



# XVI Congreso de Confiabilidad

San Sebastián, 3 y 4 de diciembre de 2014

**MANTENIMIENTO INTELIGENTE DE RODAMIENTOS, UN  
ENFOQUE BASADO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA**

# INTERÉS EN LA MONITORIZACIÓN DE LOS RODAMIENTOS

- La presencia e importancia de los rodamientos en vehículos y máquinas está fuera de toda duda.
- Los análisis de fiabilidad indican que los rodamientos son uno de los componentes que más averías sufren, sobre todo los que trabajan en condiciones adversas de funcionamiento.
- De cara al mantenimiento de los sistemas mecánicos existe un gran interés en conocer su estado en todo momento, al objeto de poder planificar su sustitución antes de que sufran roturas.

## RESUMEN (I)

- Se presenta un análisis de los modos de fallo y de las técnicas de CM aplicadas al mantenimiento de los rodamientos.
- Cuando hay que garantizar la calidad de los rodamientos, se hace necesario comprobar el estado de la producción completa tras su fabricación.
- Interesa utilizar pocos puntos para hacer rápida la comprobación de su estado.
- Se investiga un método automático de detección e identificación de fallos, conducido por datos y basado en el dominio de la frecuencia para conocer el estado de los mismos.
- Básicamente el método aquí utilizado combina una “extracción de características” en el dominio de la frecuencia, y un método de clasificación del estado de los rodamientos basado en máquinas de vectores soporte (MVS), cuya salida representará el estado “bueno”/”malo” del rodamiento.

## RESUMEN (II)

- Finalmente se presenta un sistema experimental de monitorización online de rodamientos desarrollado por Tecnalía en colaboración con Fersa Bearings.
- Se ha aplicado a rodamientos de camiones con alimentación autónoma (harvesting) y comunicación wireless en el que se mide la temperatura y la velocidad del eje.

## LAS SEÑALES

- Para realizar el análisis, se han utilizado señales de vibración procedentes de rodamientos sanos y con fallo.
- Los fallos se han ubicado en el aro interior, exterior y en las bolas.
- Se han utilizado las señales publicadas para su uso libre, en la base de datos “Bearing Data Center” de la Case Western Reserve University.
- Las señales se han adquirido usando acelerómetros ubicados en el lado del eje de un motor, que llevaba calado un eje y una carga, por medio de sendos rodamientos.
- La severidad del fallo inducidos se ha calibrado utilizando dos parámetros: diámetro y profundidad, tal como se refleja en la siguiente tabla.

# FICHEROS DE SEÑALES, FALLOS INDUCIDOS Y VELOCIDAD DE GIRO

Ubicación del fallo	Diámetro-Profundidad mm	Velocidad (rpm)	Ficheros
Pista interior	0,1778 – 0,2794	1797	105, 106, 107 y 108
Pista interior	0,3556 – 0,2794	1796	169, 170, 171 y 172
Pista interior	0,5334 – 0,2794	1797	209, 210, 211 y 212
Pista interior	0,7112 – 1,27		3001, 3302, 3003 y 3004
Pista exterior	0,1778 – 0,2794	1796	130, 131, 132 y 133
Pista exterior	0,3556 – 0,2794	1796	197, 198, 199 y 200
Pista exterior	0,5334 – 0,2794		234, 235, 236 y 237
Bolas	0,1778 – 0,2794	1796	118, 119, 120 y 121
Bolas	0,3556 – 0,2794	1796	185, 186, 187 y 188
Bolas	0,5334 – 0,2794		222, 223, 224 y 225
Bolas	0,7112 – 3,81		3005, 3306, 3007 y 3008
Sin fallos		1796	97, 98, 99 y 100

## CARÁCTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LOS RODAMIENTOS

Las características dimensionales de los rodamientos ensayados, que a su vez caracterizan las frecuencias fundamentales de los fallos son:

Número de bolas:	8
Diámetro interior:	25,00 mm
Diámetro exterior:	52,00 mm
Diámetro de las bolas:	7,94 mm
Altura:	15,00 mm
Diámetro efectivo:	39,04 mm

## FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DE LOS FALLOS

Las frecuencias fundamentales de los defectos se pueden expresar como un factor adimensional de la frecuencia de rotación expresada en Hz, es decir, en revoluciones por segundo. Para estos rodamientos dichos factores son:

Pista anillo interior:	$k=4,81$
Bolas:	$k=2,36$
Pista anillo exterior:	$k=3,19$
Portabolas:	$k=0,4$

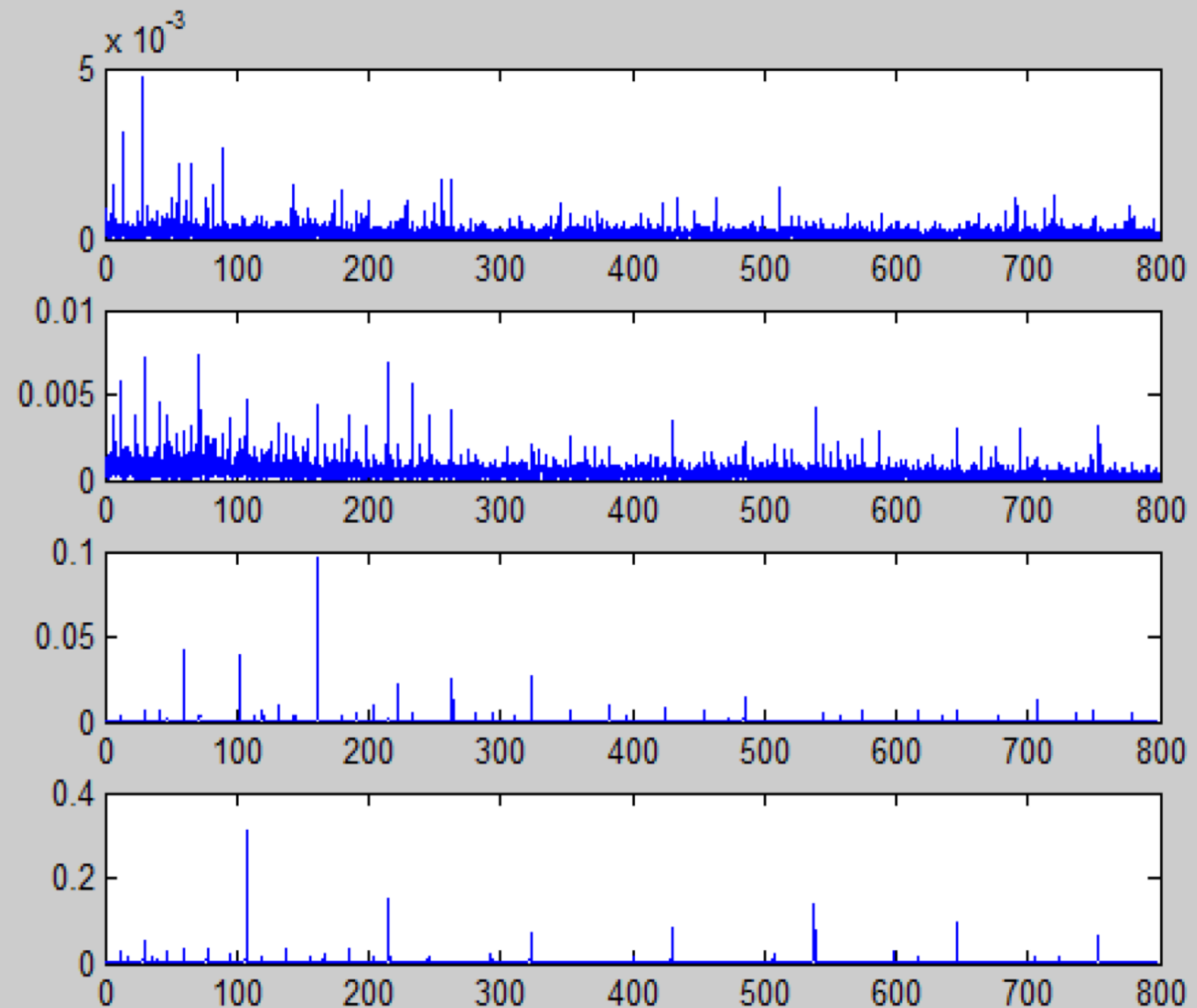
A una velocidad de giro de 1796 rpm, le corresponden 29,93 Hz, por lo que en un rodamiento que gire a esa velocidad, se tienen las siguientes frecuencias de fallo:

Frecuencias fallos pista interior a 1796 rpm:	144,10 Hz
Frecuencias defectos en pista exterior a 1796 rpm:	95,36 Hz
Frecuencias defectos en bolas a 1796 rpm:	70,54 Hz

Se garantiza que en cada giro se pasa varias veces por el fallo.



# ESPECTRO SIN FALLOS Y CON FALLOS EN BOLA, ANILLO INTERIOR Y EXTERIOR



# CONTROL DE CALIDAD DE LOS RODAMIENTOS

- Los fallos en los rodamientos pueden surgir durante su vida operativa o durante su proceso de fabricación.
- La tendencia actual es proporcionar una garantía de calidad del total de la producción de forma que se desechen aquellos que tengan defectos.
- Para ello, tras su fabricación se pueden monitorizar los rodamientos durante un corto espacio de tiempo al objeto de monitorizar su estado.
- Como consecuencia, se podrá detectar si un rodamiento tiene defectos de fabricación, e incluso se podrán adjuntar las frecuencias vibratorias que presentan de forma que se puedan comparar y analizar su evolución a lo largo del tiempo.
- Un aspecto fundamental es que el tiempo empleado en la detección de su estado sea muy pequeño.

## MODOS DE FALLO

- Los modos de fallo son una descripción de los distintos tipos de fallo que se pueden presentar.
- Las causas u origen de los fallos son aquellos sucesos que dan lugar a la aparición de los distintos modos de fallo.
- Los modos de fallo en un rodamiento se pueden reducir a:
  - Fallos en las bolas.
  - Fallos en la pista interior.
  - Fallos en la pista exterior.
  - Fallos en el portabolas.

En la mayoría de los casos, el anillo exterior se mantiene estacionario mientras que el anillo de rodadura interno y las bolas giran. La mayoría de los defectos en el lado interior del anillo de rodadura exterior, tales como grietas o picaduras, se producen en los lugares expuestos a la zona de carga, ya que están directamente bajo la fuerza aplicada.

## CAUSAS DE LOS FALLOS (I)

- La vida de servicio normal de un rodamiento que gira bajo una carga está determinada por:
  - La fatiga del material, y
  - El desgaste en las superficies de rodadura.
- Las causas de los fallos prematuros de los rodamientos se pueden deber un gran número de factores, siendo los más comunes:
- La fatiga. Los daños por fatiga comienzan con la formación de grietas por debajo de la superficie de apoyo. Con el paso del tiempo, las grietas progresan hacia la superficie donde aparece material procedente de las áreas de contacto.
- El desgaste. Su origen reside principalmente en la suciedad y las partículas extrañas que entran en el rodamiento por causa de un sellado inadecuado o debido a un lubricante contaminado.

## CAUSAS DE LOS FALLOS (II)

- La deformación plástica. La deformación plástica de las superficies de apoyo se puede producir cuando el rodamiento está sometido a una carga excesiva mientras está parado o sometido a movimientos pequeños. El resultado es la deformación de la pista de rodadura.
- La corrosión. El daño por corrosión se produce cuando el agua, ácidos u otros contaminantes presentes en el aceite entran en el interior de los rodamientos. Su causa puede deberse a juntas dañadas, lubricantes ácidos, o condensación que se produce cuando los rodamientos se enfrían desde una temperatura de funcionamiento más alta en una atmósfera muy húmeda. El resultado es la formación de óxido en las superficies de rodadura que produce un funcionamiento irregular y ruidoso.

## CAUSAS DE LOS FALLOS (III)

- La formación de estrías (brinelling). Se manifiesta por medio de indentaciones espaciadas regularmente, y distribuidas sobre toda la circunferencia de rodadura. Tres posibles causas de la formación de estrías son:
  - la sobrecarga estática, que conduce a la deformación plástica de las pistas de rodadura, cuando un rodamiento estacionario está sujeto a vibraciones y cargas de choque y cuando un rodamiento forma el bucle para el paso de la corriente eléctrica.
- Una mala lubricación. Una lubricación inadecuada es una de las causas comunes de fallos prematuros de los rodamientos, ya que produce deslizamiento, aumento de la fricción y generación de calor. En la región de contacto hertziano, cuando hay lubricante insuficiente, las superficies de contacto se sueldan.

## CAUSAS DE LOS FALLOS (III)

- Una instalación defectuosa. Una instalación incorrecta puede incluir efectos tales como una precarga excesiva en dirección radial o axial, desalineación, ataques flojos o daños debidos a la aplicación de una fuerza excesiva durante el montaje de los componentes del rodamiento.

## VARIABLES EN CM APLICABLES A RODAMIENTOS

Se pueden aplicar un cierto número de variables para monitorizar el estado de los rodamientos tanto a fallos distribuidos como localizados. Entre ellas, se pueden citar:

- Medidas de emisión acústica.
- Vibraciones.
- Temperatura.
- Partículas en el aceite lubricante.
- Intensidad de corriente en el caso de motores y generadores (MCSA, Motor Current Signature Analysis).



# VARIABLES DE MAYOR INTERÉS EN MONITORIZACIÓN DE RODAMIENTOS

De todas las variables anteriores, las que mejor resultado han dado han sido las medidas de emisión acústica y las de vibraciones.

Ambas se producen cuando un elemento del rodamiento pasa sobre un defecto. Se genera:

- Una emisión acústica en forma de sonido y
- Se producen vibraciones en los elementos del rodamiento, que se transmiten a su eje.

En este último efecto, cuando una bola pasa por un fallo genera vibraciones mecánicas.

Al entrar la bola en el fallo el rodamiento se comporta como una vibración en forma de respuesta al impulso, mientras que al salir del fallo lo hace como una vibración en forma de respuesta al escalón.

Las vibraciones contienen la firma de los fallos y su medida tiene un gran interés en la monitorización de los rodamientos.

# CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA CONDUCTIDA POR DATOS



- Extracción de características: Se transforma una señal en un conjunto reducido de características que contienen la firma del fallo.
- Selección de características: se reduce la dimensionalidad del espacio de características para evitar las carreras de dimensionalidad del clasificador.
- Clasificación: en función de las entradas se clasifica el estado del rodamiento como bueno/malo, o según la severidad del fallo.

# DOMINIOS DE PROCESADO DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN

Frecuentemente hay que procesar la señal para poder extraer las características.

El procesamiento de las señales se puede realizar en distintos dominios:

- Dominio del tiempo, a través de parámetros como el valor eficaz, la kurtosis y el factor de cresta o utilizando la transformada de Hilbert o de Hilbert-Huang.
- Dominio de la frecuencia, en el que se han utilizado diversos parámetros. En este proyecto se ha utilizado la PSD (Power Spectral Density) aplicando la transformada de Welch.
- Dominio tiempo-frecuencia, por medio de la distribución de Wigner-Ville, Wavelets continua, discreta o de paquetes, etc.

En el caso que nos ocupa se usará en dominio de la frecuencia aplicado la transformada de Welch.

## CLASIFICACIÓN

Cuando se quiere realizar una monitorización automática se pueden utilizar técnicas de clasificación habituales en inteligencia artificial, cuya salida nos detecta el estado en el que se encuentra el rodamiento.

Estos métodos pueden ser con o sin aprendizaje (supervisados o no supervisados).

En la actualidad se utilizan mucho, entre otros métodos, las redes neuronales artificiales a las que se aplica a la entrada unos parámetros (vector de características) cuyos valores contienen la “firma de los fallos” y generan una salida que representa el estado del rodamiento.

En este proyecto únicamente se pretende conocer el estado bueno/malo del rodamiento y se va a utilizar una máquina de vectores soporte (SVM, Support Vector Machine) para realizar la clasificación.

## CARÁCTER GLOBAL Y LOCAL DE LOS FALLOS

Los fallos provocan vibraciones más o menos periódicas cuando los elementos rodantes pasan por ellos.

En principio se puede hablar de efectos globales y locales. Por el hecho de pasar sobre el fallo de forma periódica, se puede pensar en la existencia de una frecuencia fundamental (las anteriormente calculadas) y de unos armónicos de dicha frecuencia fundamental. Serían los efectos globales y son de baja frecuencia.

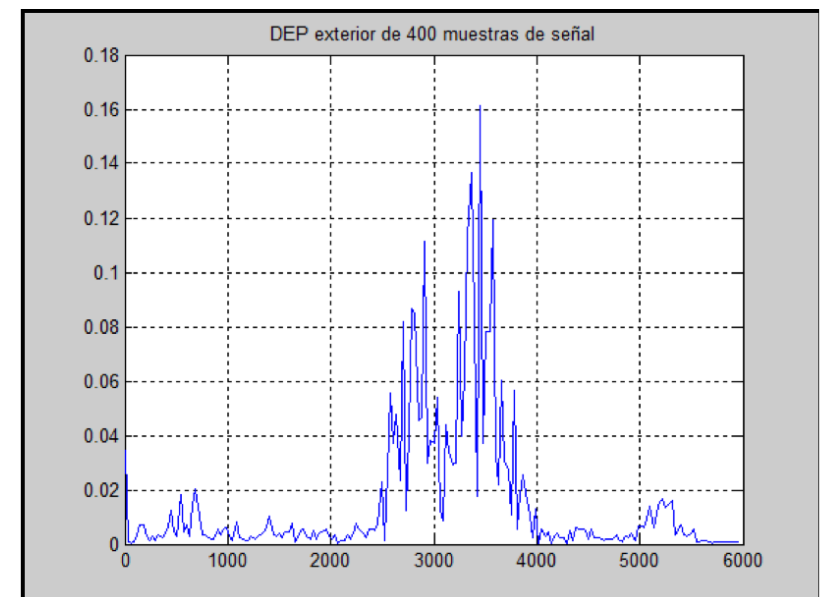
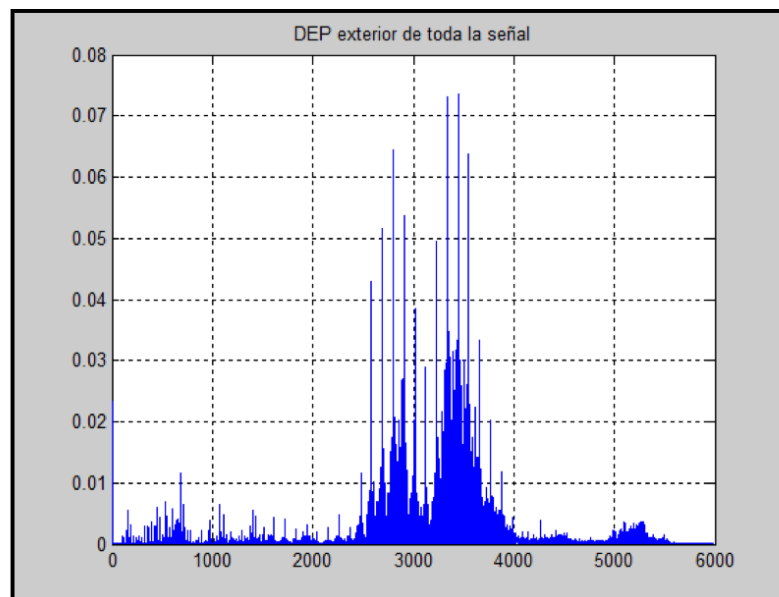
Sin embargo, por el hecho de generarse vibraciones al paso por el fallo, se producirán oscilaciones de elevada frecuencia que corresponden a efectos locales.

Cuando se desea obtener las frecuencias de fallo hay que analizar un tramo de señal que contenga un número suficiente de períodos al objeto de trabajar con una resolución adecuada. En el caso de los efectos globales, habrá que trabajar con un número suficiente de giros completos del eje del rodamiento.

## EFECTO DEL NÚMERO DE MUESTRAS ANALIZADAS

El efecto de tomar un número relativamente pequeño de períodos es que los picos de frecuencia se vuelven más anchos, disminuyendo la resolución espectral.

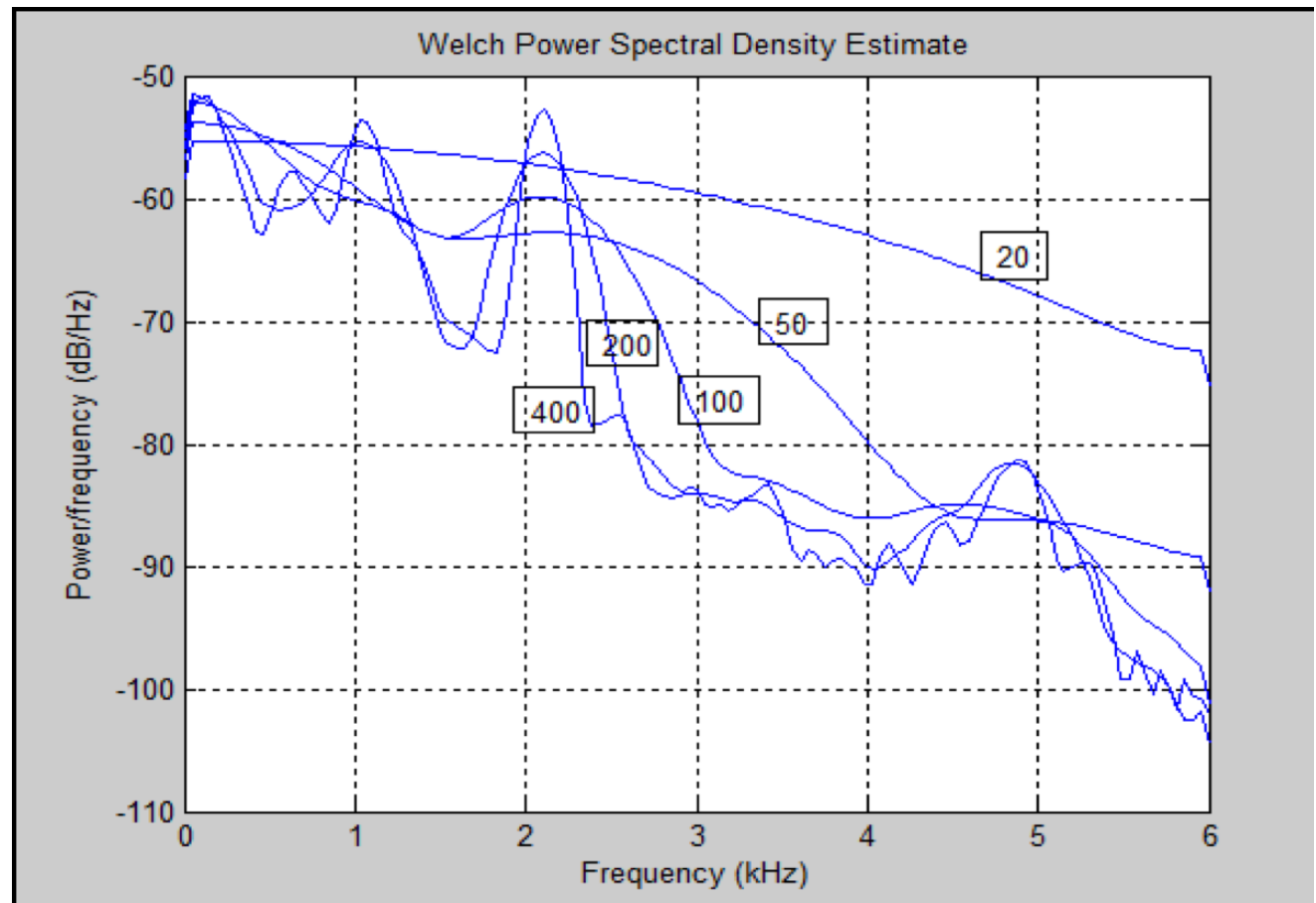
En la figura se muestra el espectro de la envolvente de la señal de un rodamiento con un fallo en la pista exterior, analizando toda la señal (izquierda) y analizando únicamente el tramo correspondiente a algo más de una vuelta (derecha), tramo en el que la presencia de un fallo se repite únicamente unas cuatro a cinco veces dependiendo del fallo.



## DEP CON DISTINTO NÚMERO DE PUNTOS

DEP de una señal tomando 20, 50, 100, 200 y 400 muestras.

Con 400 muestras se obtiene suficiente resolución de los picos.

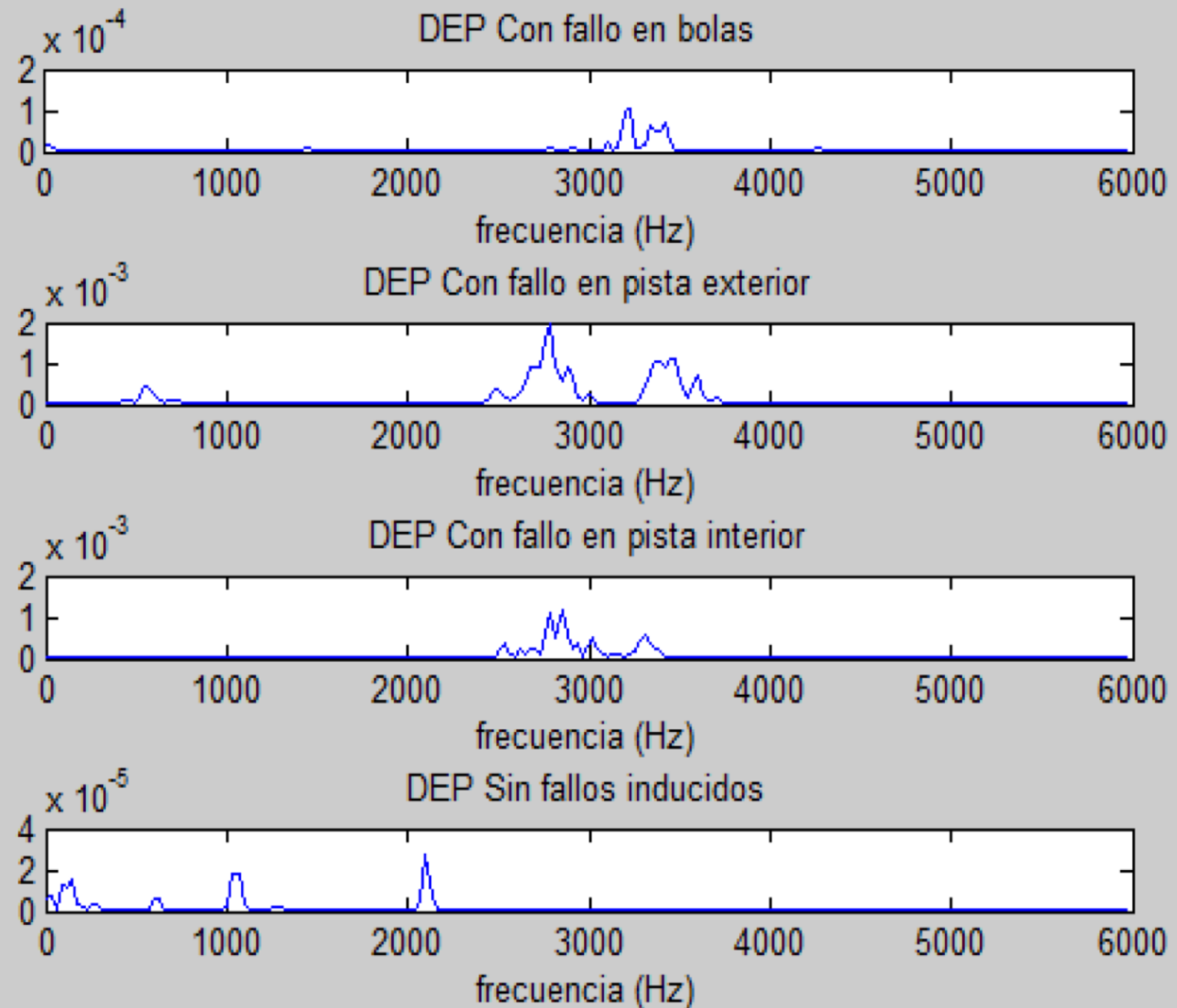


# OBTENCIÓN DE SEÑALES PARA EL ANÁLISIS, ENTRENAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS

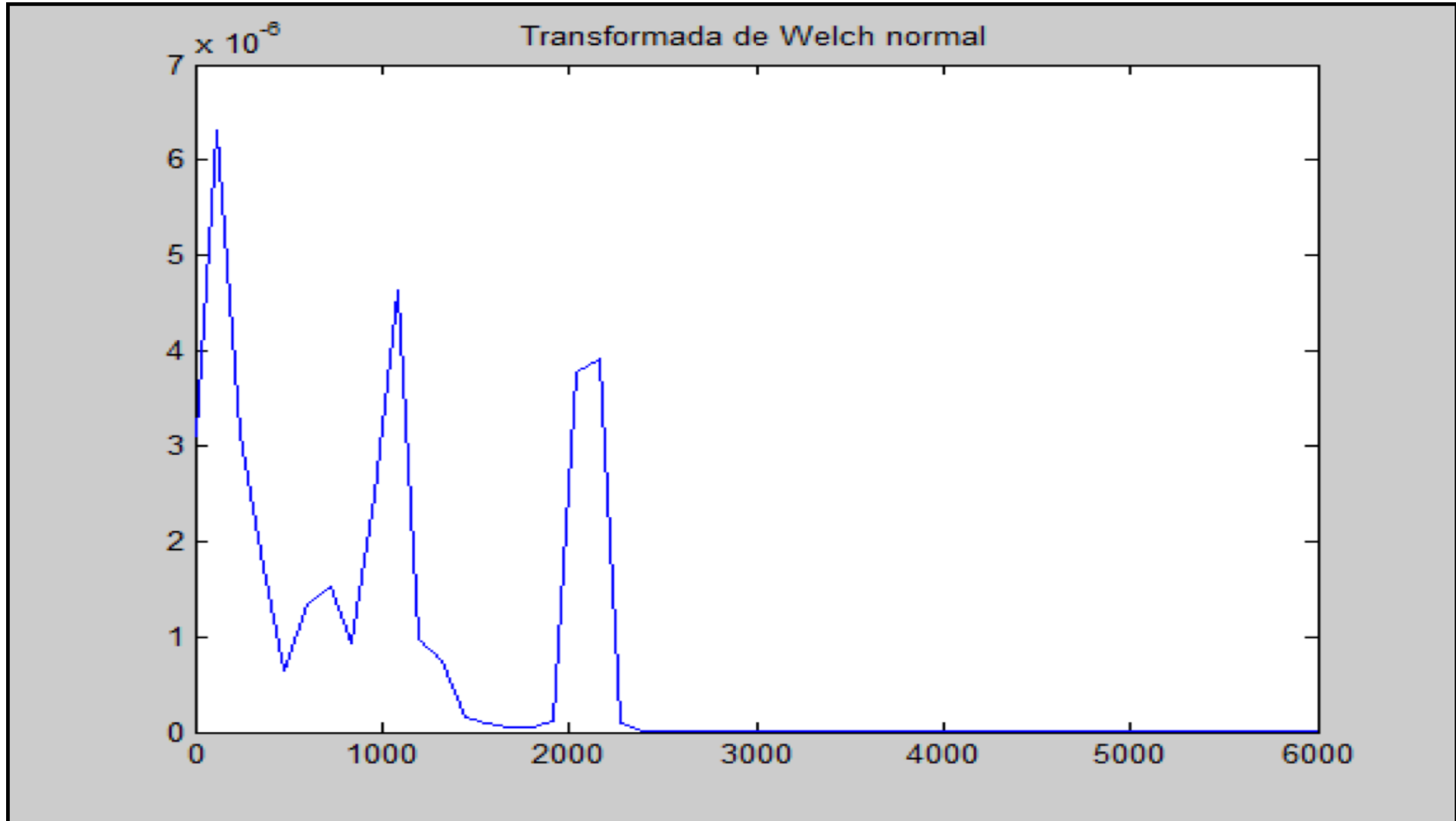
- Dado que las señales que se han adquirido y publicado en la base de datos tienen una duración muy elevada, se va a dividir cada señal en 129 señales de 400 muestras cada una.
- El motivo de tomar cada señal de 400 muestras es que ese número de muestras equivale a un giro del eje del rodamiento de más de dos vueltas completas, que es más que suficiente para detectar oscilaciones subgiro.
- De esta forma se dispondrá de un número suficientemente elevado de señales para hacer el entrenamiento y la clasificación.



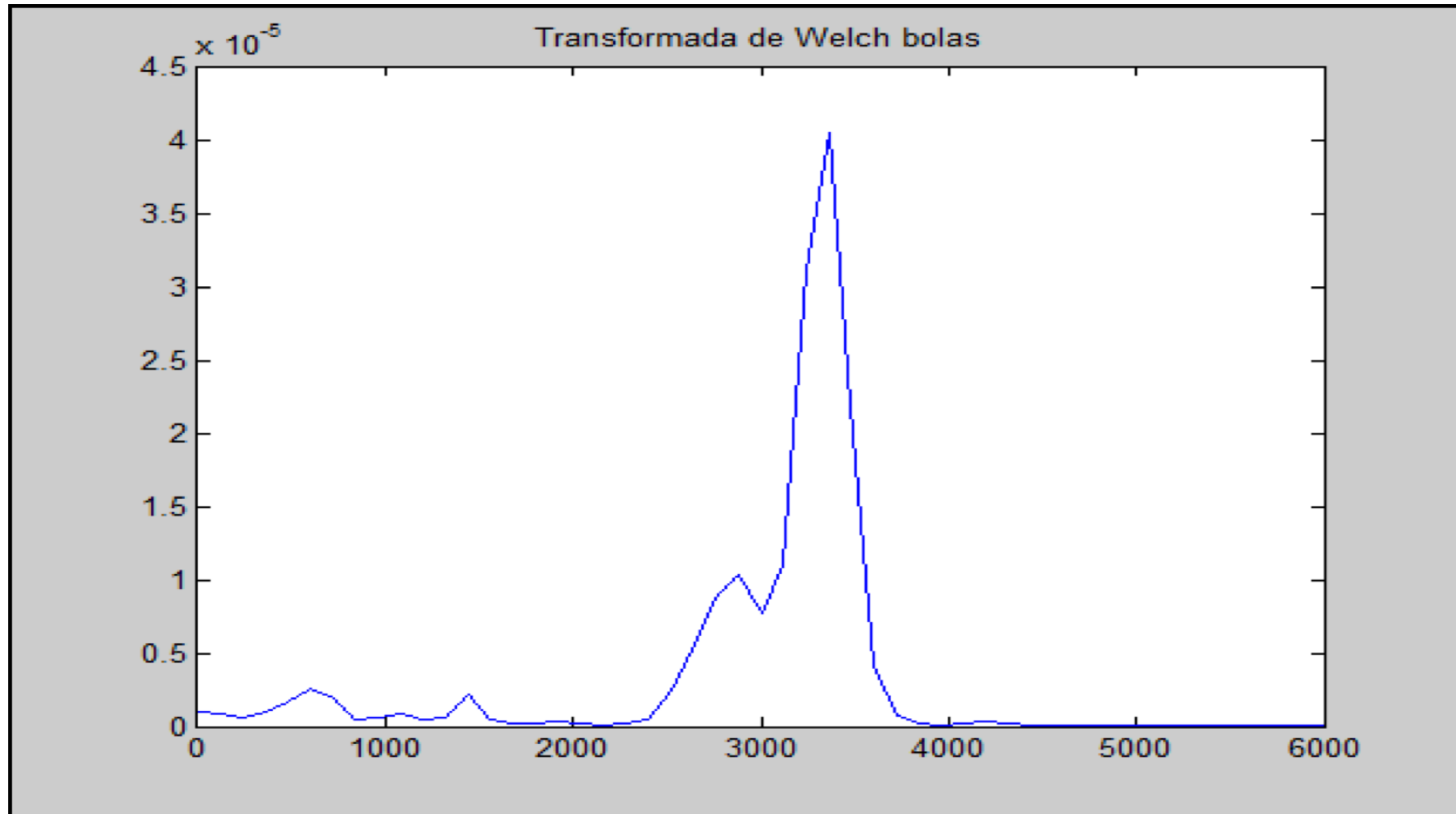
# DEP CARÁCTERÍSTICAS DE FALLOS



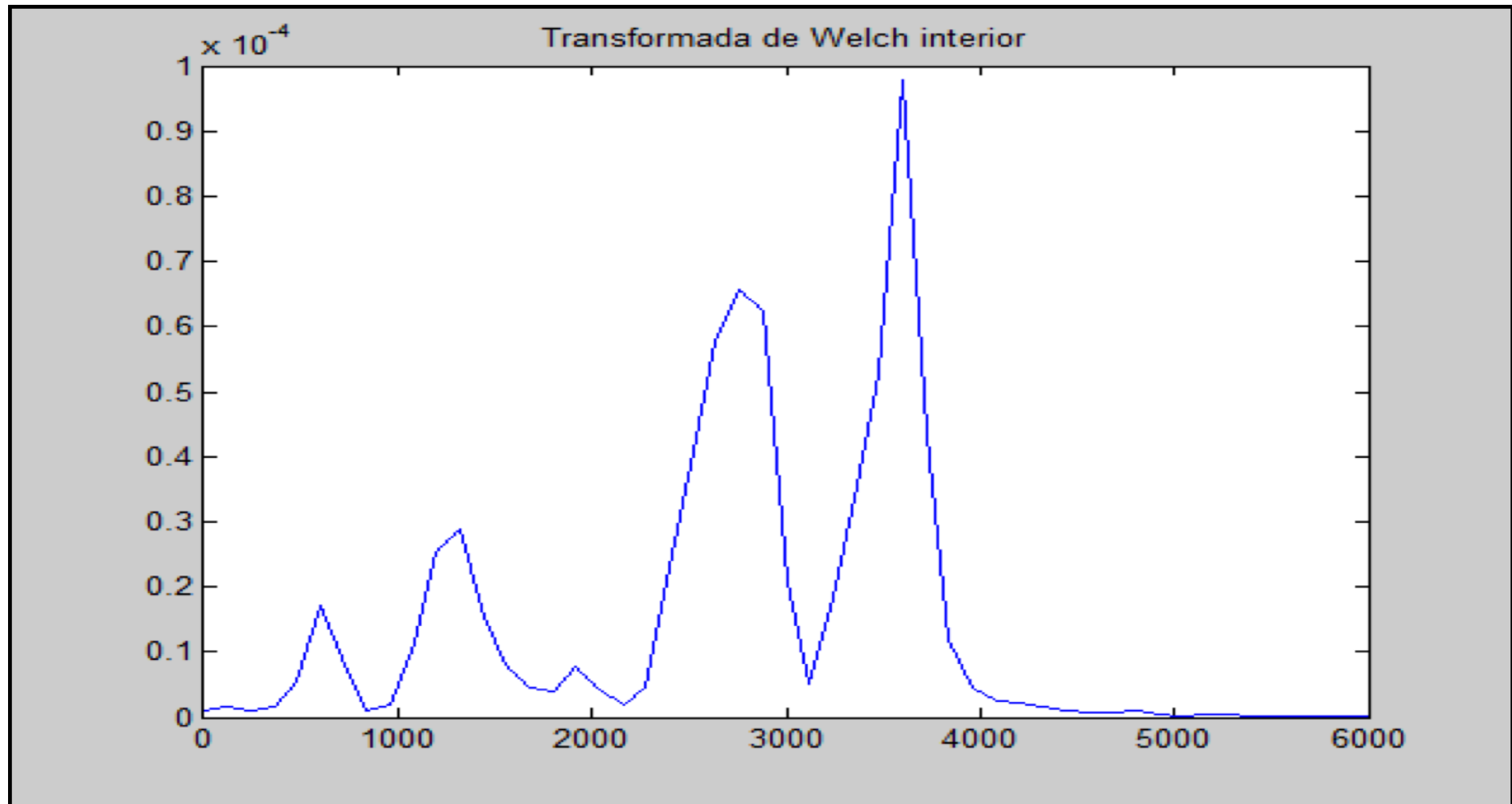
# DEP TÍPICA CON 400 MUESTRAS SIN FALLO



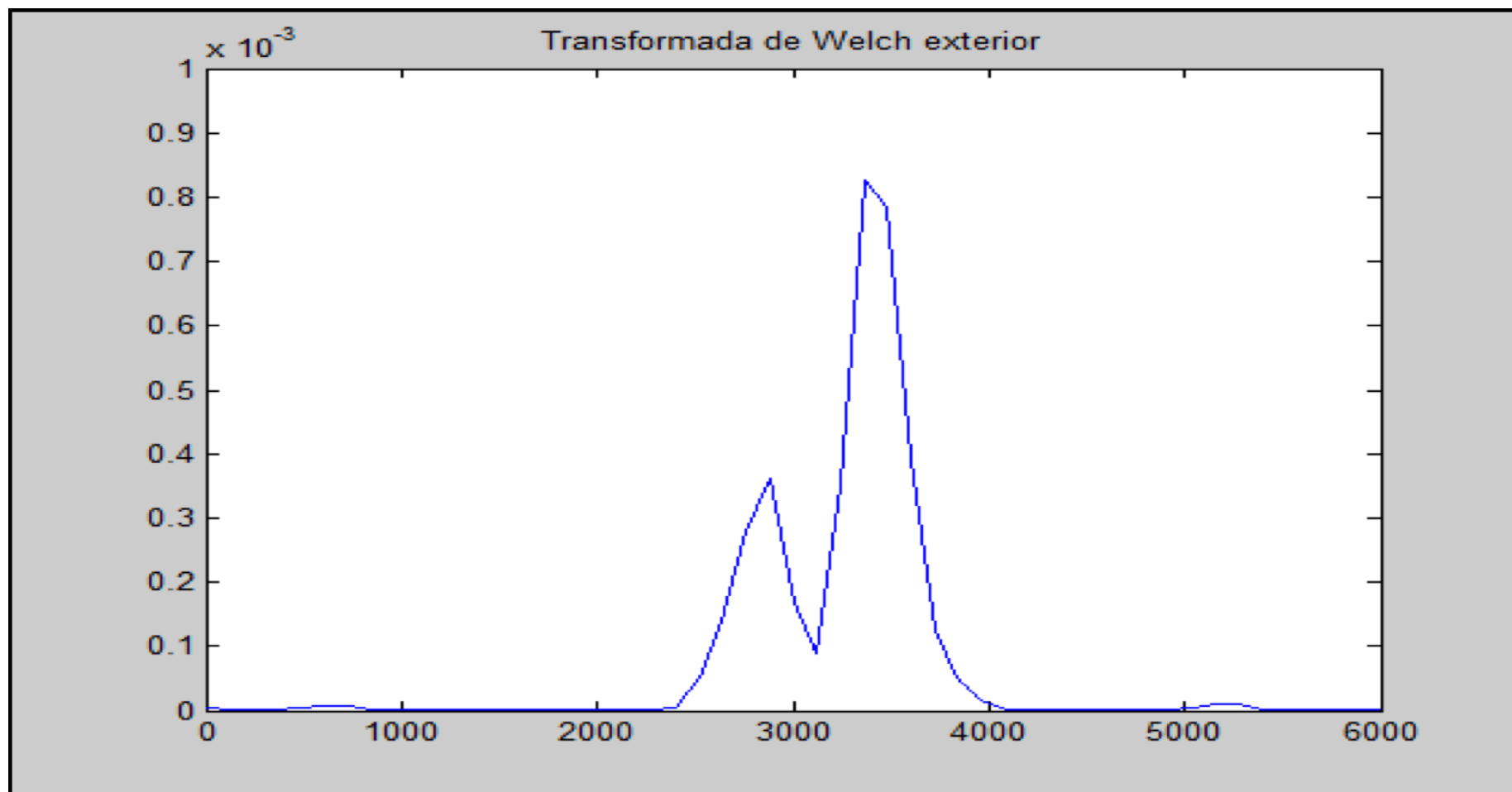
# DEP TIPICA CON 400 MUESTRAS CON FALLO EN BOLAS



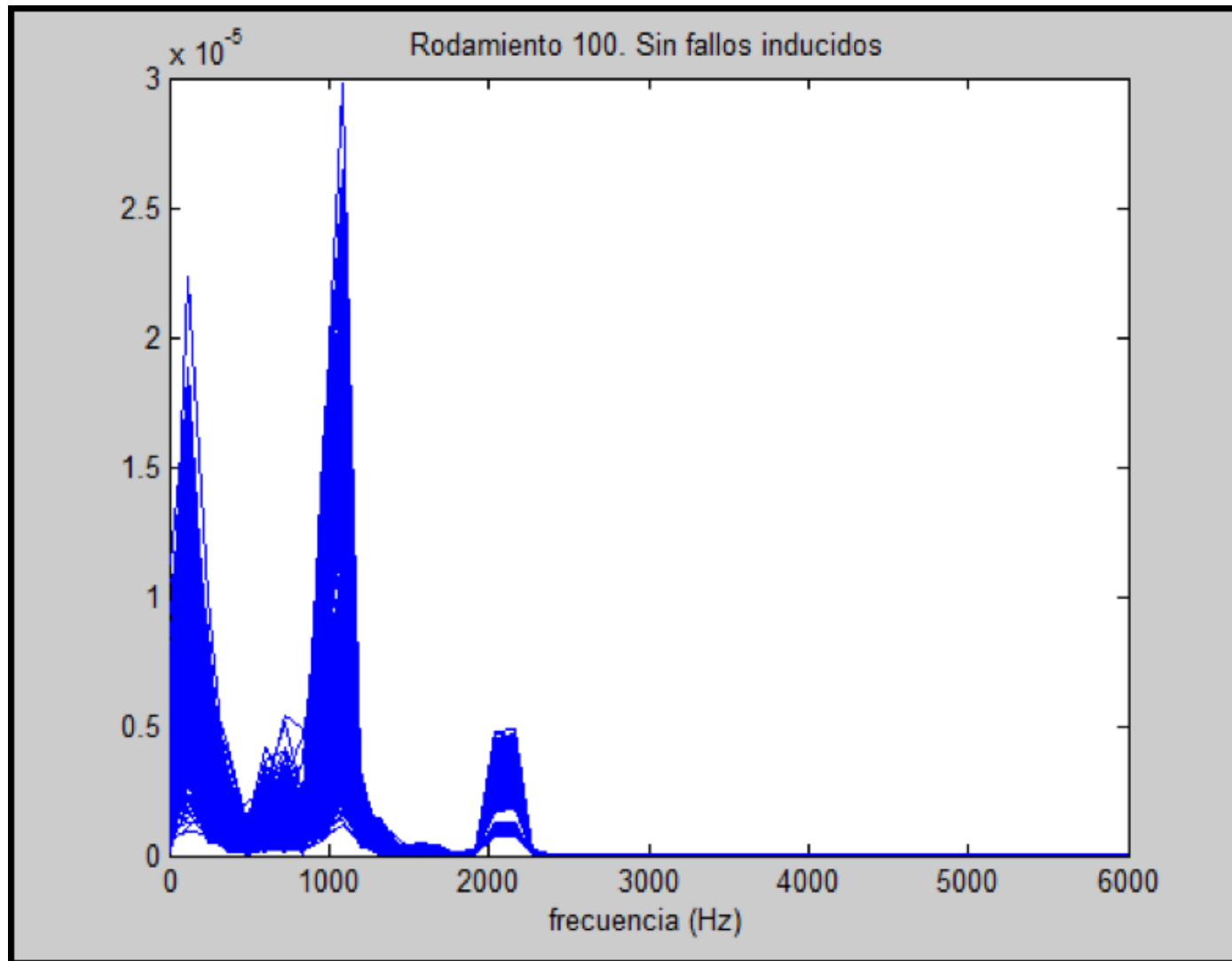
# DEP TIPICA CON 400 MUESTRAS CON FALLO EN ANILLO INTERIOR



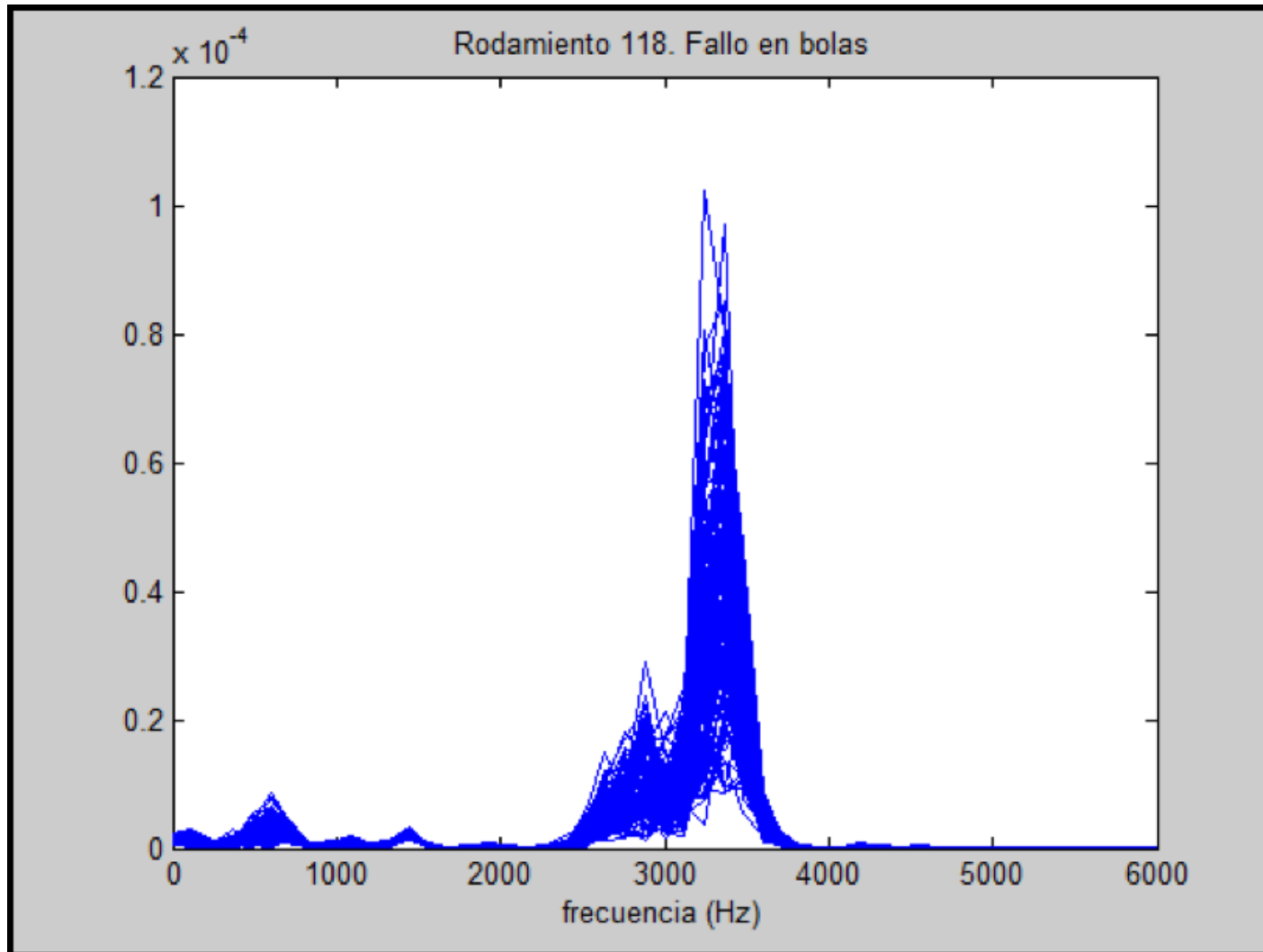
# DEP TIPICA CON 400 MUESTRAS CON FALLO EN ANILLO EXTERIOR



# DEP DE 129 SEÑALES DE RODAMIENTOS SIN FALLO



# DEP DE 129 SEÑALES DE RODAMIENTOS CON FALLO EN BOLAS



## SEÑALES PARA LA CLASIFICACIÓN (ENTRENAMIENTO Y TEST)

La clasificación en rodamientos sin fallos inducidos y con fallo se ha realizado utilizando una máquina de vectores soporte. Tanto con las señales, como con los rodamientos disponibles, se ha seguido el procedimiento hold-out por el que se asigna el 66,6% de datos para el entrenamiento y el 33,3% para la clasificación. Para ello:

- Se van a utilizar un 66% de los rodamientos para entrenamiento y el resto para la clasificación.
- Dado que las señales abarcan mucho tiempo, cada una se ha dividido en 129 señales, de forma que se disponga de suficientes datos para alimentar el clasificador. De esta forma, el 66% de las señales se usarán para entrenamiento y el resto para la realización de los test al objeto de comprobar el resultado de la clasificación.



# Monitorización de rodamiento de camión

Tecnalía, en colaboración con Fersa Bearings, ha realizado un proyecto de investigación sobre la monitorización on-line de rodamientos de camión.

La idea es desarrollar un sistema de monitorización con alimentación autónoma y transmisión wireless de la información.

Se mide la temperatura interior y exterior del rodamiento así como la velocidad en revoluciones por minuto y la tensión del generador utilizado para la alimentación autónoma del sistema. La velocidad se obtiene a partir de la frecuencia de la señal obtenida del generador.

# DESARROLLO PARA MONITORIZACIÓN DE RODAMIENTO DE CAMIÓN



THANK YOU



[www.tecnalia.com](http://www.tecnalia.com)

tecnalia  Inspiring  
Business

