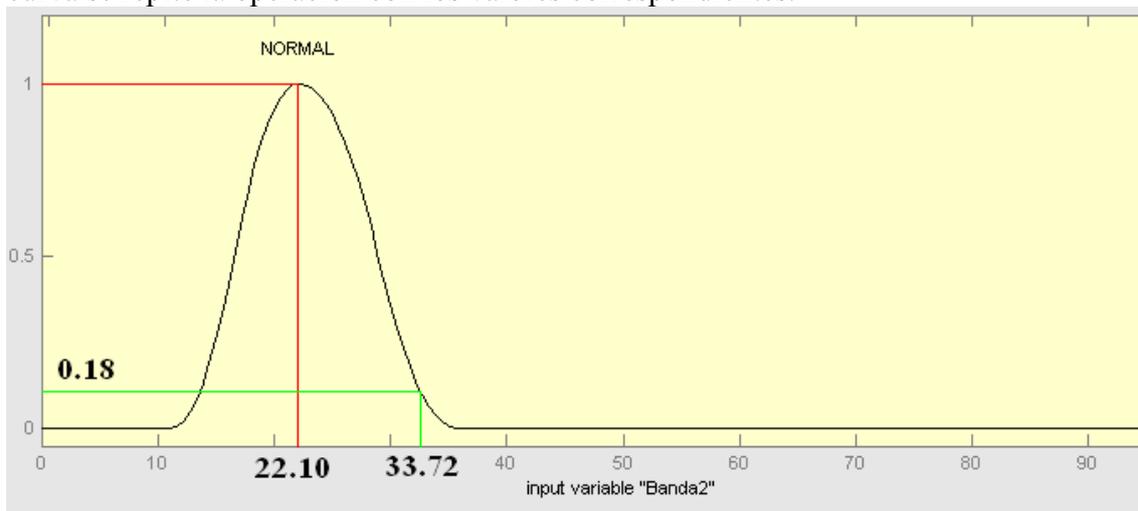


Figura 5.4 Construyendo una función de pertenencia

Esta operación se repetirá para cada banda, es decir para cada variable, cuatro veces, correspondientes a los cuatro tipos de rodamiento. Por lo tanto cada variable tendrá cuatro funciones características. Cuando una banda ocupa la primera posición, no

se podrá calcular la curva que cae hacia la derecha, por lo que se ha optado en hacer esa curva simétrica respecto a la vertical. Otra salvedad son las bandas que ocupan la última posición. En este caso falta la parte izquierda de la curva por lo que se ha optado por alargar el vértice desde el valor que ocupe hasta que pase muy cerca del punto (0 – 1). Un ejemplo de esto último se ve en la variable correspondiente a la banda 1 que se representa en la Figura 5.5 donde se aprecian todas sus funciones características representadas en distintos colores para hacer su visualización más fácil. .

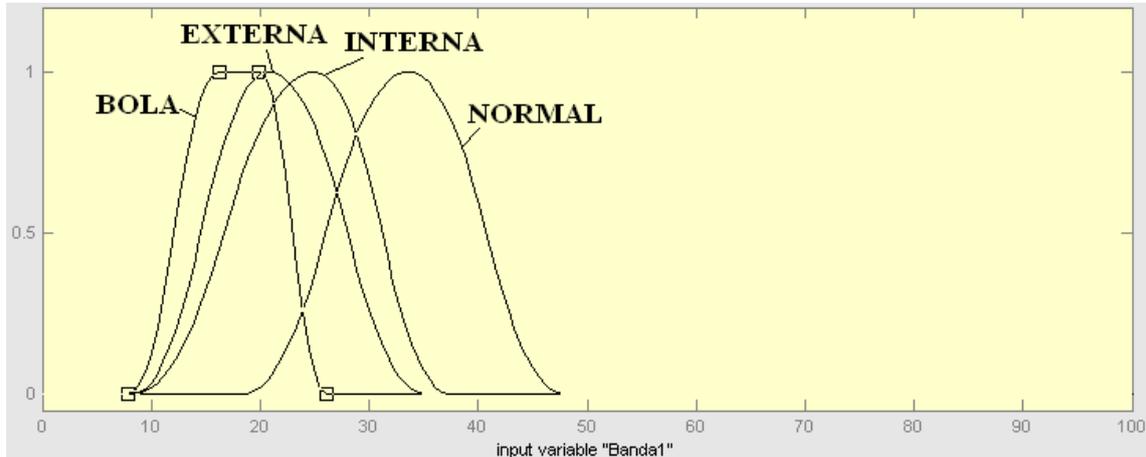


Figura 5.5 Variable con todas sus funciones características

En el Anexo V se muestran todas las funciones de cada una de las variables de entrada.

### 5.3.2 FUNCIONES DE LAS VARIABLES DE SALIDA. AGREGACIÓN LÓGICA Y DESDIFUSIÓN.

Las cuatro variables de salida, que representan cada uno de los defectos estudiados, tienen solamente asociada una función característica que representa la condición del rodamiento correspondiente. Todas tienen la misma forma que es la que se muestra en la Figura 5.6 en la que se ve la función asociada a la variable de salida BOLA.

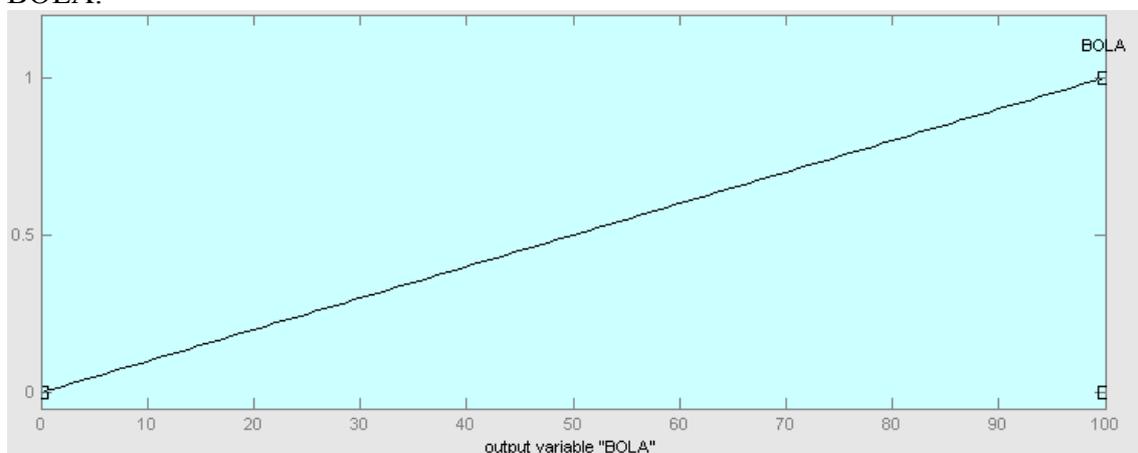


Figura 5.6 Función característica de la variable BOLA.

El rango de todas las salidas comprenderá de 0 a 100 debido a que la salida es la probabilidad de pertenencia a un rodamiento (en %). Se ha elegido esta forma de función ya que si, por ejemplo, se entra a la gráfica de la Figura 5.6 con un valor 1 en el eje Y, se tendrá un 100% de probabilidad de que el rodamiento presente defecto en bola, si se entra con un valor de 0.5 será, entonces, el 50% de probabilidad. La forma de programar esta función en el asistente es eligiendo la función tipo *trimf* creando una función con forma de triángulo que se modificará convenientemente.

Como ya se comentó la forma de la gráfica determina el modo de agregación y desdifusión.

Aunque aún no se han visto las reglas difusas de este sistema, se expone en la Figura 5.7 varias salidas de 3 reglas diferentes.

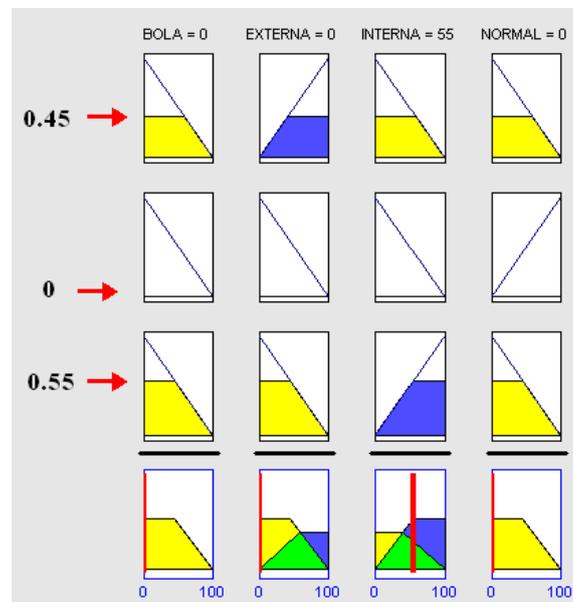


Figura 5.7 Salidas de varias reglas y agregación y desdifusión del sistema.

Para comprender bien a qué se refieren los distintos colores de la Figura 5.7, fijándose en la salida de la primera regla esta quiere decir NO BOLA, EXTERNA, NO INTERNA, NO NORMAL. La segunda, aunque no está marcada lo que quiere decir que la salida es 0, significaría: NO BOLA, NO EXTERNA, NO INTERNA, NO NORMAL. La última regla quiere decir: NO BOLA, NO EXTERNA, INTERNA, NO NORMAL.

La forma de trabajar del método de agregación escogido es escoger el máximo de las salidas negativas y el máximo de las salidas positivas. El método de desdifusión consiste, en comparar ambos máximos. Si el máximo de las salidas negativas es mayor que el de las positivas la salida final será 0. Por el contrario si el máximo de las salidas positivas es el mayor, la salida final será el valor que le corresponde a este máximo en el eje horizontal.

Una vez más y para cerrar este apartado, recalcar que estos métodos han sido obtenidos mediante método de prueba y error, y que es posible que se pudieran obtener

otro tipo de métodos de agregación y desdifusión que también den resultados aceptables.

## 5.4 EDITOR DE REGLAS DIFUSAS (RULE EDITOR)

Una vez que se tengan definidos todas las funciones características de todas las variables tanto de entrada como de salida, es momento de crear las reglas para relacionar unas con otras. Para ello basta con elegir en el menú EDIT la opción RULES que abrirá la ventana que se muestra en la Figura 5.8.

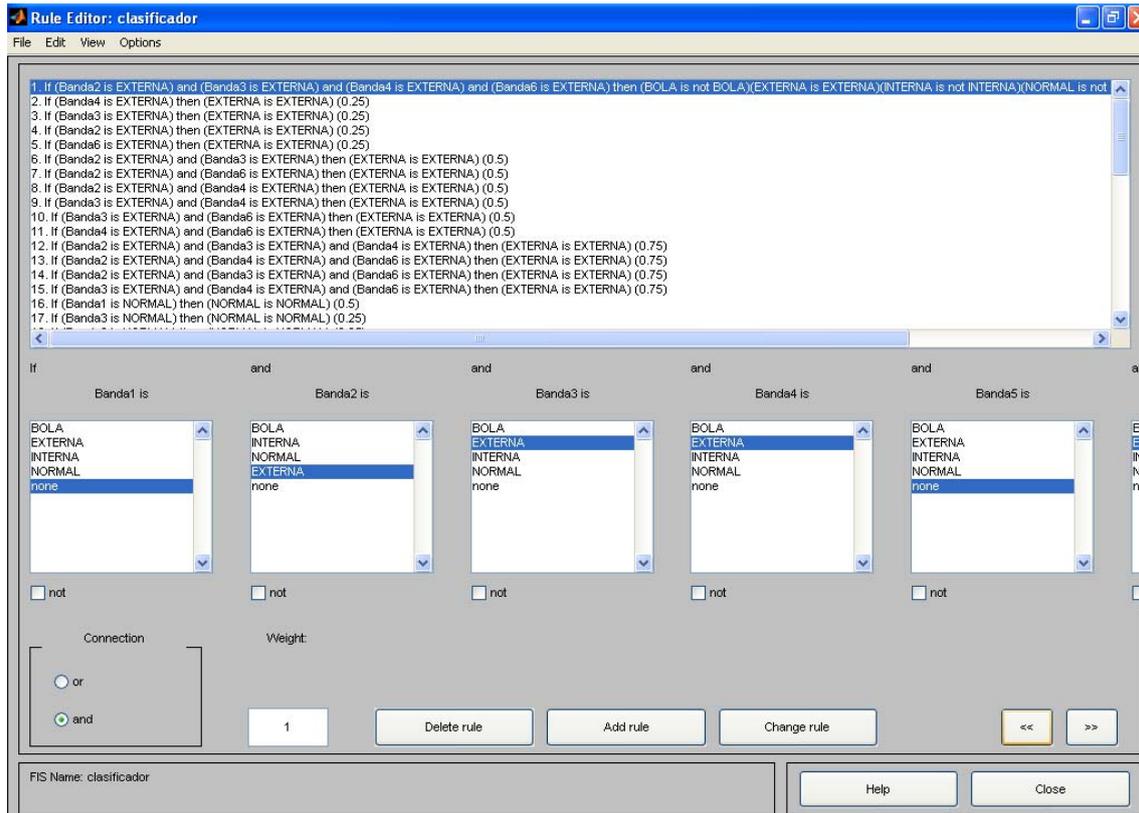


Figura 5.8 RULES EDITOR

Al igual que en los anteriores editores comentados, en la Figura 5.8 se muestra el editor con las variables características de este problema y con algunas de las reglas difusas que se han considerado.

Es bastante sencillo introducir una regla en el asistente. Para las variables que se desean incluir en la regla se selecciona la función característica que se considere. En la zona inferior izquierda se elige el tipo de operador lógico que va a unir las variables de la regla. Al final de todas las variables aparecerán las variables de salida (se utilizan las flechas para mover las variables) en las que también se elegirán los conjuntos a los que se refiera la regla. En este proyecto, cada variable de salida solamente tiene un conjunto definido. Se puede poner el conjunto complementario de cada función que se considere marcando el recuadro NOT. Un último detalle importante es el peso de la regla, que en la Figura 5.8 se introduce en el recuadro blanco WEIGHT. En este caso aparece un 1. El peso es una forma de decir al programa que unas reglas son más importantes que otras y dar un valor numérico a esa importancia. El valor obtenido de cada regla será

multiplicado por su peso correspondiente. Las reglas aparecerán en el recuadro superior según se vayan añadiendo utilizando el botón ADD RULE. Junto a este botón aparecen otros para modificar la regla seleccionada o para borrarla [18].

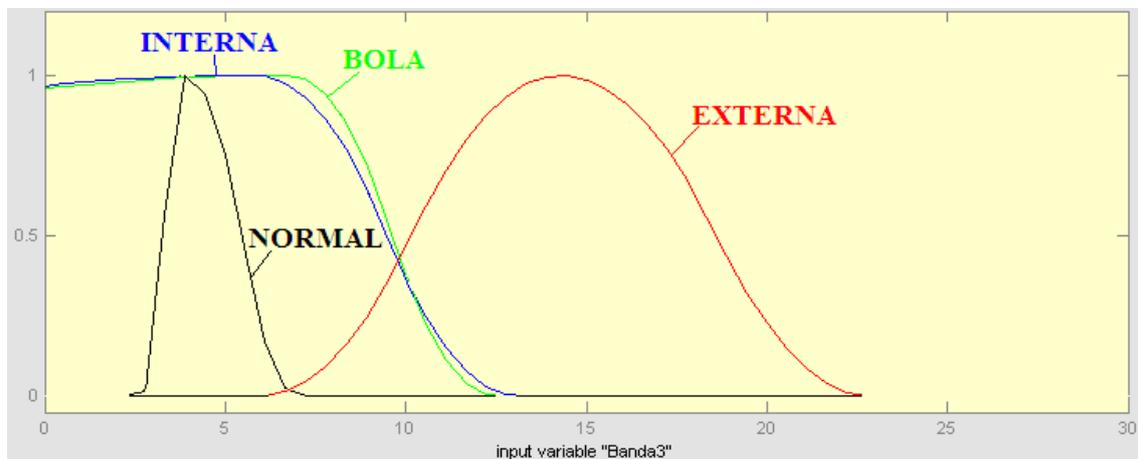
Una vez conocido el modo de funcionamiento de este editor, se va a proceder a explicar la forma en que se han introducido las reglas para definir el sistema clasificador correspondiente a este proyecto.

#### 5.4.1 REGLAS DIFUSAS BÁSICAS.

Se ha llamado en este proyecto reglas difusas básicas a aquellas que tienen en los antecedentes únicamente una variable de entrada y que se combinarán con otras reglas básicas para formar reglas más complicadas.

La forma de construir estas reglas es, en primer lugar, eligiendo las bandas que van a caracterizar un rodamiento. Debido a la variabilidad existente en las bandas de energía que ya se vio en el capítulo anterior, a medida que se incluyen más bandas en una regla es más complicado que se cumpla. Por este motivo se ha decidido que únicamente serán cuatro bandas las que identifiquen cada rodamiento.

En la Figura 5.9 se muestra la variable correspondiente a la tercera banda. Se puede ver como la función asociada al conjunto difuso *rodamiento con fallo en pista externa* está bastante separada de las demás. Luego esta banda será una de las bandas características para definir este rodamiento.



**Figura 5.9** Variable de entrada Banda 3. Se ha representado cada función de un color para facilitar su interpretación

Por lo tanto la regla básica que se obtendría en este caso sería:

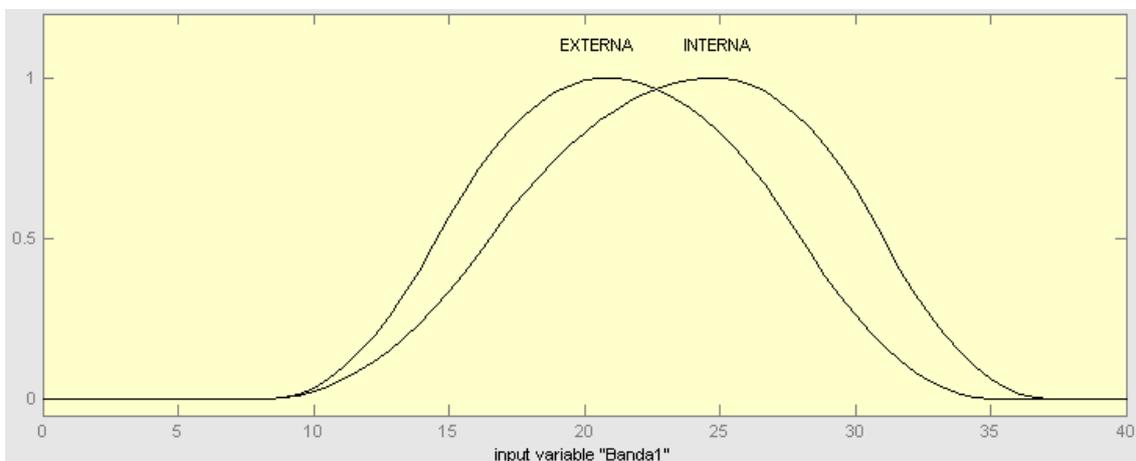
SI (Banda 3 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)

Como una sola banda no puede definir la condición de rodamiento por completo, el peso de una regla básica individual será 0.25, si combinamos dos será 0.5, tres 0.75 y en el caso de cumplirse las cuatro variables será 1. En el caso de cumplirse esta regla al 100% se tendrá una probabilidad del 100% de que es el rodamiento al que se refiere la

regla y por tanto también en los consecuentes se han incluido la negación de los otros tres tipos de rodamiento.

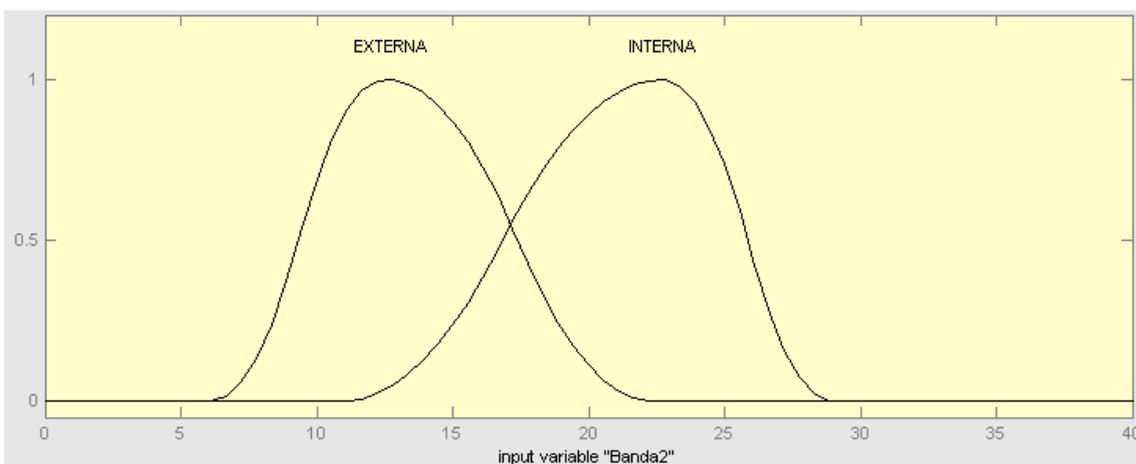
#### 5.4.2 REGLAS DIFUSAS PARTICULARES.

El método anterior para la construcción de las reglas del sistema es válido siempre que se encuentren cuatro bandas características que definan un rodamiento. Sin embargo en ciertos rodamientos no suelen darse, es decir, se superponen funciones de pertenencia. En este caso para construir la regla se añade otro antecedente que sea una variable entrada (una banda) donde las funciones que antes coincidían no se solapen y en ese antecedente se niega una de las dos funciones. Para ilustrar esto se presenta la Figura 5.10 en la que se observa que las funciones INTERNA y EXTERNA de la variable de entrada Banda 1.



**Figura 5.10 Funciones EXTERNA e INTERNA de la variable Banda 1**

En la Figura 5.11 se muestra la variable Banda 2 donde se ven que están más separadas.



**Figura 5.11 Funciones EXTERNA e INTERNA de la variable Banda 2**

La regla por lo tanto quedaría de la forma siguiente:



SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA).

Otro caso particular es la regla básica en la que se identifica que la variable Banda 1 es NORMAL que en vez de darle un peso de 0.25 se le ha dado un peso de 0.5 debido a que es una banda que define bastante bien este tipo de rodamiento.

Por último las reglas difusas correspondientes al rodamiento con defecto en BOLA han sido calculadas mediante métodos de prueba y error ya que este rodamiento presenta una función en cada banda que siempre coincide con alguna otra función correspondiente a otra condición de rodamiento.

El listado completo de todas las reglas, que han sido introducidas en el editor de Matlab<sup>®</sup>, se encuentran en el Anexo VI.

## 5.5 RESULTADOS

Una vez definido todo el sistema de clasificación de lógica difusa, para poder introducir una señal en él se ha de ejecutar el programa desarrollado con la orden:

```
A = readfis('nombre del programa creado en lógica difusa');  
evalfis('nombre de los valores a analizar', A);
```

Esta orden devuelve el análisis de las variables introducidas que serán el valor de las 8 bandas de energía calculadas mediante la energía de los paquetes del análisis Wavelet Packet. Por otra parte las señales recogidas tenían unos tamaños de 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 y 50000, por lo tanto la forma de actuar será dividir cada señal recogida en señales de 256 datos de longitud, que es la longitud que se eligió para el funcionamiento del análisis Wavelet Packet. Seguidamente se calculará la energía de cada señal de 256 datos y se hará la media de todo el conjunto que previamente constituía cada señal original recogida. Esta media será la entrada al método de lógica difusa programado. Todo este proceso comentado será recogido por un programa realizado en Matlab<sup>®</sup> cuya salida será la probabilidad de que la señal tratada pertenezca a un tipo de defecto o a varios.

Los resultados del análisis de cada señal recogida se muestran en el ANEXO VII. Como se ha diseñado el programa utilizando las descomposiciones de las señales obtenidas a 30 Hz, el programa muestra mejores resultados para esta velocidad.

Para estudiar la tasa de acierto de este método basado en lógica difusa, se analizan 100 señales de longitud 5000 datos cada una para cada tipo de rodamiento a velocidad de 30 Hz. El programa para realizar la descomposición Wavelet Packet utilizaba señales de longitud 256 datos. Por lo tanto, por cada señal de 5000 datos al programa se le introducen 19 señales de 256 datos ( $5000/256 = 19,53$ , sólo se tienen en cuenta señales enteras), y para clasificar el tipo de defecto trabaja con la media de energía de todo el grupo. Las tablas de resultados se muestran en el ANEXO VII. El porcentaje de acierto de cada rodamiento se muestra en la Tabla 5.3.



TIPOS DE DEFECTO EN RODAMIENTOS			
<i>EN BOLA</i>	<i>EN PISTA EXTERNA</i>	<i>EN PISTA INTERNA</i>	<i>NORMAL</i>
93%	100%	75%	100%

**Tabla 5.3 Tasa de aciertos del sistema de lógica difusa para rodamientos a velocidad de 30 Hz.**

En el caso de velocidades inferiores, 20 Hz y 10 Hz, aunque el programa no distingue con claridad el tipo de defecto, se va a proceder a estudiar si el programa es capaz de, al menos, detectar si el rodamiento presenta defecto aunque no sepa identificarlo. El procedimiento será el mismo que a la velocidad de 30 Hz, se tendrán 100 señales por tipo de defecto de longitud 5000 datos. En este caso, sin embargo, el porcentaje de acierto se refiere a si el programa ha detectado que hay defecto aunque no coincida con el tipo de defecto presentado. Es decir, fijándose en la fila de la velocidad 10 Hz y la columna defecto en bola de la Tabla 5.4, el programa es capaz un 91 % de las veces de acertar en que el rodamiento presenta defecto, aunque no sepa identificar que se trata de un defecto en bola.

VELOCIDADES	TIPOS DE DEFECTO EN RODAMIENTOS			
	<i>EN BOLA</i>	<i>EN PISTA EXTERNA</i>	<i>EN PISTA INTERNA</i>	<i>NORMAL</i>
<b>10 Hz</b>	91%	87%	92%	93%
<b>20 Hz</b>	100%	99%	94%	75%

**Tabla 5.4 Tasa de aciertos del sistema de lógica difusa para rodamientos a velocidades 20 Hz y 10 Hz. Porcentaje basado en la detección de DEFECTO o NO DEFECTO.**

Para la velocidad de 30 Hz se han tenido unos resultados bastante altos con la excepción del rodamiento con defecto en pista INTERNA. Si se observan las tablas del ANEXO VII, se comprueba que lo que ocurre con esta condición es que se confunde con la condición de defecto en bola. Por lo tanto, aunque el programa no detecte con tanta probabilidad este tipo de defecto, si que es capaz de clasificar el rodamiento como defectuoso. Por otra parte para las velocidades inferiores, el programa no clasifica correctamente los tipos de rodamiento ya que como se advirtió, el sistema está programado para la velocidad de 30 Hz donde los defectos presentan mayor repercusión. Aún así, si que es capaz de averiguar que los rodamientos presentan defecto o no lo presentan con bastante precisión.

Aparte de las probabilidades de pertenencia a un determinado tipo de defecto, en el ANEXO VII también se muestra el tiempo que tarda el programa en realizar cada análisis. La media de todos los tiempos para cada longitud de señal recogida se muestra en la Tabla 5.5.

LONGITUD DE SEÑAL	TIEMPO (s)
256	0.53
5000	2.52
10000	4.52
15000	6.37
20000	8.40
25000	10.30
50000	20.23

**Tabla 5.5 Tiempo de tratamiento de cada longitud de señal recogida.**



Con los tiempos mostrados en la Tabla 5.5, se puede construir una recta por mínimos cuadrados que informe al usuario de lo que tarda el programa en tratar cualquier longitud de señal (Figura 5.12). La recta, que se muestra en la Ecuación 5.1, es de gran utilidad para el usuario porque puede establecer una longitud de señal a recoger en el ensayo cuyos resultados en el programa sean considerados aceptables. Analizando los términos de la recta se puede deducir que el programa tarda 0.39 ms en analizar un dato, aunque la señal mínima posible a introducir es de 256 datos, Por otra parte, el programa tarda 0.49463 segundos en operaciones previas como la descomposición Wavelet, el cálculo de la energía y la ejecución del programa de lógica difusa

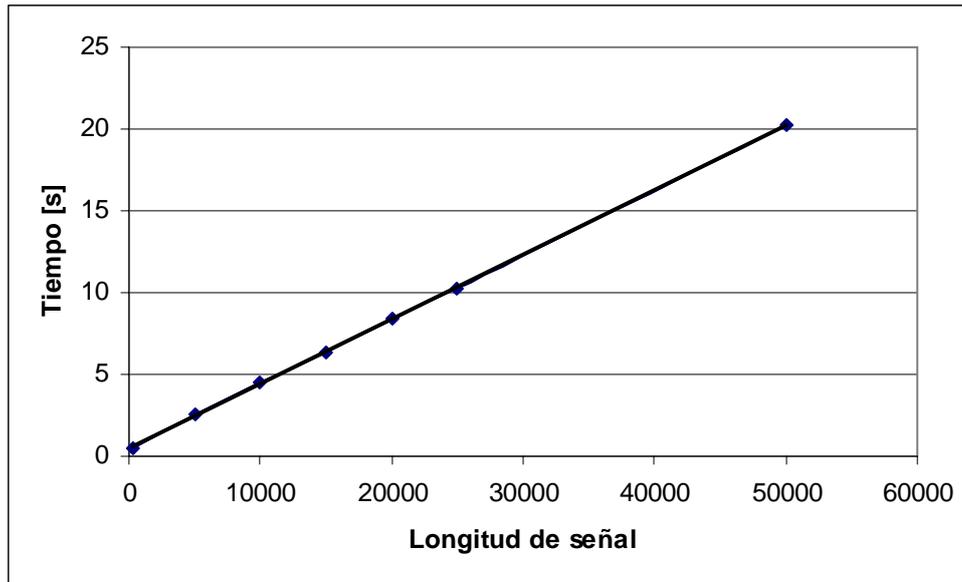


Figura 5.12 Representación del tiempo tratamiento frente a longitud de señal

$$tiempo = 0.00039 \cdot (longitudseñal) + 0.49463$$

Ecuación 5.1





**Capítulo 6**

**CONCLUSIONES Y FUTUROS  
DESARROLLOS**





## 6.1 CONCLUSIONES

En primer lugar se van a recordar los objetivos propuestos y que fueron enumerados en la Introducción de este proyecto. El principal objetivo era desarrollar un método de diagnóstico de defectos en rodamientos basado en el análisis de la energía de las descomposiciones Wavelet Packet y en la clasificación de los resultados de estas descomposiciones mediante lógica difusa. Todos los programas necesarios para esta diagnosis han sido realizados, como se anunció en la Introducción, mediante programación en Matlab<sup>®</sup>. Como objetivo secundario de este proyecto se ha tratado de diferenciar qué tipo de Wavelet madre era más idónea para el análisis si la Daubechie 6 o la Daubechie 10.

El principal objetivo del proyecto, la construcción de un sistema de diagnóstico de fallo, ha sido conseguido con éxito. La primera parte de este sistema, el análisis de la energía de las descomposiciones Wavelet Packet, condujo a la conclusión de que la descomposición más idónea era la realizada a nivel 3. Se desechó la descomposición a nivel 2 debido a que los patrones de energía se repetían en varias condiciones de rodamientos con lo que el sistema de clasificación de lógica difusa no habría podido diferenciar ambos rodamientos. Por otra parte una descomposición superior significaba un mayor número de bandas lo que hacía que se tuviera que repartir demasiado la energía de la señal y no se tuviera un patrón claro. Cuando se seleccionó el grado de descomposición también se abordó la comparación entre distintas Wavelets madre. Los resultados obtenidos indican que la Wavelet madre Daubechie 6 presentaba menos variabilidad en las descomposiciones, es decir que con esta Wavelet madre aumentaba la probabilidad de tener los mismos resultados de una señal a otra. Aunque hay que señalar que las diferencias entre ambas Daubechies fueron mínimas así que no habría ningún problema en realizar el sistema de clasificación de lógica difusa utilizando la Daubechie 10.

Para la descomposición Wavelet Packet de grado de profundidad 3, como ya se ha comentado en el párrafo anterior, todos los patrones entre los distintos rodamientos son distintos. Además, también hay que señalar que los patrones entre los mismos rodamientos pero a distintas velocidades son distintos también. Esto es debido a que a mayores velocidades los defectos tienen mayor repercusión en la señal. Por lo tanto el sistema de detección de fallos en lógica difusa se realizó utilizando los resultados obtenidos para la mayor velocidad: 30 Hz.

La segunda parte del sistema de detección, es decir el programa realizado mediante lógica difusa, se basó en los resultados de variabilidad de cada banda para construir las funciones características de las variables de entrada. Esta variabilidad fue obtenida durante las descomposiciones Wavelet Packet y simplemente informaban del número de veces que una banda aparecía en una posición determinada cuando se ordenaban las bandas de mayor a menor. Se creó un sistema de reglas para el funcionamiento del programa, así como un sistema de agregación lógica y desdifusión para obtener una salida final. La tasa de acierto mostrada por el programa fue superior al 90% en el defecto en bola, y del 100 % cuando el rodamiento no presentaba defecto o lo presentaba en la pista externa. Para el defecto en pista la tasa de fallo era del 75%. Esta caída de la tasa de acierto para esta condición de rodamiento se debía a que el programa



confundía este defecto con el defecto en bola. A pesar de esta confusión, el programa detectaba que el rodamiento presentaba defecto y no lo clasificaba en ningún momento como un rodamiento normal.

También se estudio para las velocidades de 20 Hz y 10 Hz y aunque no era capaz de identificar correctamente que tipo de defecto presentaba el rodamiento, si que conseguía diferenciar entre rodamientos con o sin defecto con una tasa de acierto bastante alta.

Los resultados obtenidos, para las tres velocidades, son bastante exitosos, por lo que el objetivo principal del proyecto de construir un sistema de detección de fallos se considera cumplido. La detección de fallos en rodamientos es un sistema predictivo de mantenimiento por lo que en su aplicación en la industria es importante saber el tiempo necesario para realizar estos análisis. Para saber el tiempo necesario a la hora de buscar un patrón de energía, se dedujo una ecuación cuyos términos mostraban que el ordenador tardaba 92 ms en procesar una señal, y 0.956 en realizar cálculos previos. De igual manera, para conocer cuanto tiempo tarda el sistema de lógica difusa en clasificar que tipo de defecto presenta la señal introducida, se dedujo una ecuación cuyos términos indicaban que el programa tardaba 0.00039 segundos en procesar un dato, y 0.49463 segundos en tareas previas.

## 6.2 FUTUROS DESARROLLOS.

Una vía de desarrollo en futuros estudios será el intento de diferenciación de los rodamientos de defecto en bola y defecto en pista interna. Para ello habría que crear una nueva composición de reglas difusas. Asociado a esta investigación existe la posibilidad de crear nuevos sistemas difusos que sean capaces de funcionar de forma óptima a velocidades de rotación distintas a las expuestas en este proyecto. Esto abre una nueva vía de investigación bastante interesante que sería estudiar el modo en que varía la energía de los rodamientos con defecto según se aumenta o disminuye la velocidad de giro. Con este estudio se podría diseñar un sistema que fuera capaz de clasificar rodamientos independientemente de la velocidad a la que estén girando.

Como este sistema desarrollado es un sistema de mantenimiento, otra línea de investigación sería la implantación en fábrica. Para ello se podría perfeccionar el sistema creado de adquisición y análisis de tal forma que fuera totalmente autónomo o bien diseñar uno que fuera autónomo y funcionara directamente desde el entorno de Matlab<sup>®</sup> pasando la adquisición de datos al entorno de este programa. Además, en este proyecto se han estudiado rodamientos pero podría ampliarse los estudios a otro tipo de elementos que presenten vibraciones como ejes, ruedas dentadas o cualquier elemento presente en maquinaria.



# **BIBLIOGRAFÍA**



**BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] BURRUS, C. SIDNEY; GOPINATH, RAMESH A.; GUO, HAITAO. Introduction to Wavelets and Wavelets Transforms. Prentice Hall. 1998
- [2] CAPITAL EQUIPMENT CORPORATION. TestPoint for Windows. 1994.
- [3] CASTEJON, CRISTINA; GARCIA-PRADA JUAN C. LARA, OMAR J. Bearing Fault Diagnosis Classification Based on Artificial Intelligence Methods Using Wavelet Transform. 7<sup>th</sup> IFToMM-Conference on Rotor Dynamics, Vienna, Austria, 25-28 September 2006.
- [4] CASTEJON, CRISTINA; GARCIA-PRADA JUAN C. LARA, OMAR J. Bearing Fault Diagnosis based on Neural Network Classification and Wavelet Transform. Proceeding of the 6<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Wavelet Analysis & Multirate Systems, Bucharest, Romania, October 16-18, 2006.
- [5] CASTEJON, CRISTINA; GARCIA-PRADA JUAN C. LARA, OMAR J. Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction. 12<sup>th</sup> IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21, 2007.
- [6] CHE, GUOQING. Fuzzy logic in data modelling: semantics, constraints, and database desing. Kluwer Academic. 1998
- [7] HU, QUIAO; HE, ZHENGJIA; ZHANG, ZHOUSUO; ZI, YANYANG. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved Wavelet Packaged transform and SVMs ensemble. Mechanical Systems and Signal Processing, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com). Available online 15 March 2006.
- [8] LARA CASTRO, OMAR JOSE. Nuevas Metodologías no Invasivas de Diagnosis de Defectos Incipientes en Rodamientos de Bola. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [9] MISITI, MICHEL; MISITI, YVES; OPPENHEIM, GEORGES; POGGI, JEAN-MICHEL. Wavelet Toolbox User's Guide with Matlab (Volumenes 1 y 2). The MathWorks Inc. Estados Unidos, 2004.
- [10] MIX, DWIGHT F.; OLEJNICZAK, KRAIG J. Elements of Wavelets for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, Inc. 2003
- [11] MOLER, CLEVE. Numerical Computing with MATLAB. Siam. 2004
- [12] MUKAIDONO, MASAO. Fuzzy logic for beginners. World Scientific. 2001.
- [13] OPPENHEIM, ALAN V.; WILLSKY, ALAN S.; NAWAB, S. HAMID. Señales y sistemas (Segunda edición). Prentice Hall. 1998



- [14] PASAMONTES GARCÍA, MARIO. La transformada Wavelet en el análisis de señales. Aplicación a vibraciones en sistemas rotativos. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2005
- [15] PEÑA, DANIEL. Fundamentos de Estadística. Alianza Universidad. 2001
- [16] SPECTRA QUEST, INC. Applied Vibration Analysis Training Manual. 2003.
- [17] SPECTRA QUEST, INC. User Operating Manual for Machinery Fault Simulator. 2003
- [18] THE MARHWORKS INC. Fuzzy Logic Toolbox 2 User's Guide. 2009.



# **ANEXOS**





## ANEXO I: GUIA DE SEGURIDAD DE LA MÁQUINA.

Condiciones de seguridad para el correcto funcionamiento de la máquina:

1. No someter a la máquina a vibraciones excesivas durante un largo periodo de tiempo
2. Evitar superar el 20% de la velocidad crítica de diseño por un tiempo mayor de 30 segundos en cada uso.
3. No sobrepasar la velocidad de 6000 RPM (aplicable para simuladores de corriente alterna) por un tiempo mayor de 30 segundos.

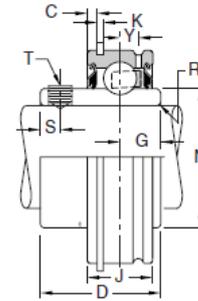
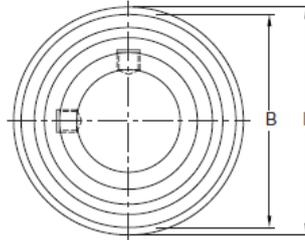
Condiciones seguras de trabajo.

1. Trabajar con el simulador de fallo única y exclusivamente mientras la cubierta esta cerrada. (Los elementos rotatorios pueden ser excesivamente peligrosos). No abrir el cerrojo bajo ningún circunstancia ya que esta diseñado para evitar la apertura del la cubierta durante el funcionamiento.
2. Antes de abrir la cubierta esperar que los elementos rotatorios estén completamente detenidos.
3. Utilizar siempre gafas de seguridad durante el trabajo con la máquina.
4. Mantener el cabello, la ropa, los dedos y otras partes del cuerpo alejados de los elementos en movimiento.
5. Trabajar en ambientes y lugares seguros.
6. No tensar en exceso los cables eléctricos de la máquina, manteniéndolos lejos de superficies calientes
7. Mantener los cables extendidos libres de obstáculos durante todo el tiempo.
8. Reducir la posibilidad de desconexión de los cables eléctricos durante la operación, procurando que estén lo más extendidos posibles.
9. Asegurarse de que la superficie sobre la que se realice el ensayo sea estable.
10. Inspeccionar la máquina completamente antes de su uso por si ha sufrido algún tipo de daño o avería
11. Apagar todos los dispositivos y esperar a que el motor se detenga antes de desconectar la máquina de la fuente de corriente.
12. No utilizar la máquina si los dispositivos no se han conectado o desconectado anteriormente de forma correcta.
13. Para evitar un posible “shock” eléctrico se debe de tener en cuenta que:
  - a. No superar los 22 V en corriente alterna
  - b. Desconectar la máquina de la fuente de corriente para su limpieza y mantenimiento.
  - c. Desconectar los cables eléctricos de la fuente mientras se realizan los ajustes de control del motor.
  - d. No trabajar en ambientes húmedos.
  - e. Inspeccionar el estado de los enchufes antes de cada uso
  - f. No operar con la maquina si la fuente o los cables eléctricos están dañados
  - g. Utilizar la extensión necesaria de cable para el uso del simulador de fallos.





## ANEXO II: CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO Y DEL ACELERÓMETRO.



Shaft Dia. mm	Inches	Bearing Number	Basic Size	Bore Tolerance	B	C	D	G	J	K	L	N	R	S	T Tap Size	Y	Unit wt. (lbs/kg)
20	1/2 5/8 3/4	ER8	204	+0.0007-0.0000	1.8504	3/32	1 7/32	.405	.6240	3/64	2 1/16	.941	.040	15/64	#10-32	.142	0.62
		ER10		+0.0118-0.0000	47.0000	2.4	30.96	10.29	15.850	1.2	52.4	23.90	1.0	2.0	#10-32	.142	0.55
		ER12		+0.0118-0.0000	47.0000	2.4	30.96	10.29	15.850	1.2	52.4	23.90	1.0	2.0	1/4-28	.142	0.54
25	7/8 15/16 1	ER14	205	+0.0007-0.0000	2.0472	3/32	1 9/8	.508	.7490	3/64	2 17/64	1.313	.040	15/64	1/4-28	.185	0.65
		ER15		+0.0118-0.0000	52.0000	2.4	34.92	12.90	19.025	1.2	57.6	33.35	1.0	2.0	1/4-28	.185	0.63
		ER16		+0.0118-0.0000	52.0000	2.4	34.92	12.90	19.025	1.2	57.6	33.35	1.0	2.0	1/4-28	.185	0.61
		ER205		+0.0118-0.0000	52.0000	2.4	34.92	12.90	19.025	1.2	57.6	33.35	1.0	2.0	1/4-28	.185	0.3
30	1 1/8 1 3/16 1 1/4	ER18	206	+0.0007-0.0000	2.4409	3/32	1 1/2	.625	.8740	3/64	2 21/32	1.587	.040	1/4	1/4-28	.224	0.96
		ER19		+0.0118-0.0000	62.0000	2.4	38.10	15.88	22.200	1.2	67.5	40.31	1.0	6.4	1/4-28	.224	0.94
		ER20S		+0.0118-0.0000	62.0000	2.4	38.10	15.88	22.200	1.2	67.5	40.31	1.0	6.4	1/4-28	.224	0.90
35	1 1/4 1 3/8 1 7/16	ER20	207	+0.0008-0.0000	2.8346	1/8	1 11/16	.688	.9365	1/16	3 5/64	1.847	.040	2 1/64	5/16-24	.256	0.96
		ER22		+0.020-0.0000	72.0000	3.2	42.88	17.48	23.787	1.6	78.2	46.91	1.0	8.3	5/16-24	.256	1.70
		ER23		+0.020-0.0000	72.0000	3.2	42.88	17.48	23.787	1.6	78.2	46.91	1.0	8.3	5/16-24	.256	1.62
40	1 1/2	ER24	208	+0.0008-0.0000	3.1496	1/8	1 15/16	.750	1.0927	1/16	3 25/64	2.083	.062	3/8	5/16-24	.297	2.18
		ER208		+0.020-0.0000	80.0000	3.2	49.22	19.05	27.755	1.6	86.1	52.91	1.6	9.5	5/16-24	.297	2.18
45	1 5/8 1 11/16 1 3/4	ER26	209	+0.0008-0.0000	3.3465	1/8	1 15/16	.750	1.0927	1/16	3 19/32	2.281	.062	3/8	5/16-24	.297	2.28
		ER27		+0.020-0.0000	85.0000	3.2	49.22	19.05	27.755	1.6	91.3	57.94	1.6	9.5	5/16-24	.297	2.22
		ER28		+0.020-0.0000	85.0000	3.2	49.22	19.05	27.755	1.6	91.3	57.94	1.6	9.5	5/16-24	.297	2.15
50	1 7/8 1 15/16	ER30	210	+0.0008-0.0000	3.5433	1/8	2 1/32	.750	1.1240	3/32	3 25/32	2.475	.062	3/8	3/8-24	.265	2.75
		ER31		+0.020-0.0000	90.0000	3.2	51.59	19.05	28.550	2.4	96.0	62.86	1.6	9.5	3/8-24	.265	2.61
55	2 2 3/16	ER32	211	+0.0009-0.0000	3.9370	1/8	2 3/16	.875	1.1860	3/32	4 11/64	2.749	.080	3/8	3/8-24	.298	3.38
		ER35		+0.023-0.0000	100.0000	3.2	55.58	22.22	30.124	2.4	106.0	69.82	2.0	9.5	3/8-24	.298	3.07
60	2 1/4 2 3/8 2 7/16	ER36	212	+0.0009-0.0000	4.3307	1/8	2 9/16	1.000	1.2490	3/32	4 9/16	3.012	.080	3/8	3/8-24	.330	4.48
		ER38		+0.023-0.0000	110.0000	3.2	65.07	25.4	31.725	2.4	115.9	76.50	2.0	9.5	3/8-24	.330	4.38
		ER39		+0.023-0.0000	110.0000	3.2	65.07	25.4	31.725	2.4	115.9	76.50	2.0	9.5	3/8-24	.330	4.19
70	2 1/2 2 11/16	ER40	214	+0.0009-0.0000	4.9213	5/32	2 3/4	1.062	1.3740	7/64	5 9/32	3.433	.080	3/8	3/8-24	.374	5.92
		ER43		+0.023-0.0000	125.0000	4.0	69.85	27.0	34.900	2.8	134.1	84.58	2.0	9.5	3/8-24	.374	5.49
75	2 7/8 2 15/16	ER46	215	+0.0009-0.0000	5.1181	5/32	3 1/16	1.313	1.4990	7/64	5 1/2	3.632	.080	3/8	3/8-24	.374	6.60
		ER47		+0.023-0.0000	130.0000	4.0	77.77	33.32	38.075	2.8	139.7	92.25	2.0	9.5	3/8-24	.374	6.37
80	3 3 3/16	ER48	216	+0.0009-0.0000	5.5118	5/32	3 1/4	1.313	1.6865	7/64	5 7/8	3.920	.120	3/8	3/8-24	.406	8.05
		ER51		+0.023-0.0000	140.0000	4.0	82.55	33.32	42.837	2.8	149.2	99.57	3.0	9.5	3/8-24	.406	7.56

†Bearing O.D. tolerance: 204 basic size, +0.0000° -0.0005° (+0.000mm -0.013mm); 205 thru 208 basic size, +0.0000° -0.0006°, +0.000mm -0.015mm); 209 thru 212 basic size, +0.0000° -0.0008° (+0.000mm -0.020mm); 214 thru 216 basic size, +0.0000° -0.0010° (+0.000mm -0.025mm)

### Hoja de características del rodamiento utilizado



### ANEXO III: PASOS A REALIZAR PARA EL MONTAJE DE TODO EL EQUIPO.

1. Instalar los rodamientos tanto en la posición más cercana a motor como en la más lejana (en el siguiente apartado se explicará como se realiza el montaje de los rodamientos). El rodamiento más cercano al motor será el rodamiento sometido a ensayo por lo que se colocará en esa posición los rodamientos con los que se trabaja. En la parte más alejada del motor se colocará un rodamiento normal, sin ningún defecto, para todos los ensayos.
2. Montar el acelerómetro en la parte superior de la máquina donde se aloja el rodamiento elegido para su estudio cerciorándose de que el imán hace contacto correctamente y queda bien fijado.



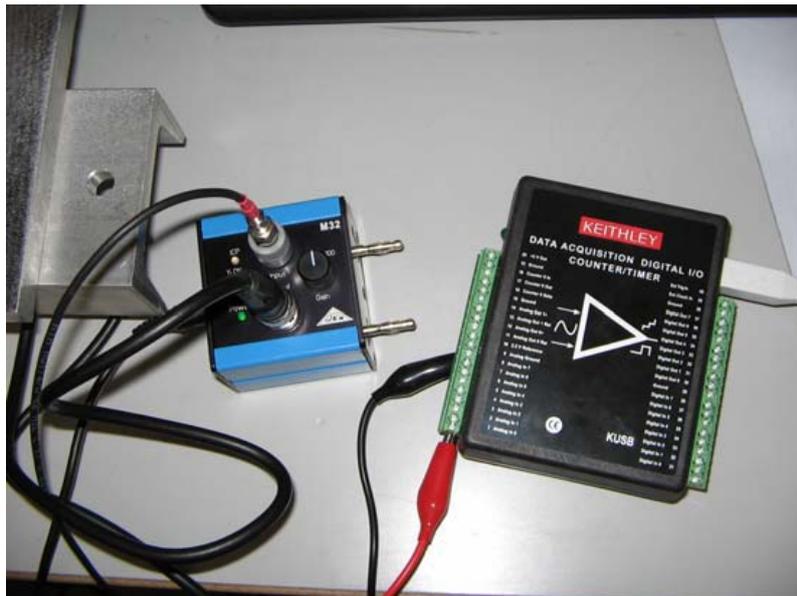
**Colocación del acelerómetro en el rodamiento de ensayo.**

3. Conectar el acelerómetro al amplificador que deberá estar en posición 10 (Las medidas estarán 10 veces amplificadas). El amplificador deberá estar alimentado con su correspondiente cable y como resultado la luz POWER deberá estar iluminada durante todo el tiempo que dure la recogida de datos.



**Conexión del acelerómetro al amplificador.**

4. Conectar el amplificador a la tarjeta de adquisición de datos. Se tendrá que conectar a los puertos de señal analógica y de tierra analógica.



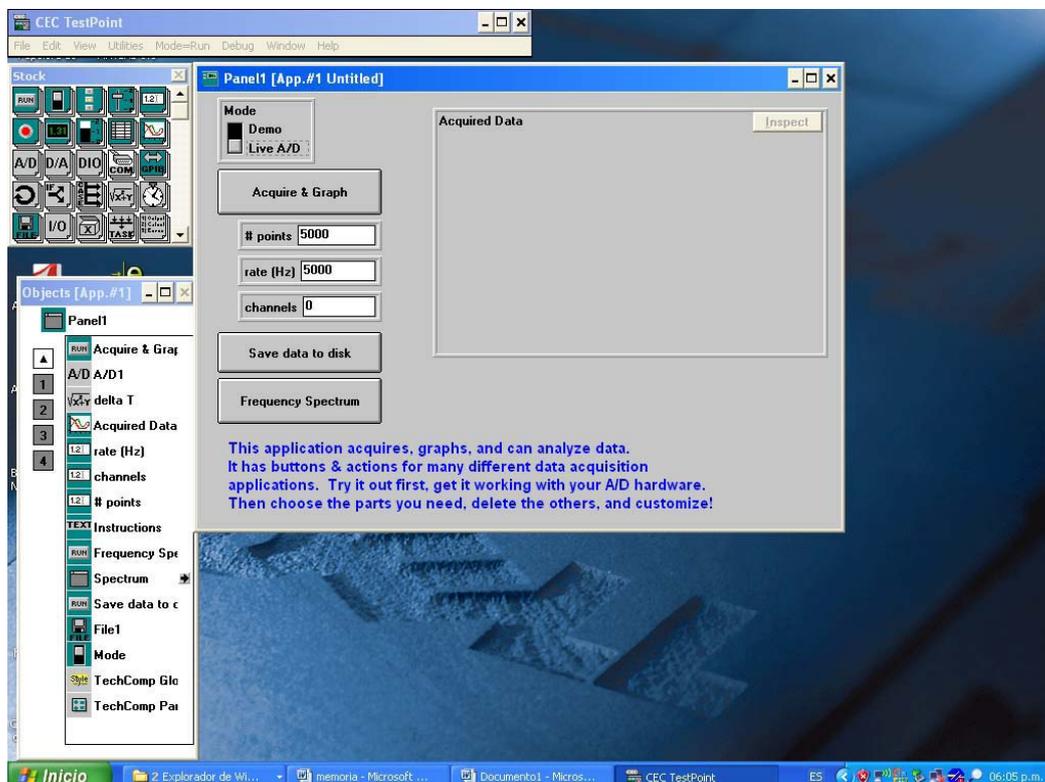
**Conexión del amplificador a la tarjeta de adquisición de datos.**

5. Conectar la tarjeta de adquisición de datos al ordenador a través de un puerto USB..



**Conexión de la tarjeta de adquisición al ordenador.**

6. Introducir en el programa de adquisición de datos la frecuencia de muestreo y el número de muestras. En este ensayo la frecuencia de muestreo ha sido elegida en 5000 Hz como se describió en este mismo capítulo. Se introducirá en el recuadro rate (Hz) como se explicó anteriormente y el número de puntos (recuadro # points) se irá variando dependiendo de la cantidad de muestras que se quieran adquirir. El número de muestras también se explicó en este capítulo que serán: 5000, 10000, 15000, 20000, 25000, 50000.



**Programa de adquisición de datos.**

7. Encender la máquina, poner la máquina a una de las velocidades indicadas utilizando la rueda del cuadro de control más arriba y pulsar el botón verde con la leyenda RUN. Antes de encender la máquina se tendrá que bajar la tapa ya que si no la máquina por seguridad no arrancará.



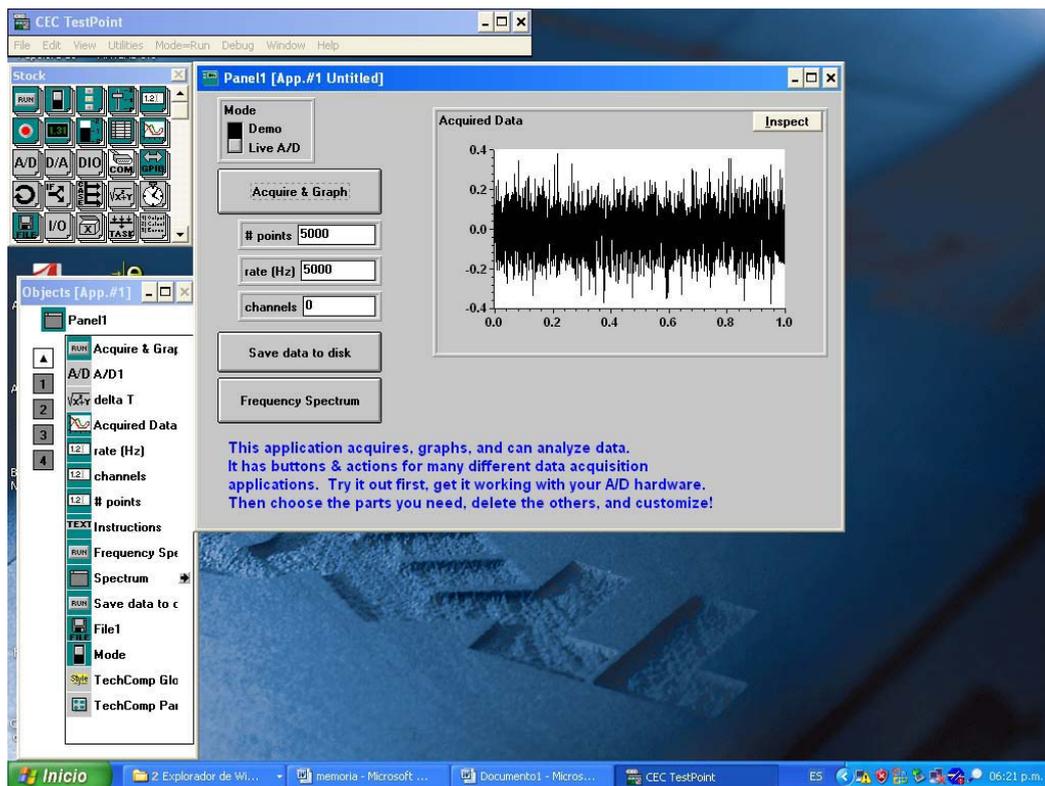
**Cuadro de control de la máquina de ensayos.**

8. Es necesario esperar unos segundos para que la máquina llegue al régimen permanente. Es importante señalar que la velocidad real de la máquina es la del indicador del cuadro de mandos. La velocidad que se muestra en el tacómetro superior es errónea debido a la mala orientación del tacómetro, de la pegatina reflectante presente en la barra conducida o incluso a posibles reflejos con el material presente detrás de la máquina. La medida correcta será la que marque el control de velocidad de la máquina.



**Control de velocidad de la máquina.**

- Tomar las medidas correspondientes de la forma que se indicó en el apartado anterior y una vez tomadas modificar la velocidad. Cuando la máquina empiece a funcionar, hay que esperar al régimen permanente de la máquina para tomar las medidas. Durante el funcionamiento de la máquina ocurre un fenómeno, sobre todo con los rodamientos en mal estado, que es la transmisión de las vibraciones del conjunto a la rueda reguladora de velocidad. Como resultado puede ocurrir que se mueva y la máquina aumente o disminuya la velocidad por lo que es necesario revisar cada cierto tiempo que se esté en la velocidad correcta.



**Programa de adquisición de datos con una de una señal adquirida.**

- Cuando se tengan todas las medidas con el rodamiento en buen estado, parar la máquina y montar un rodamiento en mal estado y repetir la operación.





## ANEXO IV: DESMONTAJE DE LA MÁQUINA PARA LA INSTALACIÓN DE UN RODAMIENTO.

1. La máquina deberá estar totalmente parada. Para este fin se pulsará el botón STOP del cuadro de mandos de la máquina y/o se pondrá la rueda reguladora de velocidad a 0.

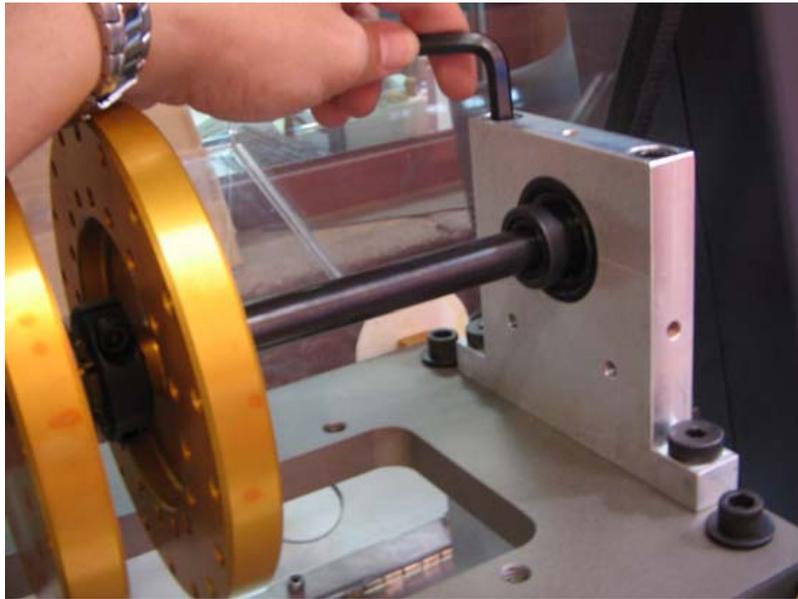


**Detención de la máquina.**

2. Con la llave de 5/16 se aflojarán los cuatro tornillos superiores tanto de la zona del rodamiento a ensayar como la zona del rodamiento sin defecto ya que se tendrá que extraer la barra conducida.

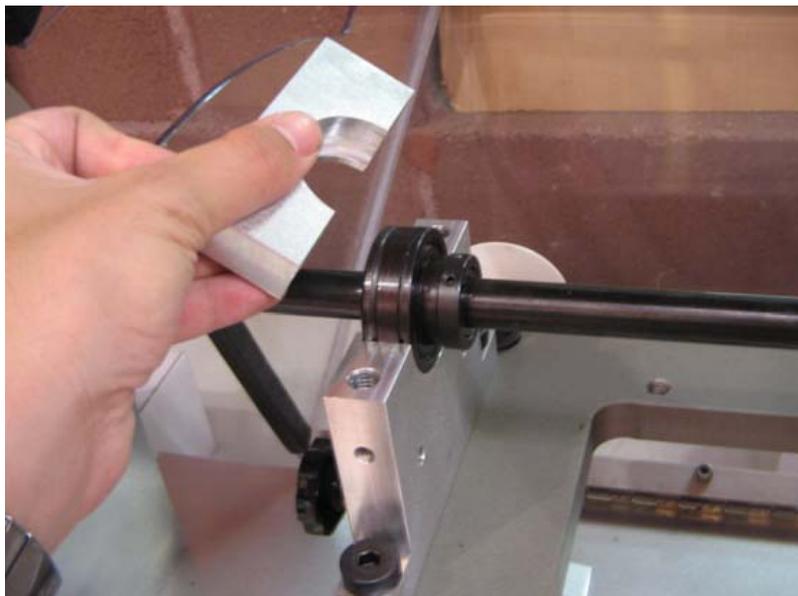


**Aflojado de los tornillos superiores.**

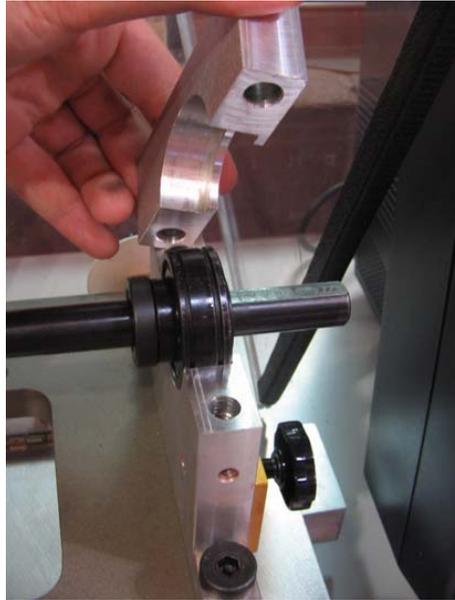


**Se aflojarán los tornillos superiores de ambos lados.**

3. Retirar los soportes donde se encuentran alojados los rodamientos.

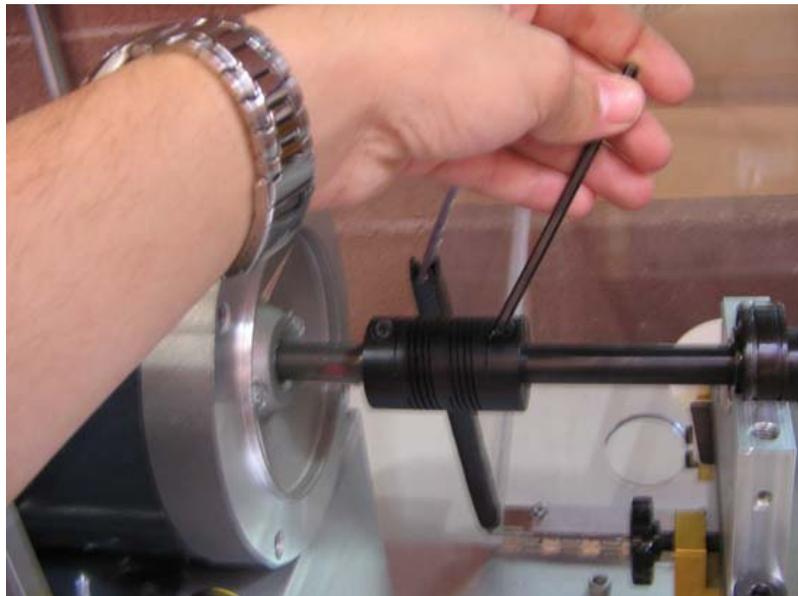


**Retirada del soporte cercano al motor que encierra el rodamiento de ensayo.**



**Retirada del soporte más lejano al motor que encierra un rodamiento sin defecto.**

4. Aflojar el acoplamiento elástico existente entre el eje conductor y el conducido con la llave de 5/32. Solo es necesario aflojar el tornillo correspondiente al apriete del eje conducido. Es importante no apretar en vacío este acoplamiento elástico ya que puede deformarse fácilmente dificultando posteriormente la colocación de la barra conducida.



**Afajado del acoplamiento elástico que conecta el motor con la barra conducida.**

5. Extraer la barra y a continuación aflojar el rodamiento a cambiar con la llave de 3/32 y extraerlo. Cuando se haya desmontado hay que tener cuidado ya que al haber girado a una alta velocidad podría estar a elevada temperatura. En el caso de este proyecto, la máxima velocidad de giro es 30 Hz y la temperatura que presenta el rodamiento es elevada pero no llega a niveles de producir quemaduras.

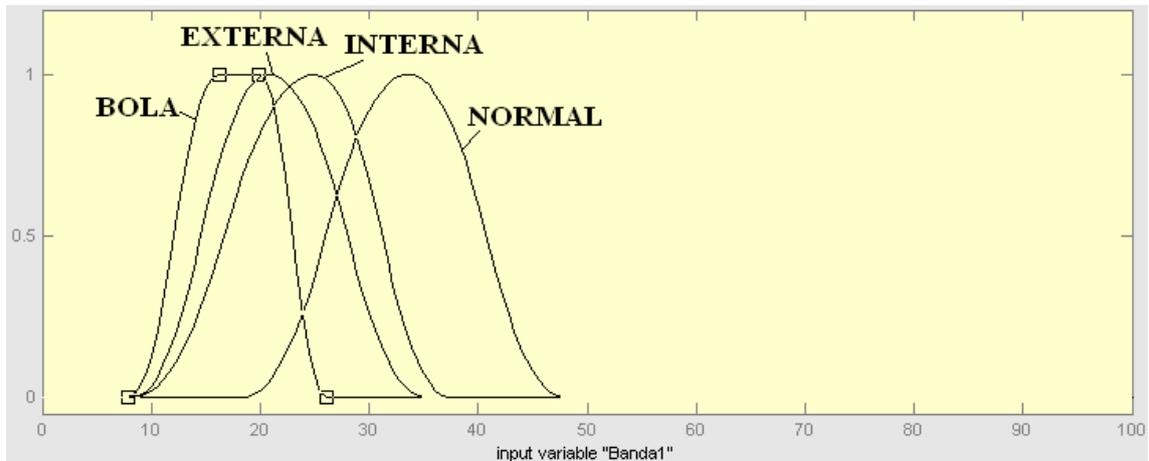


**Retirada del rodamiento del ensayo y colocación de otro distinto.**

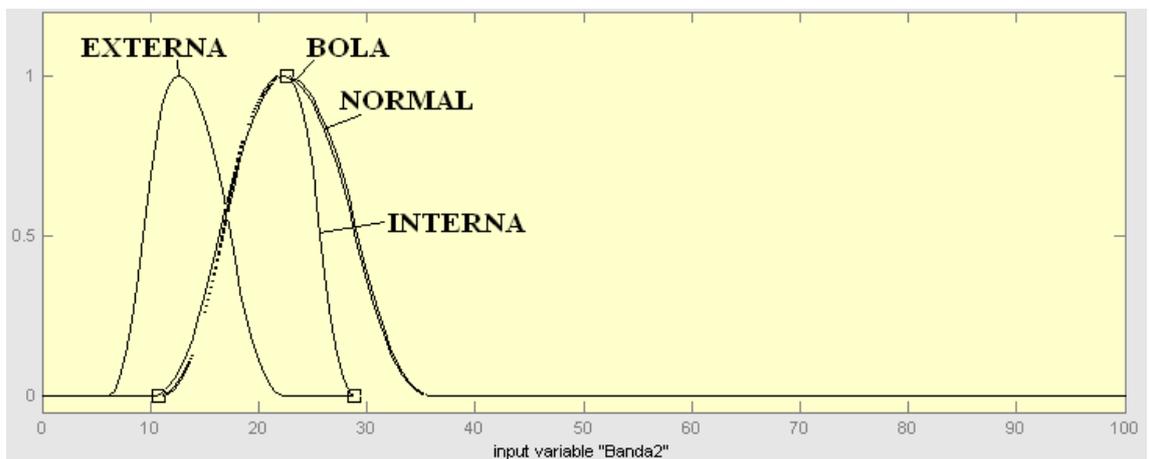
6. Una vez fuera el rodamiento el proceso de montaje es el inverso del seguido para desmontar el rodamiento. Se ha de tener cuidado en el buen apriete de todos los tornillos que se han mostrado ya que un mal apriete puede dar a la aparición de vibraciones no provocadas por los defectos de los rodamientos.



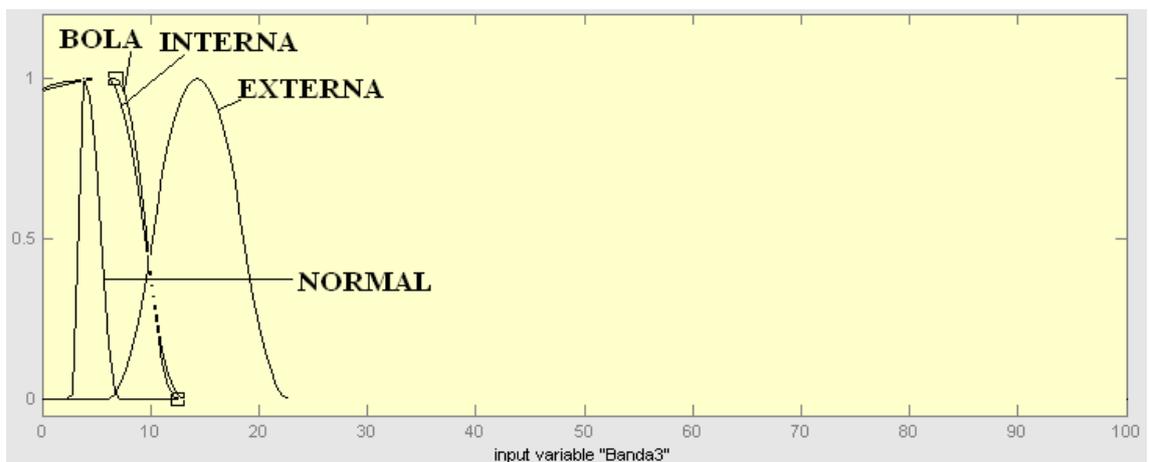
## ANEXO V: FUNCIONES CARACTERÍSTICAS DE TODAS LAS VARIABLES DE ENTRADA DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA.



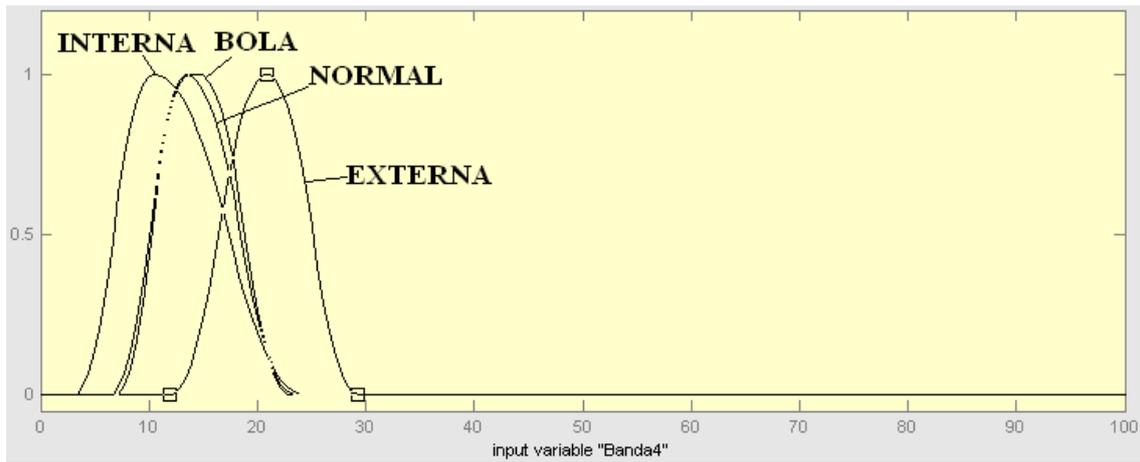
Funciones características de la variable Banda 1



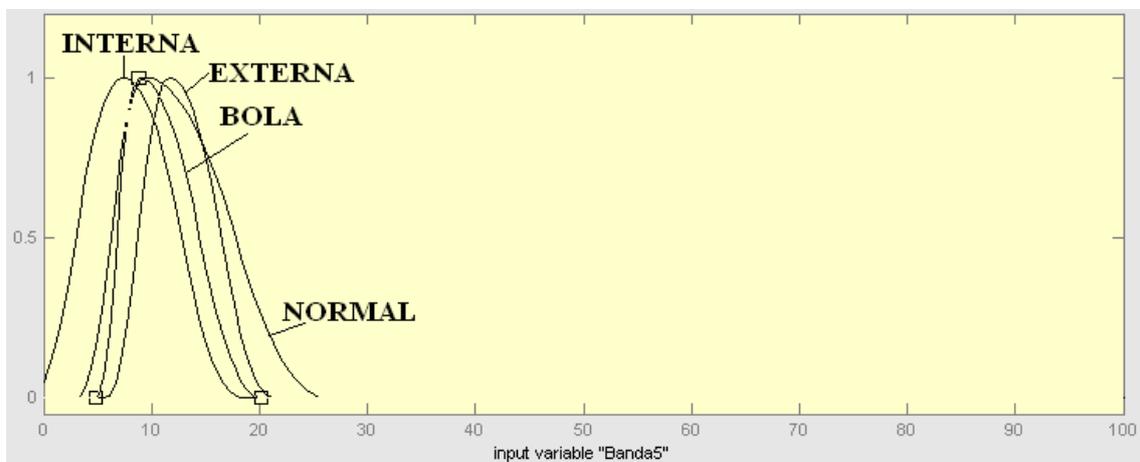
Funciones características de la variable Banda 2



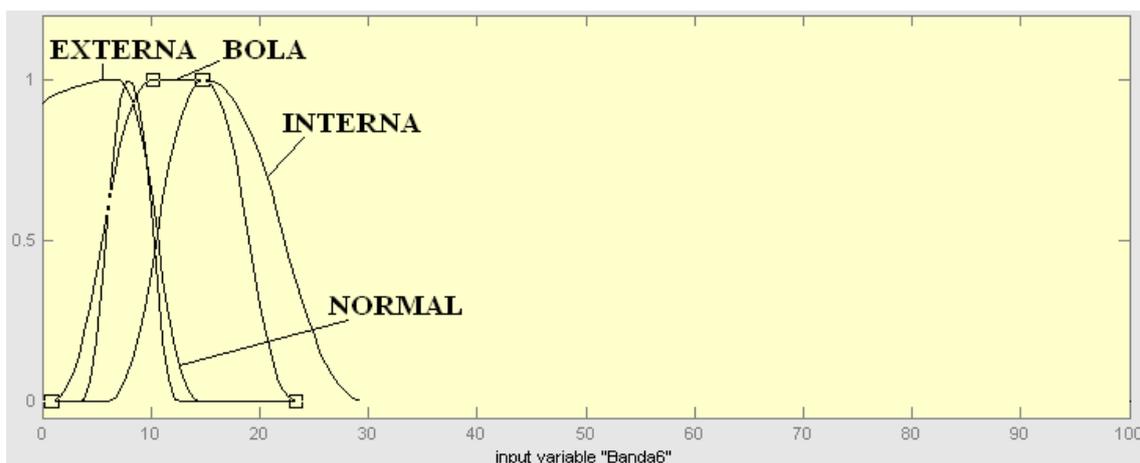
Funciones características de la variable Banda 3



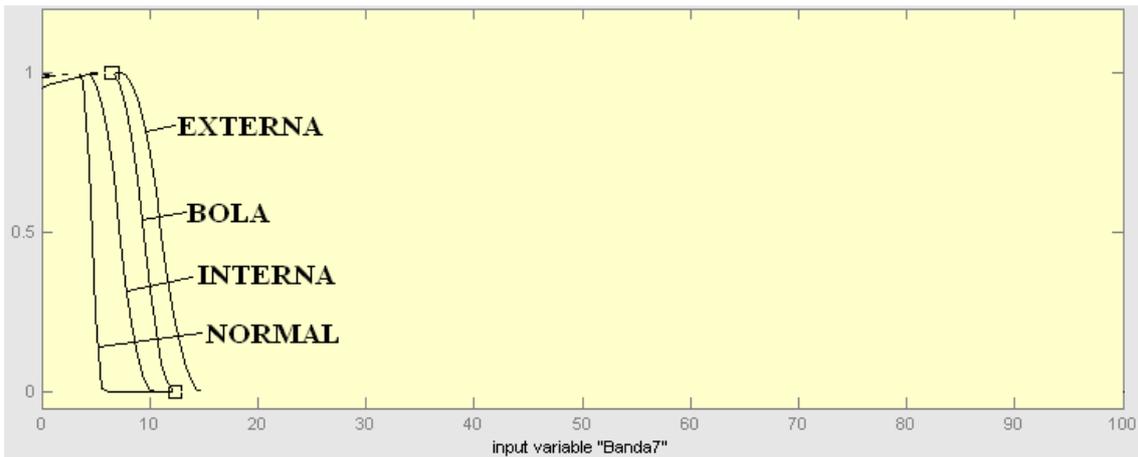
**Funciones características de la variable Banda 4**



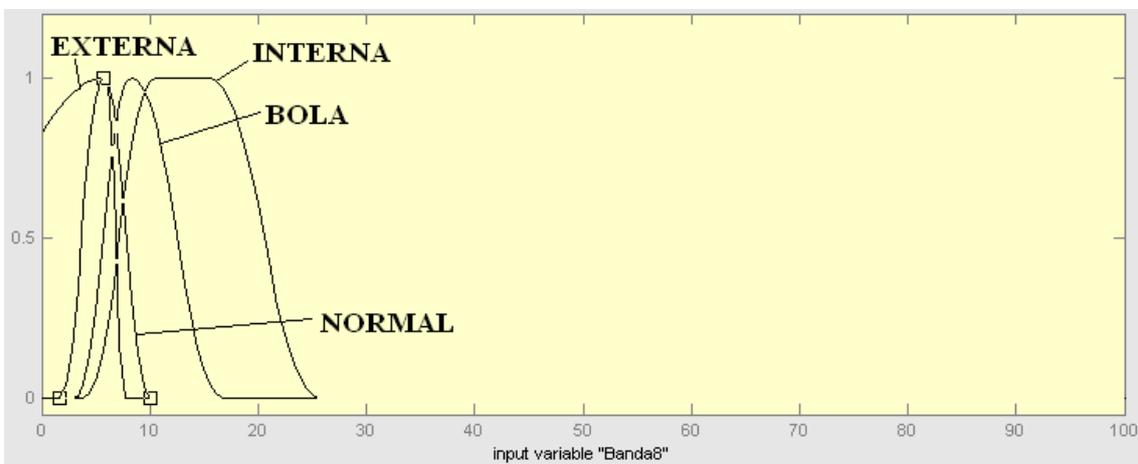
**Funciones características de la variable Banda 5**



**Funciones características de la variable Banda 6**



**Funciones características de la variable Banda 7**



**Funciones características de la variable Banda 8**



**ANEXO VI: REGLAS DIFUSAS UTILIZADAS.**

1. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 3 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA y BANDA 6 es EXTERNA) ENTONCES (BOLA NO es BOLA)(EXTERNA es EXTERNA)(INTERNA NO es INTERNA)(NORMAL NO es NORMAL)(1)
2. SI (Banda 4 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.25)
3. SI (Banda 3 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.25)
4. SI (Banda 2 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.25)
5. SI (Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.25)
6. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 3 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
7. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
8. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
9. SI (Banda 3 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
10. SI (Banda 3 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
11. SI (Banda 4 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.5)
12. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 3 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.75)
13. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.75)
14. SI (Banda 3 es EXTERNA y Banda 4 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.75)
15. SI (Banda 2 es EXTERNA y Banda 3 es EXTERNA y Banda 6 es EXTERNA) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA)(0.75)
16. SI (Banda 1 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
17. SI (Banda 3 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.25)
18. SI (Banda 6 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.25)
19. SI (Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.25)
20. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 3 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL y BANDA 7 es NORMAL) ENTONCES (BOLA NO es BOLA)(EXTERNA NO es EXTERNA)(INTERNA NO es INTERNA)(NORMAL es NORMAL)(1)
21. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 3 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
22. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
23. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
24. SI (Banda 3 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
25. SI (Banda 3 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
26. SI (Banda 6 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.5)
27. SI (Banda 3 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.75)



28. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 3 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.75)
29. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 6 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.75)
30. SI (Banda 1 es NORMAL y Banda 3 es NORMAL y Banda 7 es NORMAL) ENTONCES (NORMAL es NORMAL)(0.75)
31. SI (Banda 1 NO es BOLA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.25)
32. SI (Banda 6 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.25)
33. SI (Banda 4 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.25)
34. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.25)
35. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 4 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
36. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 6 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
37. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
38. SI (Banda 4 es INTERNA y Banda 6 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
39. SI (Banda 1 NO es BOLA y Banda 4 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
40. SI (Banda 1 NO es BOLA y Banda 6 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.5)
41. SI (Banda 1 NO es BOLA y Banda 4 es INTERNA y Banda 6 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.75)
42. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 6 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.75)
43. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 4 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.75)
44. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 4 es INTERNA y Banda 6 es INTERNA) ENTONCES (INTERNA es INTERNA)(0.75)
45. SI (Banda 1 es INTERNA y Banda 2 NO es EXTERNA y Banda 4 es INTERNA y Banda 6 es INTERNA y Banda 8 es INTERNA) ENTONCES (BOLA NO es BOLA)(EXTERNA NO es EXTERNA)(INTERNA es INTERNA)(NORMAL NO es NORMAL)(1)
46. SI (Banda 1 es BOLA y Banda 3 NO es EXTERNA y Banda 8 es BOLA) ENTONCES (BOLA es BOLA)(EXTERNA NO es EXTERNA)(INTERNA NO es INTERNA)(NORMAL NO es NORMAL)(1)
47. SI (Banda 1 NO es NORMAL y Banda 3 NO es EXTERNA y Banda 4 es BOLA y Banda 8 es BOLA) ENTONCES (BOLA es BOLA)(EXTERNA NO es EXTERNA)(INTERNA NO es INTERNA)(NORMAL NO es NORMAL)(1)

**ANEXO VII: TABLAS DE RESULTADOS****RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
BOLA A VELOCIDAD 10 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO			NORMAL	TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA		
256-1	0	41	25	42	0.7
256-2	0	0	50	41	0.65
256-3	1	25	7	25	0.52
256-4	0	25	8	49	0.55
256-5	81	0	0	0	0.60
5000-1	28	0	75	37	2.41
5000-2	0	25	67	50	2.41
5000-3	0	0	50	37	2.64
5000-4	0	24	66	49	2.55
5000-5	33	0	64	34	2.57
10000-1	2	25	48	50	4.28
10000-2	0	25	54	50	4.3
10000-3	21	24	56	58	4.6
10000-4	21	23	72	40	4.21
10000-5	15	23	68	43	4.64
15000-1	2	25	71	50	6.83
15000-2	19	25	71	41	6.67
15000-3	8	25	68	47	6.15
15000-4	21	25	75	40	6.46
15000-5	27	0	75	37	6.35
20000-1	6	25	64	48	8.32
20000-2	37	0	73	0	8.33
20000-3	1	25	61	50	8.62
20000-4	26	0	73	38	8.38
20000-5	3	25	67	49	8.26
25000-1	36	0	71	0	9.71
25000-2	4	25	60	49	10
25000-3	3	25	56	49	10.02
25000-4	11	25	67	45	10.32
25000-5	4	25	66	49	10.05
50000-1	9	25	64	46	20.49
50000-2	15	25	73	43	19.77
50000-3	16	25	67	43	20.01
50000-4	0	25	63	50	19.31
50000-5	17	25	68	42	19.54

Resultados para el rodamiento con defecto en bola a velocidad 10 Hz



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA EXTERNA A VELOCIDAD 10 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	1	25	14	25	0.48
256-2	0	25	3	47	0.52
256-3	0	49	19	38	0.51
256-4	17	24	25	50	0.52
256-5	0	25	5	25	0.55
5000-1	8	49	19	33	2.63
5000-2	0	50	0	25	2.46
5000-3	8	50	21	29	2.35
5000-4	3	50	16	40	2.52
5000-5	1	38	25	50	2.44
10000-1	3	50	17	37	4.67
10000-2	11	50	21	30	4.43
10000-3	0	50	24	28	4.48
10000-4	9	47	20	18	4.51
10000-5	4	49	17	23	4.51
15000-1			DEFECTUOSO		
15000-2	14	48	22	37	6.42
15000-3	0	49	14	29	6.40
15000-4	7	47	20	34	6.57
15000-5	3	45	16	37	6.42
20000-1	5	42	18	30	8.35
20000-2	5	41	18	37	8.51
20000-3	10	41	21	31	8.32
20000-4	6	49	18	35	8.66
20000-5	3	44	16	37	8.58
25000-1	11	44	21	30	10.74
25000-2	16	45	22	38	10.28
25000-3	3	43	17	26	10.29
25000-4	11	46	21	42	10.49
25000-5	2	33	16	45	10.31
50000-1	14	50	22	33	20.95
50000-2	7	50	19	28	20.07
50000-3	9	50	20	32	20.36
50000-4	10	50	20	34	20.13
50000-5	18	50	22	37	20.1

**Resultados para el rodamiento con defecto en pista externa a velocidad 10 Hz**



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA INTERNA A VELOCIDAD 10 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	13	0	57	0	0.50
256-2	0	0	0	73	0.52
256-3	4	25	49	34	0.53
256-4	0	25	14	22	0.52
256-5	0	0	74	0	0.53
5000-1	18	33	50	42	2.94
5000-2	0	24	50	50	2.24
5000-3	14	24	54	44	2.73
5000-4	38	0	48	0	2.50
5000-5	0	0	67	0	2.82
10000-1	0	0	66	38	4.34
10000-2	0	24	50	50	4.74
10000-3	0	0	68	0	4.93
10000-4	0	0	70	0	4.60
10000-5	0	0	50	0	4.43
15000-1	0	0	58	0	6.28
15000-2	0	0	71	0	6.27
15000-3	0	0	50	47	6.67
15000-4	61	0	75	0	6.60
15000-5	0	0	60	40	6.66
20000-1	0	0	67	0	9.05
20000-2	58	0	73	0	8.63
20000-3	0	0	65	38	8.85
20000-4	0	0	74	0	8.76
20000-5	0	0	72	0	8.72
25000-1	0	0	61	0	10.79
25000-2	0	0	66	0	11.03
25000-3	0	0	71	0	10.67
25000-4	0	0	70	0	10.42
25000-5	0	0	57	0	10.63
50000-1	0	0	68	36	19.90
50000-2	0	0	70	0	20.58
50000-3	0	0	69	0	20.04
50000-4	0	0	67	0	20.26
50000-5	0	0	61	0	20.40

**Resultados para el rodamiento con defecto en pista interna a velocidad 10 Hz**

**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO NORMAL A  
VELOCIDAD 10 HZ**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	24	25	25	0.55
256-2	0	25	2	50	0.53
256-3	1	25	22	25	0.54
256-4	0	25	7	51	0.60
256-5	0	25	5	62	0.48
5000-1	0	25	5	47	2.39
5000-2	0	25	8	50	2.81
5000-3	0	25	7	47	2.66
5000-4	0	23	13	41	2.49
5000-5	0	25	8	47	2.52
10000-1	0	25	6	50	4.64
10000-2	0	24	10	45	4.98
10000-3	0	25	3	49	4.61
10000-4	0	25	7	50	4.81
10000-5	0	25	6	50	4.7
15000-1	0	25	5	43	6.93
15000-2	0	25	8	50	6.72
15000-3	0	25	7	50	6.51
15000-4	0	25	8	50	6.64
15000-5	0	25	9	48	6.53
20000-1	0	25	4	40	8.2
20000-2	0	25	3	35	8.12
20000-3	0	25	3	36	8.43
20000-4	0	25	8	49	8.87
20000-5	0	25	5	41	8.67
25000-1	0	25	4	33	10.88
25000-2	0	25	5	41	10.74
25000-3	0	25	10	47	10.88
25000-4			DEFECTUOSO		
25000-5	0	25	3	41	10.66
50000-1	0	25	9	48	20.98
50000-2	0	25	8	50	25.15
50000-3	0	25	8	48	21.01
50000-4	0	24	10	50	21.29
50000-5	0	25	7	49	20.96

Resultados para el rodamiento sin defecto a velocidad 10 Hz



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
BOLA A VELOCIDAD 20 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	0	46	0	0.48
256-2	0	0	51	0	0.56
256-3	0	0	66	0	0.51
256-4	0	6	47	24	0.54
256-5	100	0	0	0	0.48
5000-1	32	0	71	0	2.38
5000-2	92	0	0	0	2.67
5000-3	81	0	0	0	2.68
5000-4	52	0	0	0	2.6
5000-5	93	0	0	0	2.7
10000-1	80	0	0	0	4.74
10000-2	58	0	0	0	4.45
10000-3	89	0	0	0	4.81
10000-4	96	0	0	0	4.64
10000-5	80	0	0	0	4.66
15000-1	83	0	0	0	6.66
15000-2	80	0	0	0	6.66
15000-3	46	0	49	0	6.58
15000-4	83	0	0	0	6.83
15000-5	83	0	0	0	6.81
20000-1	83	0	0	0	8.98
20000-2	76	0	0	0	8.82
20000-3	64	0	0	0	8.88
20000-4	90	0	0	0	8.86
20000-5	73	0	0	0	8.84
25000-1	89	0	0	0	10.84
25000-2	70	0	0	0	11.01
25000-3	81	0	0	0	10.67
25000-4	84	0	0	0	10.90
25000-5	88	0	0	0	11.05
50000-1	74	0	0	0	21.22
50000-2	78	0	0	0	21.39
50000-3	76	0	0	0	21.44
50000-4	76	0	0	0	21.42
50000-5	78	0	0	0	21.50

Resultados para el rodamiento con defecto en bola a velocidad 20 Hz



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA EXTERNA A VELOCIDAD 20 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	9	46	33	46	0.56
256-2	0	25	18	25	0.49
256-3	0	69	0	50	0.48
256-4	0	63	0	49	0.54
256-5	0	75	0	0	0.65
5000-1	0	54	0	0	2.15
5000-2	0	73	0	0	2.20
5000-3	0	72	0	35	2.35
5000-4	0	73	0	0	2.28
5000-5	0	77	0	0	2.31
10000-1	0	76	0	0	4.29
10000-2	0	68	0	46	4.35
10000-3	0	74	0	0	4.31
10000-4	0	59	0	48	4.40
10000-5	0	71	0	0	4.32
15000-1	0	65	0	0	6.21
15000-2	0	53	0	0	5.94
15000-3	0	67	0	37	5.96
15000-4	0	70	0	0	6.27
15000-5	0	72	0	0	6.22
20000-1	0	59	0	42	7.74
20000-2	0	58	0	45	8.23
20000-3	0	65	0	0	8.18
20000-4	0	59	0	41	8.13
20000-5	0	66	0	28	8.41
25000-1	0	54	0	40	10.03
25000-2	0	61	0	37	10.11
25000-3	0	71	22	25	10.17
25000-4	0	71	0	0	10.17
25000-5	0	63	0	42	9.69
50000-1	0	62	0	0	19.12
50000-2	0	64	0	0	19.99
50000-3			DEFECTUOSO		
50000-4	0	69	0	0	20.06
50000-5	0	63	0	35	19.91

Resultados para el rodamiento con defecto en pista externa a velocidad 20 Hz



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA INTERNA A VELOCIDAD 20 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	9	40	25	35	0.52
256-2	24	29	25	25	0.48
256-3	0	10	25	50	0.53
256-4	0	23	25	21	0.62
256-5	0	25	23	50	0.49
5000-1	40	47	0	52	2.37
5000-2	0	35	47	57	2.33
5000-3	0	37	50	48	2.40
5000-4	2	48	29	24	2.35
5000-5	0	22	46	48	2.59
10000-1	17	25	58	42	4.49
10000-2	0	0	50	0	4.07
10000-3	0	40	48	50	4.41
10000-4	0	0	59	33	4.38
10000-5	0	42	50	49	4.05
15000-1	0	24	49	45	5.91
15000-2	0	33	50	50	5.81
15000-3	0	25	46	49	6.24
15000-4	24	0	64	26	6.12
15000-5	0	24	61	34	6.2
20000-1	30	0	62	36	8.25
20000-2	23	24	62	39	8.23
20000-3	0	0	48	0	8.23
20000-4	0	0	50	32	7.83
20000-5			DEFECTUOSO		
25000-1	0	43	49	32	9.56
25000-2	0	26	50	28	9.61
25000-3	0	0	49		10.01
25000-4	0	25	49	30	10.15
25000-5	0	35	50	47	10.14
50000-1	0	29	49	24	19.62
50000-2	0	31	37	0	19.87
50000-3	0	24	47	25	19.66
50000-4	0	42	47	22	19.77
50000-5	0	24	51	25	19.73

**Resultados para el rodamiento con defecto en pista interna a velocidad 20 Hz**



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO NORMAL A  
VELOCIDAD 20 HZ**

LONGITUD DE SEÑAL	PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	18	20	53	0.56
256-2	0	29	44	49	0.58
256-3	14	24	64	50	0.53
256-4	2	50	15	40	0.54
256-5	2	24	29	34	0.51
5000-1	0	0	0	61	2.35
5000-2	62	0	0	0	2.85
5000-3	42	0	48	50	2.71
5000-4	37	0	47	48	2.33
5000-5	38	0	0	0	2.54
10000-1	61	0	0	0	4.28
10000-2	30	40	39	62	4.33
10000-3	42	0	0	48	4.34
10000-4	46	0	0	0	4.41
10000-5	68	0	0	0	4.28
15000-1	48	0	0	0	6.33
15000-2	0	0	0	56	6.17
15000-3	0	0	0	56	6.22
15000-4	0	0	0	50	6.22
15000-5	26	0	56	56	6.26
20000-1			DEFECTUOSO		
20000-2	27	36	37	52	8.21
20000-3	18	38	31	58	8.09
20000-4	34	39	0	60	8.22
20000-5	27	32	36	31	8.18
25000-1	31	31	36	49	10.19
25000-2	21	37	30	49	10.02
25000-3	20	35	35	48	10.12
25000-4	29	38	31	58	10.14
25000-5	20	38	31	56	9.98
50000-1	35	0	36	47	19.94
50000-2	17	39	30	52	19.71
50000-3	0	33	39	45	21.47
50000-4	30	34	31	48	19.69
50000-5	27	35	33	48	19.83

**Resultados para el rodamiento sin defecto a velocidad 20 Hz**



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
BOLA A VELOCIDAD 30 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	21	37	21	25	0.49
256-2	94	0	0	0	0.57
256-3	39	0	72	45	0.51
256-4	54	0	0	0	0.55
256-5	0	0	73	0	0.60
5000-1	0	0	91	0	2.38
5000-2	92	0	0	0	2.46
5000-3	73	0	0	0	2.83
5000-4	73	0	0	0	2.69
5000-5	83	0	0	0	2.38
10000-1	87	0	0	0	4.41
10000-2	88	0	0	0	4.42
10000-3	83	0	0	0	4.42
10000-4	89	0	0	0	4.74
10000-5	86	0	0	0	4.49
15000-1	88	0	0	0	6.53
15000-2	96	0	0	0	6.11
15000-3	97	0	0	0	5.95
15000-4	97	0	0	0	6.36
15000-5	97	0	0	0	6.33
20000-1	80	0	0	0	7.9
20000-2	91	0	0	0	7.8
20000-3	99	0	0	0	8.61
20000-4	93	0	0	0	8.51
20000-5	96	0	0	0	8.29
25000-1	90	0	0	0	10.14
25000-2	90	0	0	0	10.29
25000-3	80	0	0	0	9.92
25000-4	90	0	0	0	9.93
25000-5	84	0	0	0	10.14
50000-1	93	0	0	0	19.01
50000-2	92	0	0	0	19.70
50000-3	93	0	0	0	19.69
50000-4	90	0	0	0	19.29
50000-5	89	0	0	0	19.33

Resultados para el rodamiento con defecto en bola a velocidad 30 Hz



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA EXTERNA A VELOCIDAD 30 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	72	0	0	0.49
256-2	0	67	0	0	0.50
256-3	0	69	0	0	0.50
256-4	0	47	0	0	0.52
256-5	0	41	0	50	0.66
5000-1	0	77	0	0	2.47
5000-2	0	84	0	0	2.50
5000-3	0	98	0	0	2.95
5000-4	0	96	0	0	2.29
5000-5	0	97	0	0	2.60
10000-1	0	91	0	0	5.29
10000-2	0	99	0	0	5.21
10000-3	0	97	0	0	4.66
10000-4	0	99	0	0	4.62
10000-5			DEFECTUOSO		
15000-1	0	96	0	0	5.85
15000-2	0	90	0	0	6.35
15000-3	0	89	0	0	6.48
15000-4	0	98	0	0	6.12
15000-5	0	98	0	0	6.83
20000-1			DEFECTUOSO		
20000-2	0	96	0	0	8.27
20000-3	0	97	0	0	8.3
20000-4	0	97	0	0	8.05
20000-5	0	96	0	0	8.52
25000-1	0	98	0	0	10.43
25000-2	0	96	0	0	9.8
25000-3	0	96	0	0	9.99
25000-4	0	99	0	0	9.6
25000-5	0	98	0	0	9.99
50000-1	0	99	0	0	19.53
50000-2	0	97	0	0	19.40
50000-3	0	93	0	0	19.16
50000-4	0	93	0	0	18.72
50000-5	0	91	0	0	19.56

**Resultados para el rodamiento con defecto en pista externa a velocidad 30 Hz**



**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO CON DEFECTO EN  
PISTA INTERNA A VELOCIDAD 30 HZ  
PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE**

LONGITUD DE SEÑAL	DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	35	25	46	0.47
256-2	0	0	0	68	0.48
256-3	0	0	0	84	0.49
256-4	29	0	59	0	0.53
256-5	13	50	18	25	0.47
5000-1	0	0	60	0	2.48
5000-2	93	0	0	0	2.64
5000-3	66	0	0	0	2.44
5000-4	0	0	64	0	2.51
5000-5	99	0	0	0	2.46
10000-1	0	0	82	0	4.49
10000-2	91	0	0	0	4.48
10000-3	98	0	0	0	4.40
10000-4	94	0	0	0	4.37
10000-5	0	0	80	0	4.63
15000-1	0	0	85	0	6.27
15000-2	0	0	79	0	6.39
15000-3	0	0	92	0	6.16
15000-4	0	0	92	0	6.18
15000-5	94	0	0	0	6.11
20000-1	0	0	86	0	8.58
20000-2	0	0	86	0	8.09
20000-3	73	0	0	0	7.73
20000-4	75	0	0	0	8.67
20000-5	0	0	90	0	8.07
25000-1	0	0	82	0	10.29
25000-2	0	0	84	0	10.32
25000-3	0	0	84	0	10.62
25000-4	0	0	87	0	10.24
25000-5	0	0	85	0	10.35
50000-1	0	0	95	0	20.21
50000-2	0	0	88	0	19.73
50000-3	0	0	87	0	20.19
50000-4	0	0	84	0	20.10
50000-5	0	0	84	0	21.36

**Resultados para el rodamiento con defecto en pista interna a velocidad 30 Hz**

**RESULTADOS PARA EL RODAMIENTO NORMAL A  
VELOCIDAD 30 HZ**

LONGITUD DE SEÑAL	PROBABILIDAD DE CADA TIPO DE DEFECTO				TIEMPO DE ANÁLISIS
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL	
256-1	0	0	0	50	0.53
256-2	0	0	0	60	0.55
256-3	61	0	0	0	0.53
256-4	0	23	19	54	0.52
256-5	0	0	0	68	0.54
5000-1	0	0	0	86	2.43
5000-2	0	0	0	74	2.69
5000-3	0	0	0	97	2.65
5000-4	0	0	0	72	2.65
5000-5	0	0	0	74	2.57
10000-1	0	0	0	93	4.56
10000-2	0	0	0	93	4.64
10000-3	0	0	0	100	4.59
10000-4	0	0	0	97	4.48
10000-5	0	0	0	79	4.60
15000-1	0	0	0	96	6.26
15000-2	0	0	0	98	6.47
15000-3	0	0	0	96	6.81
15000-4	0	0	0	91	6.40
15000-5	0	0	0	91	6.44
20000-1	0	0	0	98	8.43
20000-2	0	0	0	99	8.43
20000-3	0	0	0	99	8.95
20000-4	0	0	0	90	8.37
20000-5	0	0	0	97	8.36
25000-1	0	0	0	94	10.25
25000-2	0	0	0	93	10.31
25000-3	0	0	0	97	10.32
25000-4	0	0	0	88	10.58
25000-5	0	0	0	86	10.52
50000-1	0	0	0	96	20.03
50000-2	0	0	0	81	20.81
50000-3	0	0	0	86	21.09
50000-4	0	0	0	94	20.27
50000-5	0	0	0	97	19.98

Resultados para el rodamiento sin defecto a velocidad 30 Hz



## EFFECTIVIDAD EN LA DETECCIÓN DE FALLO A LA VELOCIDAD DE 10 HZ

	TIPO DEFECTO					TIPO DEFECTO			
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL		EN BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL
1	1	1	1	1	51	1	1	1	1
2	1	1	1	0	52	1	1	1	1
3	1	1	1	1	53	1	0	1	1
4	1	1	1	1	54	1	1	1	1
5	1	1	1	1	55	1	1	1	1
6	1	1	1	1	56	1	1	1	1
7	1	1	1	1	57	1	1	1	1
8	1	1	1	1	58	1	1	1	1
9	1	1	1	1	59	0	1	1	1
10	1	1	1	1	60	0	0	1	0
11	1	1	0	1	61	1	0	1	1
12	1	1	1	1	62	1	1	1	1
13	1	1	1	1	63	0	1	1	1
14	1	1	1	1	64	1	1	0	1
15	1	1	1	1	65	1	1	1	1
16	1	1	1	1	66	1	0	1	1
17	1	1	1	1	67	1	1	0	0
18	1	0	1	1	68	1	1	0	1
19	1	1	1	1	69	1	1	1	1
20	1	1	1	1	70	1	1	1	1
21	1	1	1	1	71	0	0	1	0
22	1	1	1	1	72	1	0	1	1
23	1	1	1	1	73	1	1	1	1
24	1	1	1	1	74	1	0	1	1
25	1	1	1	1	75	1	1	1	1
26	1	1	1	1	76	1	1	1	1
27	1	1	1	1	77	0	1	1	1
28	1	1	1	1	78	1	1	1	0
29	1	1	1	1	79	0	1	1	1
30	1	1	0	1	80	1	1	1	1
31	1	1	0	1	81	1	1	1	1
32	1	1	1	1	82	1	1	1	1
33	0	1	1	1	83	1	1	1	0
34	1	1	1	1	84	1	0	1	1
35	1	1	1	1	85	0	1	1	1
36	1	1	1	1	86	1	1	1	1
37	1	1	1	1	87	1	1	1	1
38	1	1	1	1	88	1	1	1	1
39	1	1	1	1	89	1	1	1	1
40	1	1	1	1	90	1	1	1	1
41	1	1	1	1	91	1	0	1	1
42	1	1	1	1	92	1	1	1	1
43	1	1	1	1	93	1	0	1	1
44	1	1	0	0	94	0	0	1	1
45	1	1	1	1	95	1	1	1	1
46	1	1	1	1	96	1	1	1	1
47	1	1	0	1	97	1	1	1	1
48	1	1	1	1	98	1	1	1	1
49	1	1	1	1	99	1	1	1	1
50	1	1	1	1	100	1	0	1	1
				% DE EFICIENCIA:		91 %	87 %	92 %	93 %

Tasa de acierto para la velocidad de 10 Hz



## EFFECTIVIDAD EN LA DETECCIÓN DE FALLO A LA VELOCIDAD DE 20 HZ

	TIPO DEFECTO					TIPO DEFECTO			
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL		EN BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL
1	1	0	0	1	51	1	1	1	1
2	1	1	1	1	52	1	1	1	1
3	1	1	1	1	53	1	1	1	1
4	1	1	1	1	54	1	1	1	1
5	1	1	1	0	55	1	1	1	1
6	1	1	1	0	56	1	1	1	1
7	1	1	1	1	57	1	1	1	0
8	1	1	1	0	58	1	1	1	1
9	1	1	1	1	59	1	1	0	1
10	1	1	1	1	60	1	1	1	1
11	1	1	1	1	61	1	1	1	1
12	1	1	1	0	62	1	1	1	1
13	1	1	1	1	63	1	1	1	1
14	1	1	1	0	64	1	1	1	1
15	1	1	1	1	65	1	1	1	1
16	1	1	1	1	66	1	1	1	1
17	1	1	1	1	67	1	1	1	1
18	1	1	1	1	68	1	1	1	1
19	1	1	1	1	69	1	1	1	1
20	1	1	1	1	70	1	1	1	0
21	1	1	1	0	71	1	1	1	1
22	1	1	1	1	72	1	1	1	1
23	1	1	1	0	73	1	1	1	0
24	1	1	1	1	74	1	1	1	1
25	1	1	1	1	75	1	1	1	1
26	1	1	1	1	76	1	1	1	1
27	1	1	1	1	77	1	1	1	1
28	1	1	1	1	78	1	1	1	1
29	1	1	1	0	79	1	1	0	1
30	1	1	1	1	80	1	1	1	0
31	1	1	1	1	81	1	1	1	1
32	1	1	1	1	82	1	1	1	1
33	1	1	1	1	83	1	1	1	1
34	1	1	1	1	84	1	1	1	1
35	1	1	1	0	85	1	1	1	1
36	1	1	1	1	86	1	1	1	1
37	1	1	1	0	87	1	1	1	1
38	1	1	1	1	88	1	1	1	1
39	1	1	1	1	89	1	1	1	1
40	1	1	1	0	90	1	1	1	0
41	1	1	1	0	91	1	1	1	1
42	1	1	1	0	92	1	1	1	1
43	1	1	1	1	93	1	1	1	0
44	1	1	1	0	94	1	1	0	1
45	1	1	1	1	95	1	1	0	0
46	1	1	1	1	96	1	1	1	1
47	1	1	1	0	97	1	1	1	1
48	1	1	1	1	98	1	1	0	0
49	1	1	1	0	99	1	1	1	0
50	1	1	1	1	100	1	1	1	1
				% DE EFICIENCIA:		100 %	99 %	94 %	75 %

Tasa de acierto para la velocidad de 20 Hz



## EFFECTIVIDAD EN LA DETECCIÓN DE TIPOS DE DEFECTO A LA VELOCIDAD DE 30 HZ

	TIPO DEFECTO					TIPO DEFECTO			
	BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL		EN BOLA	PISTA EXTERNA	PISTA INTERNA	NORMAL
1	1	1	1	1	51	1	1	1	1
2	1	1	1	1	52	1	1	1	1
3	1	1	1	1	53	1	1	1	1
4	1	1	1	1	54	1	1	1	1
5	1	1	1	1	55	1	1	1	1
6	1	1	1	1	56	1	1	0	1
7	1	1	1	1	57	1	1	1	1
8	1	1	0	1	58	1	1	0	1
9	1	1	0	1	59	1	1	0	1
10	1	1	1	1	60	1	1	0	1
11	0	1	1	1	61	1	1	1	1
12	1	1	1	1	62	1	1	0	1
13	0	1	0	1	63	1	1	0	1
14	1	1	0	1	64	1	1	1	1
15	1	1	0	1	65	1	1	1	1
16	1	1	0	1	66	1	1	0	1
17	1	1	1	1	67	1	1	1	1
18	1	1	1	1	68	1	1	1	1
19	1	1	1	1	69	1	1	0	1
20	1	1	1	1	70	1	1	1	1
21	1	1	1	1	71	1	1	1	1
22	1	1	1	1	72	1	1	1	1
23	1	1	1	1	73	1	1	0	1
24	1	1	1	1	74	1	1	0	1
25	1	1	1	1	75	0	1	1	1
26	1	1	1	1	76	1	1	1	1
27	1	1	1	1	77	1	1	1	1
28	1	1	1	1	78	0	1	1	1
29	1	1	1	1	79	1	1	0	1
30	1	1	1	1	80	0	1	1	1
31	1	1	1	1	81	1	1	1	1
32	1	1	1	1	82	1	1	1	1
33	1	1	1	1	83	1	1	1	1
34	1	1	1	1	84	1	1	1	1
35	1	1	1	1	85	1	1	1	1
36	1	1	1	1	86	1	1	1	1
37	1	1	0	1	87	1	1	1	1
38	1	1	1	1	88	1	1	0	1
39	1	1	1	1	89	1	1	1	1
40	1	1	1	1	90	1	1	1	1
41	1	1	1	1	91	1	1	0	1
42	1	1	1	1	92	0	1	1	1
43	1	1	0	1	93	1	1	1	1
44	1	1	1	1	94	1	1	1	1
45	1	1	1	1	95	1	1	1	1
46	1	1	1	1	96	0	1	1	1
47	1	1	0	1	97	1	1	0	1
48	1	1	1	1	98	1	1	0	1
49	1	1	1	1	99	1	1	1	1
50	1	1	1	1	100	1	1	0	1
				% DE EFICIENCIA:		93 %	100 %	75 %	100 %

Tasa de acierto para la velocidad de 30 Hz