



# XVI Congreso de Confiabilidad

San Sebastián, 3 y 4 de diciembre de 2014

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN  
RUEDAS DE FERROCARRIL

# DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN RUEDAS DE FERROCARRIL

## Indice

### Antecedentes

- 1- Fallos en las ruedas de ferrocarril
- 2- Efectos de los fallos de ruedas
- 3- Fuentes de señal en la vía
- 4- Comportamiento en campo próximo
- 5- Detección automática de fallo
- 6- Preprocesado de la señal original
- 7- Análisis de picos
- 8- Extracción de características
- 9- Clasificación

### Conclusión

## Antecedentes

**Actualmente** tiene gran interés el conocimiento del estado de las ruedas de todo tipo de trenes y tranvías **por razones de mantenimiento, seguridad y confort.**

**Existen muchas causas** que pueden provocar fallos en las ruedas, que **se traducen** en la aparición de **planos** de rueda, **microfisuras**, etc.

Como consecuencia de tales fallos, **las ruedas** sufren un mayor desgaste originando **vibraciones** que afectan al estado de los elementos rodantes y de los raíles, y a la comodidad y seguridad de los pasajeros.

Al objeto de detectar el estado de las ruedas, **Nem Solutions ha monitorizado** un rail del metro de Bilbao.

Se ha utilizando para ello, entre otras, **una galga extensométrica colocada en posición vertical**, y se han medido las deformaciones que sufre la galga al paso de trenes, algunas de cuyas ruedas presentan fallos.

Se analizan las **señales obtenidas** por Nem Solutions al paso sobre el sensor de convoyes compuestos por **cinco unidades** (diez ejes). Algunas de las señales son incompletas

No se ha podido realizar un filtrado **antialiasing**, por lo que la señal no está limitada en banda antes del muestreo, como consecuencia este ha tenido que ser muy alto del orden es de **25.000 muestras/segundo**, el resultado es que contiene mucho ruido.

## 1. FALLOS EN LAS RUEDAS DE FERROCARRIL.

La rodadura de las ruedas de tren está sujeta a varios mecanismos que pueden **provocar fallos** por la presencia de irregularidades sobre su superficie, que modifican su **geometría nominal**.

Estos “errores de forma” inducen **tensiones mecánicas** elevadas tanto en los vehículos como en la pista de rodadura, generan **vibraciones de tipo impulsivo** y aumentan considerablemente el ruido emitido.

Los defectos globales, conocidos como defectos de **falta** de redondez o de **poligonalización**, se deben a un proceso de desgaste que normalmente se inicia por una combinación de **varias causas**, entre las que se encuentran:

- El comportamiento **dinámico rueda-raíl**,
- Las características del **trazado** en términos de curvas,
- El estado de las **vías**.

**Los planos** de rueda son fallos que se producen en las ruedas de los vehículos por desgaste del material, perdiendo en algún punto la rueda su curvatura y apareciendo una superficie plana.

Normalmente aparecen cuando se **bloquea la rueda** como consecuencia de un frenado del tren, como resultado de un freno defectuoso o mal ajustado, o una fuerza de frenado que **excede** temporalmente a la **fuerza de fricción** del conjunto rueda-raíl.



Figura 1. Ilustración de un plano de rueda [1].

Una **segunda razón** por la que se generan los planos de rueda es por **una reducción** de las fuerzas locales de **adhesión** rueda-raíl, que le lleva a deslizar. Esto último puede suceder por la presencia en el raíl de nieve, lubricantes **o de hojas**, sobre todo en otoño.

El **efecto abrasivo por el hecho de patinar** causa un alto desgaste de la superficie de rodadura (un plano de rueda), con longitudes que van típicamente de **20 a más de 100 mm**. La figura 1 muestra un ejemplo de un plano de rueda producido por abrasión.

## 2. EFECTOS DE LOS FALLOS DE RUEDAS.

Como se ha comentado, las ruedas no son perfectas, por lo que pueden presentar una serie de **defectos** que a su vez producen ciertos **efectos mecánicos**, entre los que cabe citar:

- **Variación del radio** de una rueda a otra por tolerancias de fabricación y por desgaste. Esto provoca que **cada rueda genera una frecuencia de giro distinta** de las demás [2].
- Aparición de **microfisuras en las ruedas** [3]. **Provocan vibraciones de pequeña amplitud y alta frecuencia**, por lo que se trata de fenómenos muy locales y periódicos, ya que cada vez que se produce un giro de la rueda se generan las vibraciones.

- Aparición de **planos en ruedas**, es decir, zonas en las que la rueda, por efecto del desgaste, se ha “aplanado”, tomando forma plana, en lugar de ser arco de circunferencia [4]. Se traduce en fenómenos locales cuando la zona plana hace contacto con la vía, produciendo una **fuerza de tipo impulsivo que da lugar a la aparición de vibraciones sobre la vía.**

### 3. FUENTES DE SEÑAL EN LA VÍA.

Al analizar las señales medidas en el punto de una vía en que se ubica el sensor, hay que tener en cuenta dos situaciones completamente distintas por la procedencia de las señales captadas por el sensor [5].

- Una primera corresponde a **las señales cuando la rueda está todavía lejos del sensor.**
- Una segunda que corresponde a las señales obtenidas cuando una rueda del tren está **próxima al sensor** de forma que la **deformación** ocasionada por el **paso de las ruedas** sobre la vía predomina frente al resto de señales de distintas procedencias.

Esta segunda da lugar a un pico producido por la deformación de la vía al pasar la idea.

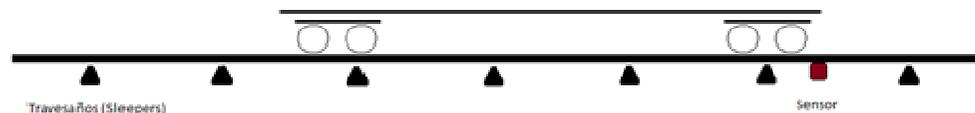
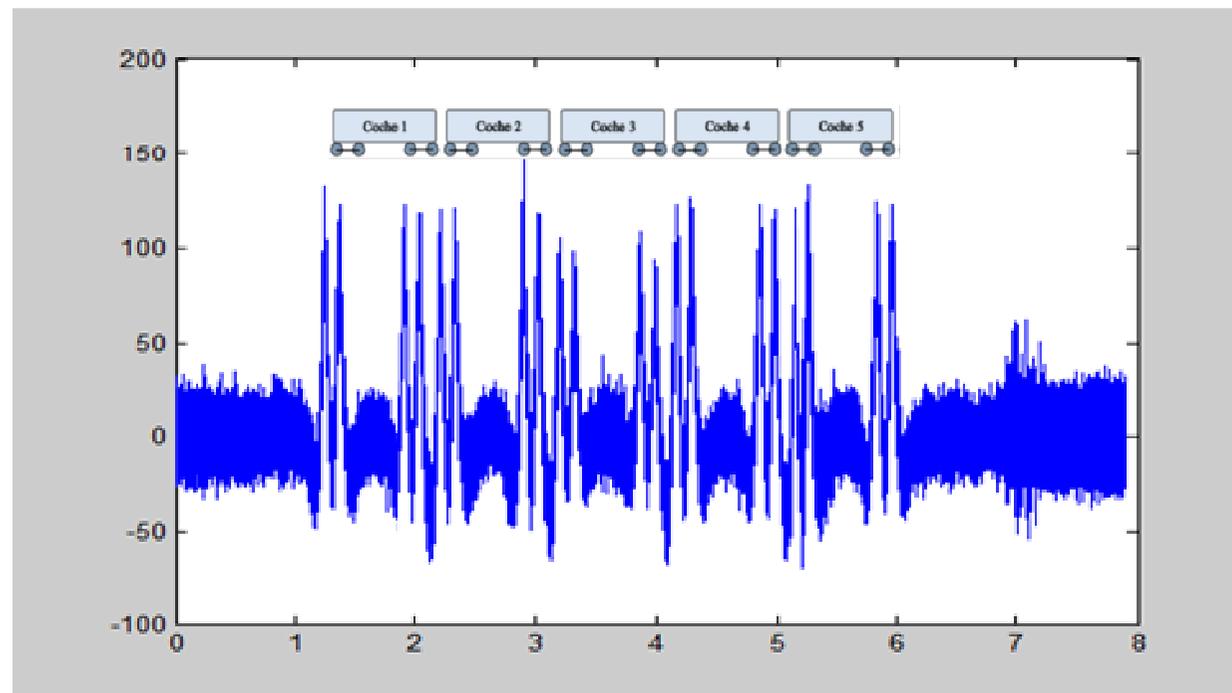


Figura 2. Representación de la adquisición de datos en campo próximo.

**Además** de las vibraciones originadas por los fallos, estarán presentes:

- Señales de ruido que se generan en campo lejano.
- Los **50 Hz** inducidos por la red eléctrica.
- Señales de ruido eléctrico producido por **los motores** y por la interacción **pantógrafo-catenaria** [6].
- También aparecerán los **modos de vibración** de la vía excitados al paso del tren.
- Las vibraciones producidas por todos los **elementos rotativos**.
- Interacción **rail-suelo** (placa, balasto etc.).

En la figura 5 se muestra una de las señales obtenidas, en la que se aprecia un tren que está compuesto con **cinco coches**. Como cada coche tiene cuatro ruedas, **dos del bogie delantero y dos del trasero**, en total aparecen los **veinte picos** correspondientes a las veinte ruedas.



De todas esas **señales** las que **tienen interés** son las vibraciones que provocan los **fallos de rueda** en la vía, por lo que el resto se pueden filtrar sin afectar a la detección de los fallos.

**El número de sensores** a utilizar para garantizar la medida de los fallos en rueda dependerá del espacio recorrido por la rueda en un giro completo y del espacio en que las oscilaciones producidas por el fallo no se atenúan.

## 4. COMPORTAMIENTO EN CAMPO PRÓXIMO DE RUEDA CON ZONA PLANA.

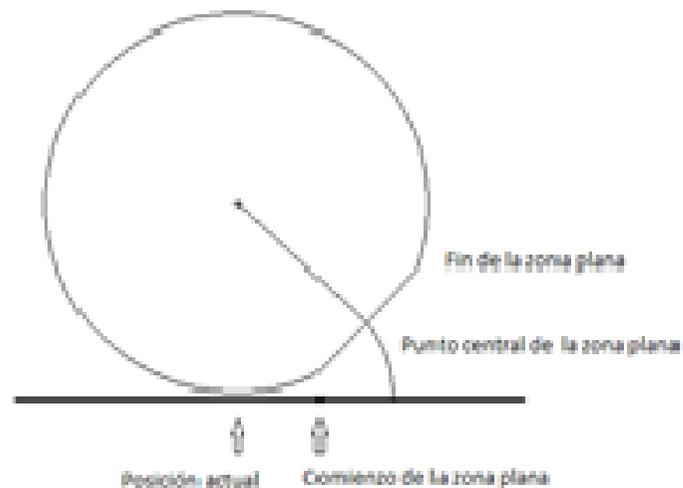


Figura 3. Plano de rueda.

En la situación representada en la figura 3, la rueda está a punto de entrar en la zona plana.

Pasado el tiempo en que la rueda realiza un giro equivalente al plano de rueda, se producirá un “**choque**” (**impacto**) de la **zona plana de la rueda con la vía con la vía**, por lo que se producirán vibraciones en la vía en respuesta al impacto.

Su **amplitud dependerá**:

- De la **magnitud** de la zona plana.
- De la **velocidad** del tren.
- Del **peso** del eje.

Su frecuencia de vibración dependerá de las **características elásticas** y de las dimensiones de los tramos de la vía.

La señal ideal generada por la rueda en la situación anteriormente descrita en un sensor próximo a ella tendrá la forma aproximada que se representa en la figura 4.

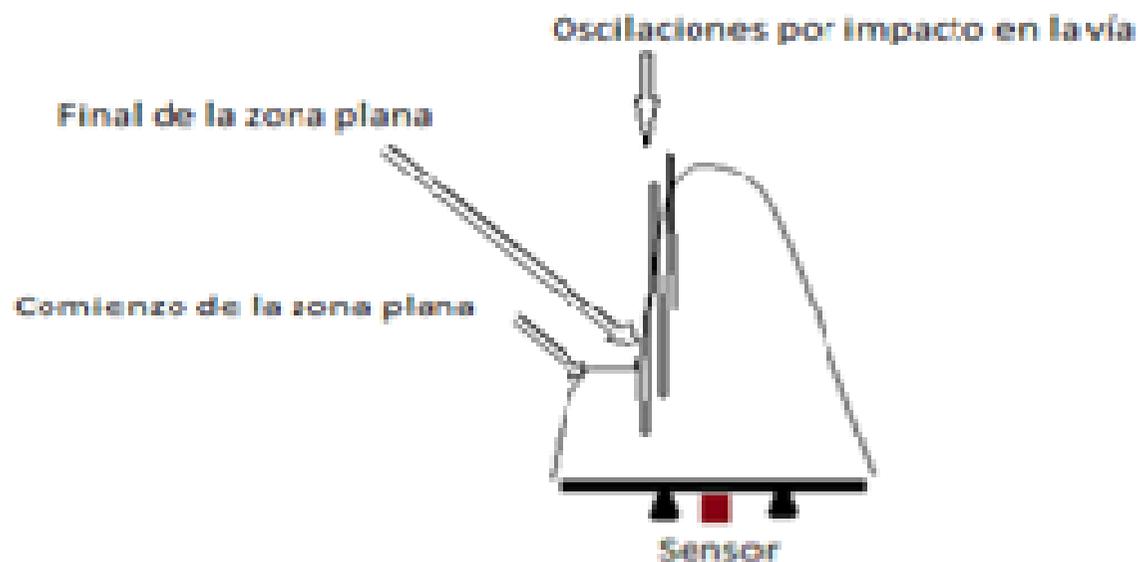


Figura 4. Modelo de señal debida al peso en los puntos del campo próximo.

## 5. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS.

El **método** que se va a seguir para la detección automática de los fallos en ruedas estará conducido **por datos** por dos motivos fundamentales:

- Por un lado, la **dificultad de modelar** adecuadamente el comportamiento del sistema ya que no se conoce el modelo de interacción rueda-vía en este caso concreto.
- Por otro lado, por disponer de **suficiente cantidad de señales** para poder realizar el tipo de tratamiento de interés.

Para poder realizar la detección hará falta realizar una serie de **operaciones** sobre las señales obtenidas, que incluirán:

- **Un preprocesado** inicial eliminar en lo posible el ruido existente en la señal mediante filtrado.
- La **extracción automática** de los picos originados por el paso de la rueda sobre el sensor, ya que el **análisis se hará pico a pico**, es decir, rueda a rueda figura 6.

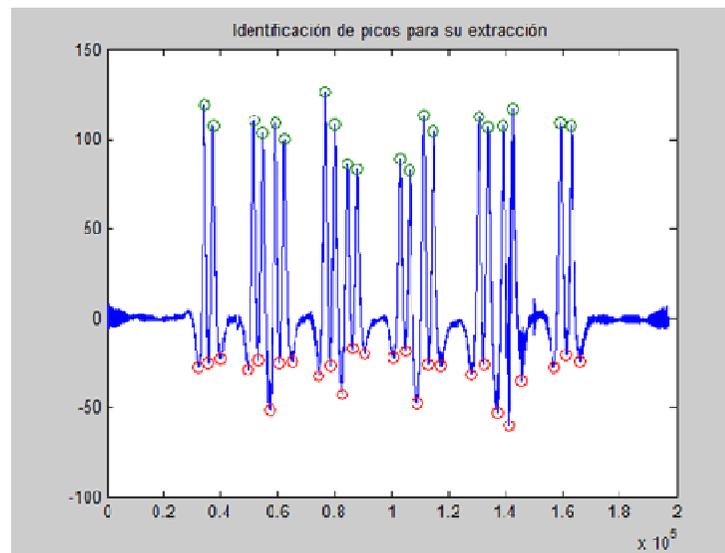


Figura 6. Identificación de los picos.

- **Un procesado** de los picos de la señal que se puede realizar en tres posibles dominios:
  - En el dominio del **tiempo**.
  - En el dominio de la frecuencia.
  - En el dominio **tiempo-frecuencia**.
- La **extracción de características** cuyo objetivo es obtener un conjunto pequeño de valores que contengan información acerca de los fallos (firma de los fallos).
- Finalmente se realiza un proceso de **clasificación**, introduciendo las características obtenidas a la entrada de un clasificador.

## 6. PREPROCESADO DE LA SEÑAL ORIGINAL.

En la figura 7 se muestra el **espectro de la señal** en la banda de 10 a 55 Hz. En ella se observa el pico correspondiente a los **50 Hz** inducidos **de la red**.

A su vez, en la figura 8 se muestra el espectro resultante tras **suprimir los 50 Hz modificando la FFT** y calculando la transformada inversa. También se han limpiado los **seis primeros armónicos** de 50 Hz que aparecían algo destacados en el espectro.

En la figura 7 se muestra el espectro de la señal en la banda de 10 a 55 Hz. En ella se observa el pico correspondiente a los 50 Hz inducidos de la red.

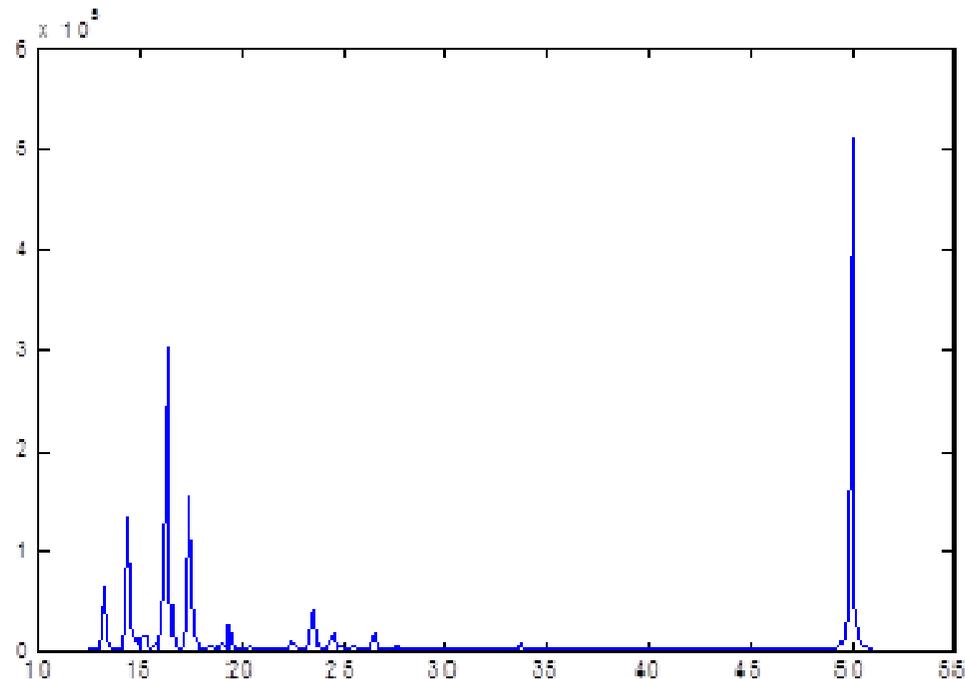


Figura 7. Espectro en la banda de baja frecuencia.

A su vez, en la figura 8 se muestra el espectro resultante tras suprimir los 50 Hz modificando la FFT y calculando la transformada inversa. También se han limpiado los seis primeros armónicos de 50 Hz que aparecían algo destacados en el espectro.

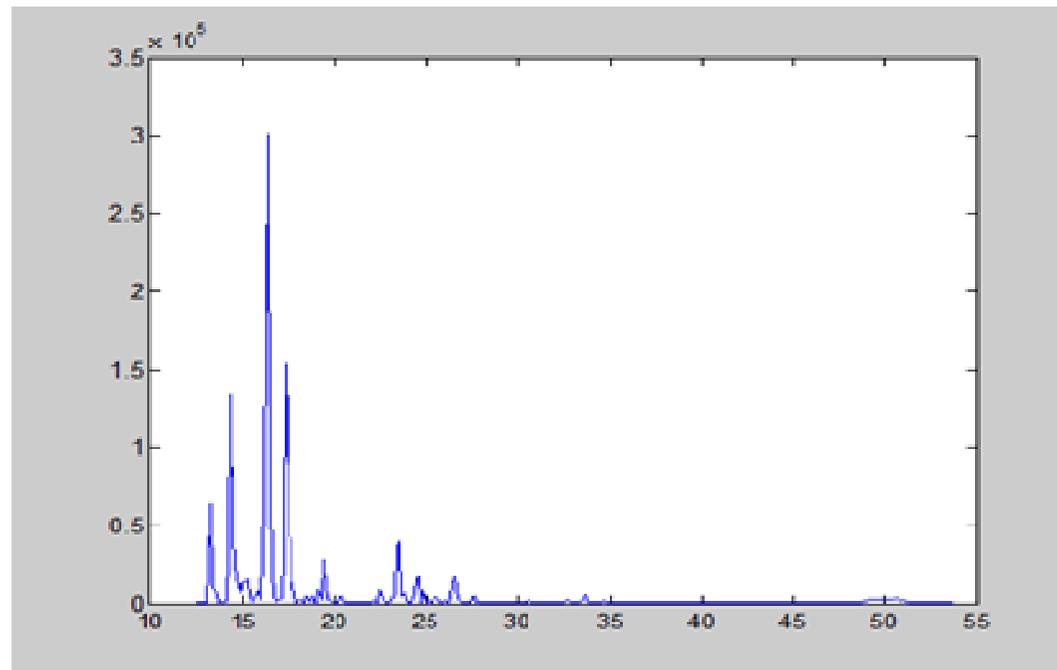


Figura 8. Espectro en la banda de baja frecuencia tras suprimir los 50 Hz inducidos de la red.

En la parte inferior de la figura 9 se muestra la **representación temporal** de una porción inicial de la señal original y en la superior, el mismo tramo, pero después de **suprimir los 50 Hz**. Se aprecia a simple vista una cierta diferencia ya que ha desaparecido el **rizado** correspondiente a esa frecuencia.

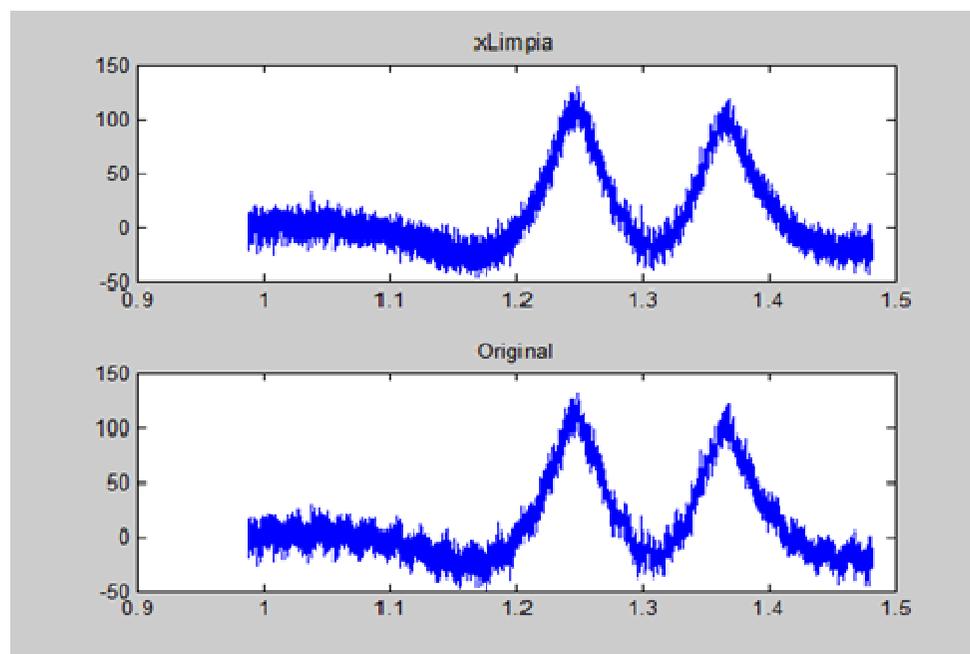


Figura 9. Parte inferior: Tramo inicial de la señal original. Parte superior: mismo tramo tras haber suprimido los 50 Hz.

Para eliminar el **ruido de alta frecuencia** se va a realizar un filtrado de la señal utilizando un filtro paso bajo de **Butterworth de desfase cero** al objeto de que los picos no cambien de posición.

Se ha observado que la frecuencia del fallo es inferior a 1KHz, por lo que se ha probado el comportamiento de **dos filtros**:

- Por un lado, un filtro de **orden 12** con un ancho de banda de **1 KHz**.
- Por otro, un filtro de **orden 6** y ancho de banda **400 Hz**.

En la figura 10 se muestra la señal original completa en azul y la señal filtrada usando el **filtro de 1 KHz** de ancho de banda, en rojo. Se observa que no ha variado la posición de los picos y que se ha eliminado mucho ruido con respecto a la señal original.

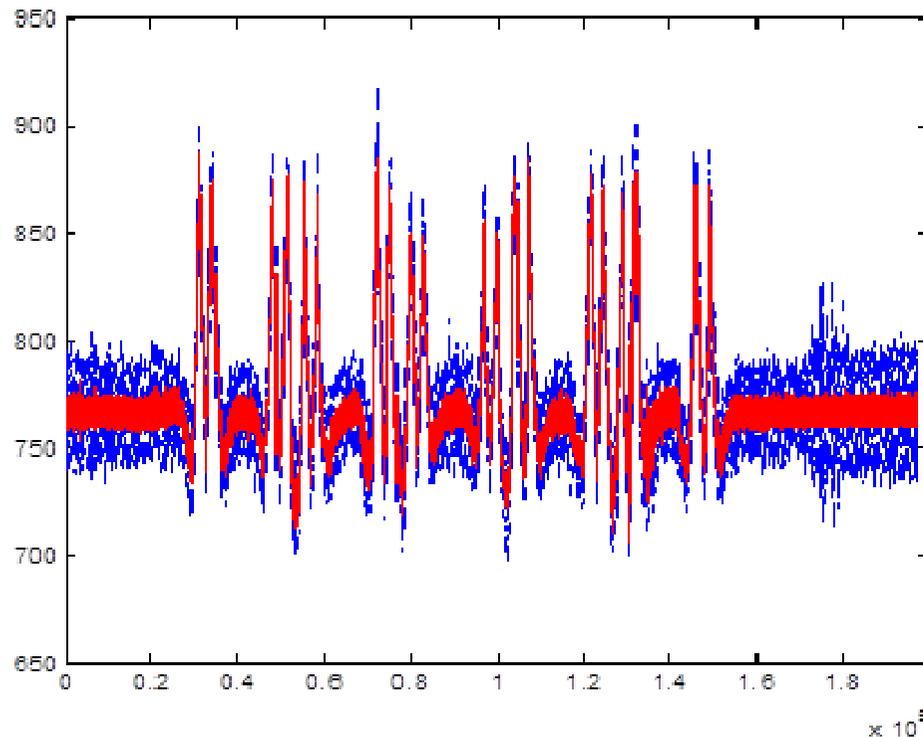


Figura 10. Representación temporal de la señal obtenida (azul) tras suprimir los 50 Hz y de la señal filtrada (rojo) con un filtro paso bajo de 1 KHz.

A su vez, en las figuras 11 y 12 se muestran sendos picos, uno sin fallo y el otro con fallo, procedentes de la señal filtrada usando el segundo filtro anteriormente mencionado, cuyo **ancho de banda es de 400 Hz**. Se va a trabajar con las señales obtenidas por ambos filtros.

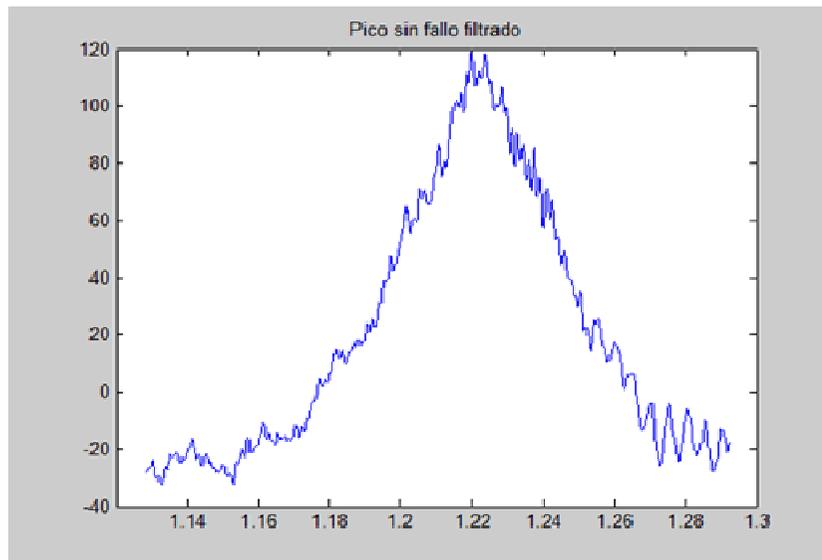


Figura 11. Señal filtrada de un pico sin fallo

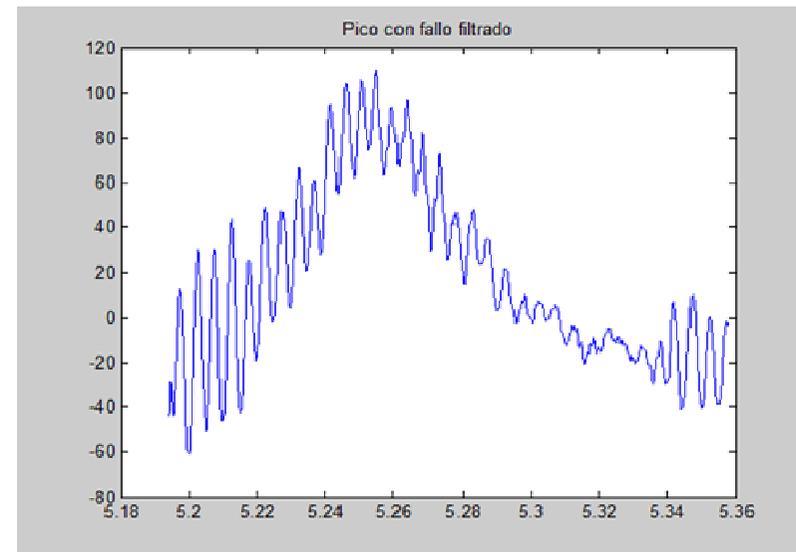


Figura 12. Señal filtrada procedente de un pico con fallo.

## 7. ANÁLISIS DE PICOS.

Al objeto de poder detectar los fallos en las ruedas se han buscado **vibraciones locales atípicas** a lo largo de las señales.

Por ejemplo, en el fichero correspondiente a la señal mostrada en la figura 1 ha aparecido un fallo en **el eje 9º**.

En la **figura 13** se muestra la señal procedente de ese eje y del anterior, y en ella se aprecian los **impactos del fallo con la vía**. Es el mismo pico de la figura 11 pero con más ruido (señal filtrada con el filtro de 1 KHz).

Se observa que en el tramo de señal mostrado en la figura 13, el **fallo impacta varias veces sobre la vía**. Uno de los impactos los **detecta el sensor** antes cuando la vía anterior a la del fallo está sobre el sensor. Los otros dos tienen lugar al principio y al final del pico correspondiente a la rueda y aún aparece la traza, aunque bastante atenuada, de un impacto posterior al paso de la rueda.

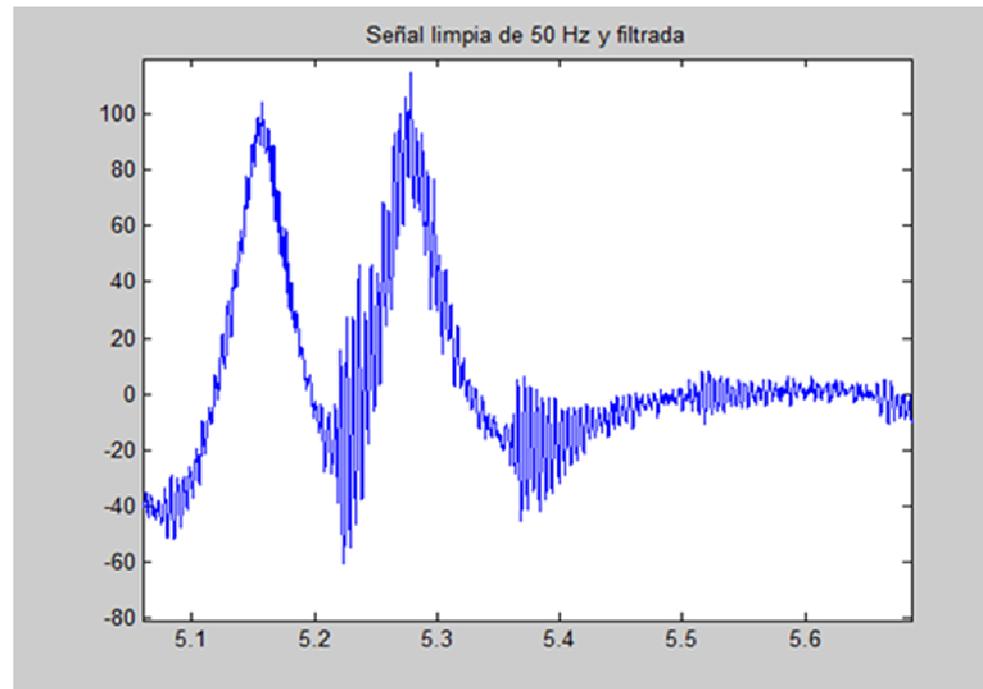


Figura 13. Vibraciones generadas por el fallo de la rueda.

En la figura 14 se muestra el espectro correspondiente a un pico sin fallo analizando la señal filtrada con el filtro de **1 KHz** después de hacer un zoom para ver con detalle la banda de baja frecuencia, que es la que tiene interés en este análisis, ya que en ella aparecen las frecuencias modales excitadas por el fallo. Se presenta **un pico próximo a 200 Hz**.

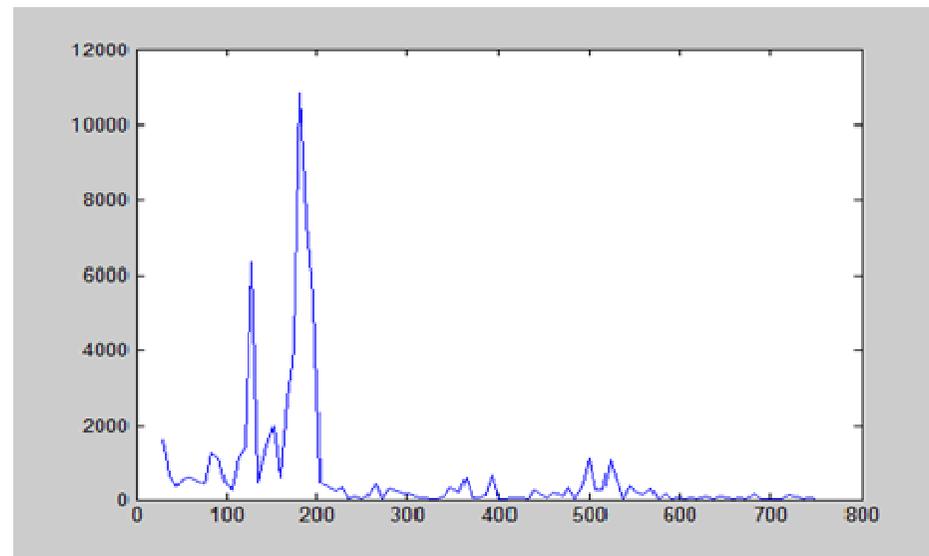


Figura 14. Banda de baja frecuencia del pico sin fallo.

En la figura 15 se muestra el espectro correspondiente al pico **con fallo** tras haber hecho zoom para observar la banda de baja frecuencia. Se observa que el **pico próximo a 200 Hz tiene una amplitud mucho mayor en el pico que procede de la rueda con fallo.**

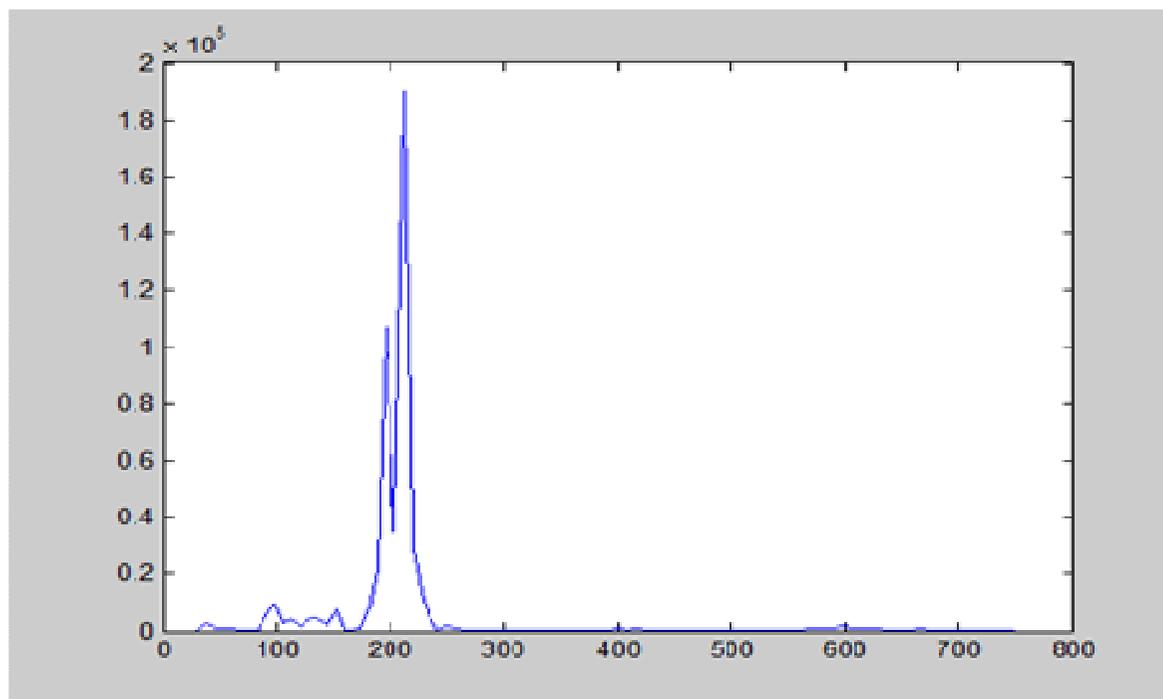


Figura 15. Banda de baja frecuencia de un pico con fallo.

Al objeto de realizar una mejor **comparación**, en las figuras 16 y 17 se a utilizado la misma escala para el eje de ordenadas en la representación de ambos espectros.

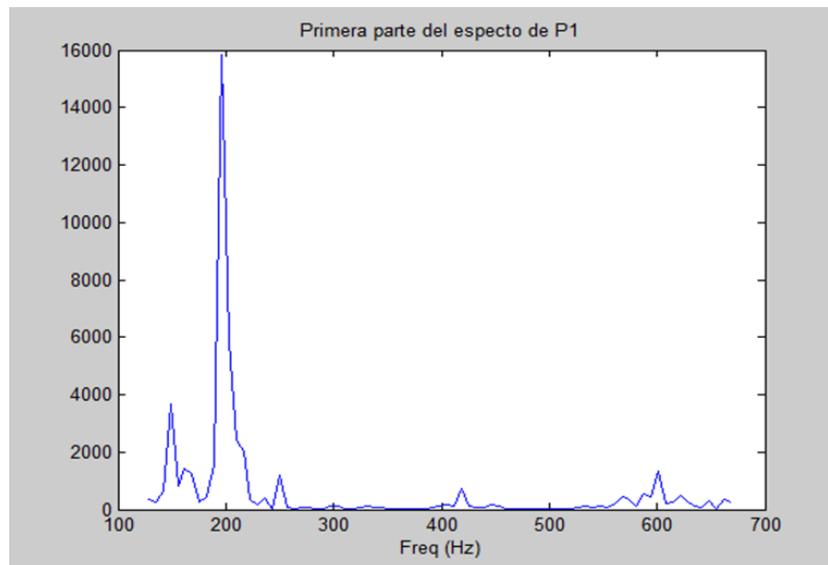


Figura 16. Banda de baja frecuencia de un pico sin fallo

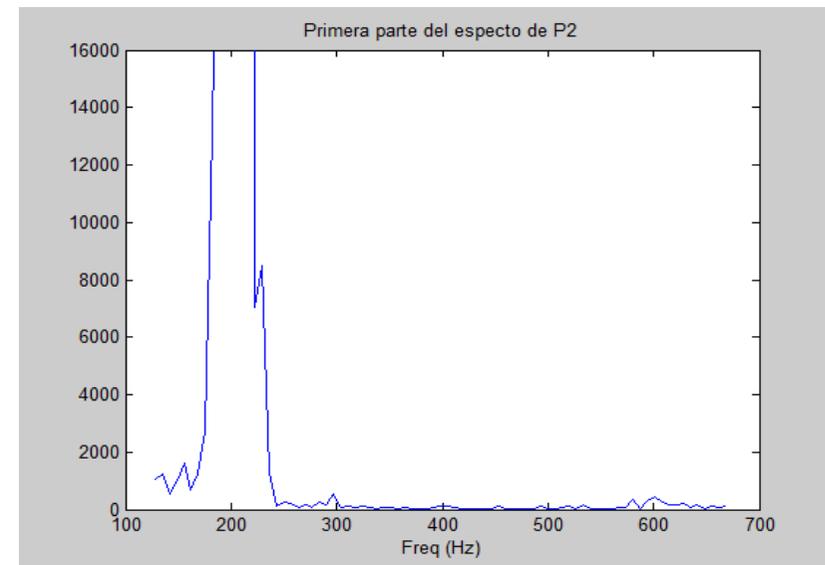


Figura 17. Banda de baja frecuencia del pico con fallo tomando la misma escala para el eje de ordenadas.

## 8. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS.

Para la extracción de las características de los fallos se va a utilizar el **método de Welch**.

Su idea parte de dividir el registro original **en ventanas de menor tamaño, calcular la DEP de cada ventana y promediar** los resultados. Las ventanas pueden tener un **cierto solapamiento**.

De esta forma se **reduce la varianza** del estimador aún a costa de **disminuir la resolución**, lo que no importa ya que el vector de características es de reducida dimensión.

En la figura 18 se representa la DEP por el método de Welch en las proximidades de los 200 Hz para un pico sin fallo. En la figura 19 para un pico con fallo. En esas figuras aparece la **transformada de la señal correspondiente a los picos con un filtrado de 1 KHz** de ancho de banda.

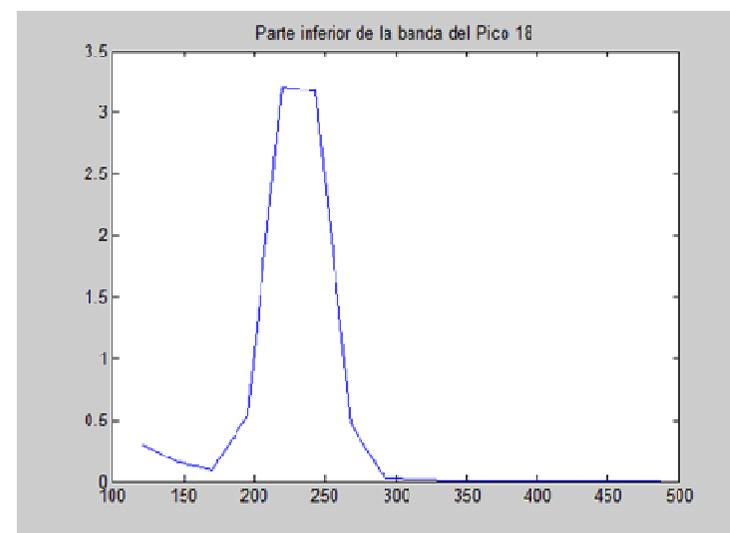
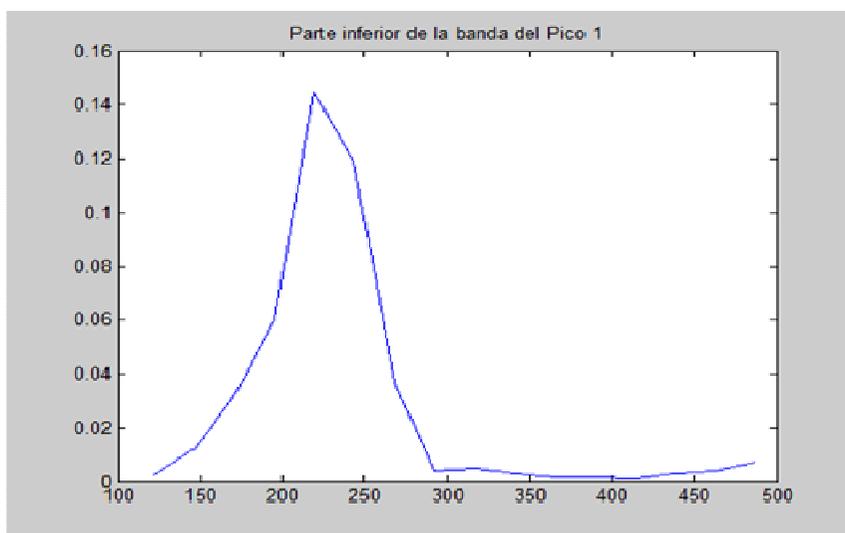


Figura 18. Banda de baja frecuencia de la DEP mediante la transformada de Welch de un pico sin fallo y filtrado de 1 KHz.

Figura 19. Banda de baja frecuencia de la DEP mediante la transformada de Welch de un pico con fallo y filtrado de 1 KHz.

Si se trabaja con la señal filtrada con un filtro paso bajo de **Butterworth** de orden seis y ancho de banda **400 Hz**, la DEP por el método de Welch en la banda de baja frecuencia se muestra en la figura 20 para un conjunto de picos **sin fallo y un pico con fallo**.

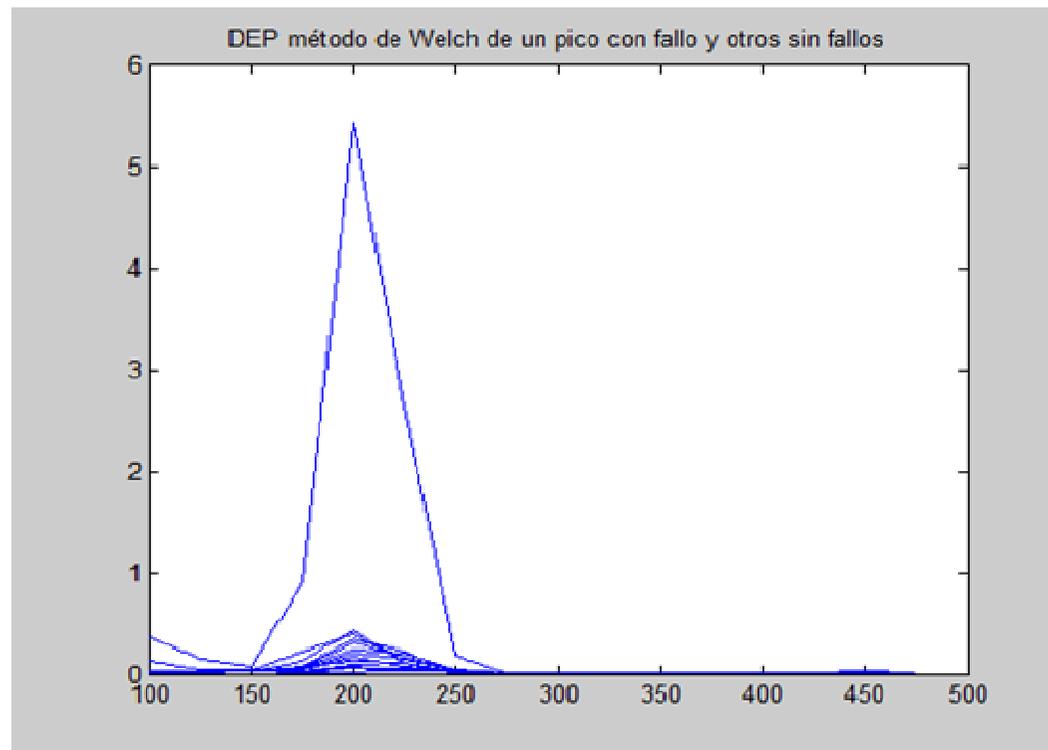


Figura 20. DEP por el método de Welch de picos con y sin fallo con la señal filtrada con un ancho de banda de 400 Hz.

Vemos que también se aprecia una diferencia considerable en la amplitud de la DEP en ambos casos. Por tanto, por lo que se refiere a identificación de fallos, el **tipo de filtrado** que se realice **no** resulta un factor **crítico** en esta aplicación.

Esto nos lleva a utilizar como características de **la firma del fallo esos seis valores de la DEP** en la banda de baja frecuencia anteriormente mencionada.

En la figura 21 se muestra la **DEP** en las mismas condiciones que las de la figura 20 pero únicamente **para picos sin fallo**. Se observa que todos los picos mantienen una **cota** superior muy por **debajo** del pico con fallo mostrado en la figura 20.

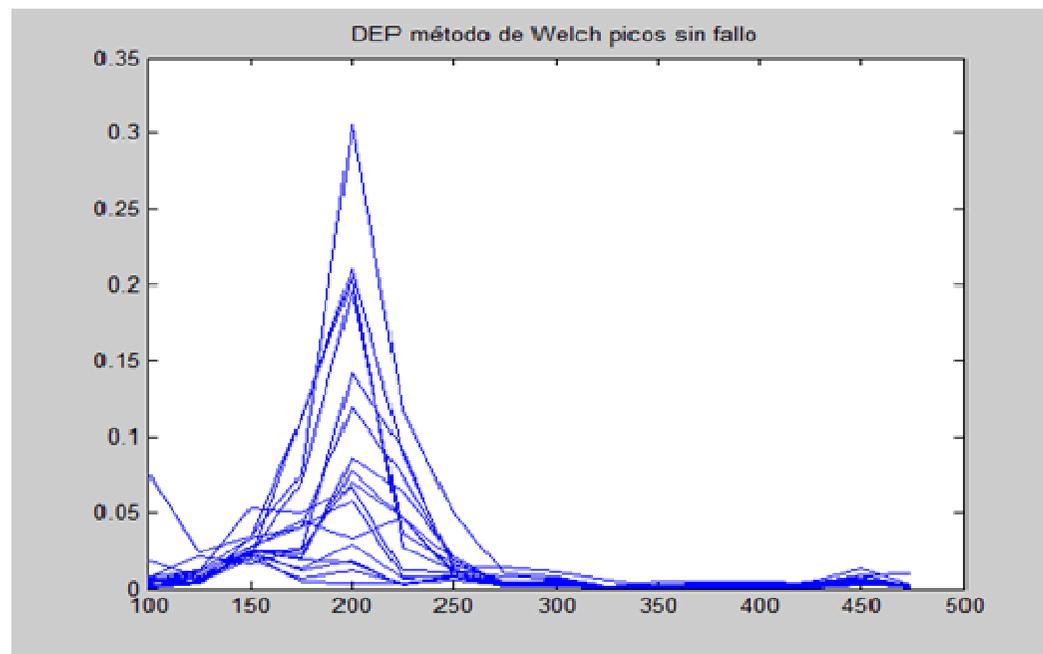


Figura 21. DEP por el método de Welch de picos sin fallo con la señal filtrada con un ancho de banda de 400 Hz.

Finalmente en la figura 22 se muestra la **DEP** por el método de Welch de **141 picos con y sin fallo**. La zona inferior corresponde a picos sin fallo y las superiores corresponden a picos con fallo. Sin embargo, se han detectado fallos en ruedas que no los tienen debido a la presencia de **restos de vibraciones provocadas por ruedas contiguas** que presentaban fallos.

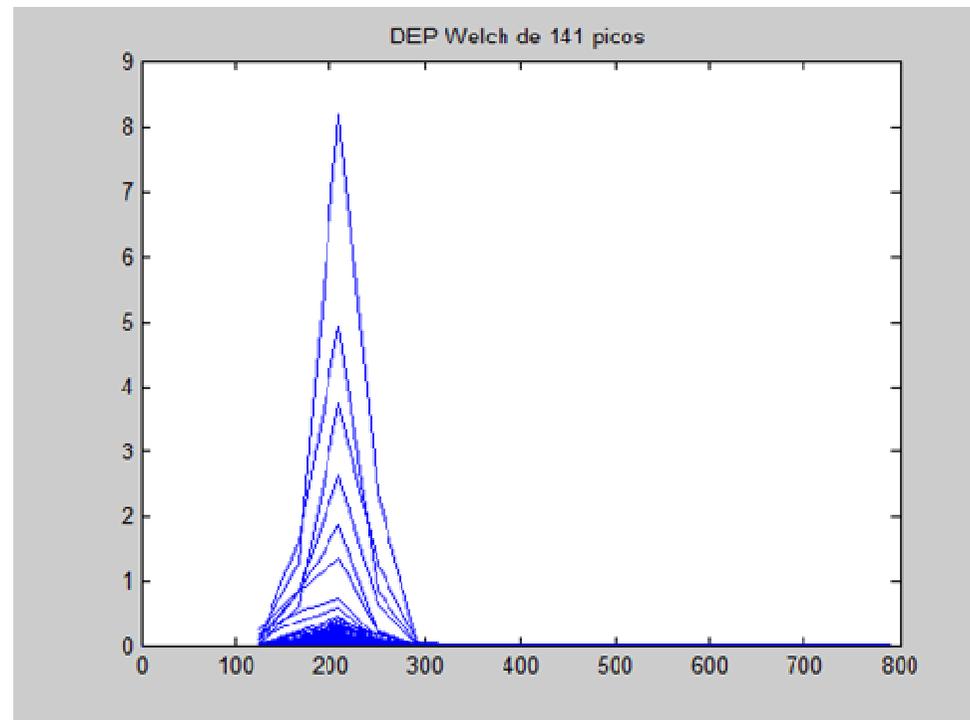


Figura 22. DEP por el método de Welch de picos sin fallo y con fallo, con la señal filtrada con un ancho de banda de 400 Hz.

## 9. CLASIFICACIÓN.

Para la detección automática de fallos se ha empleado aprendizaje supervisado y se ha utilizado una máquina de vectores **soporte (SVM, Support Vector Machine) con validación hold-out**, separando el conjunto de datos en dos grupos uno el de entrenamiento con el 65% de los picos y otro de test con el 35%.

Tanto en el entrenamiento como en el test se han **utilizado picos procedentes tanto del mismo tren como de trenes distintos**.

En el entrenamiento se ha considerado fallo la presencia parcial de oscilaciones debidas a fallos de rueda dentro del pico considerado.

**El resultado ha sido positivo** en un porcentaje importante de casos, superando el 90% de éxito en la clasificación tanto en señales filtradas como sin filtrar.

La figura 23 muestra el resultado de la **SVM para 16 valores**, escogidos de manera que había 5 con fallo, después de haber sido entrenada con los 141 picos empleando 50 para su entrenamiento.

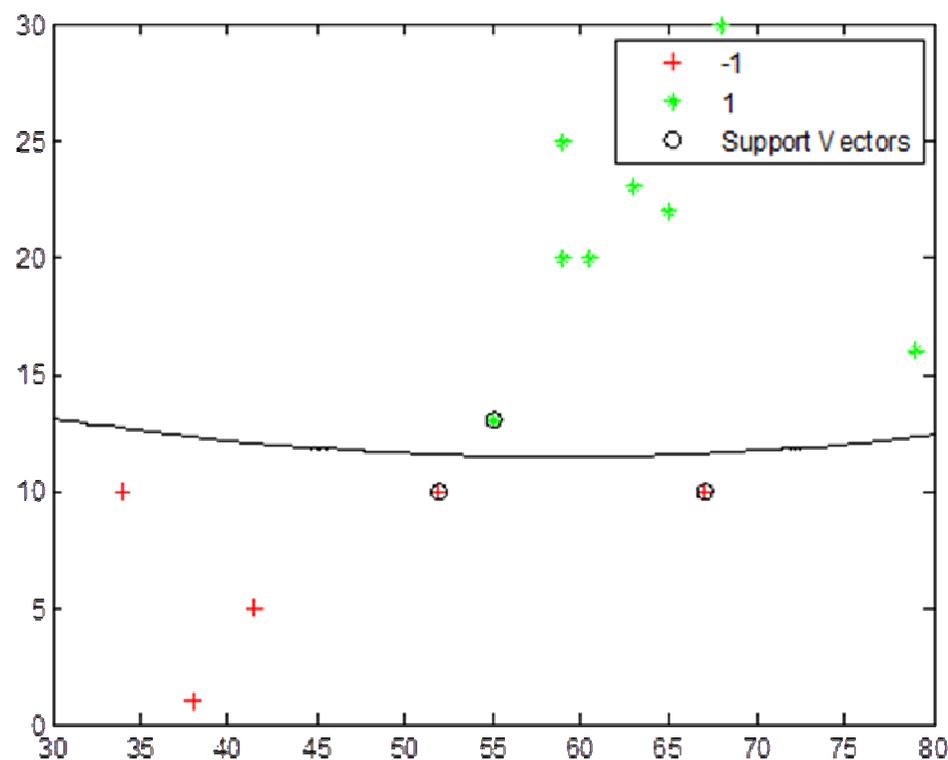


Figura 23. Resultado de la clasificación de 16 picos mediante SVM.

## CONCLUSIONES.

Cabe destacar las siguientes conclusiones.

- Se pueden **detectar fallos** en las ruedas mediante una **simple medida en la vía cuando el tren circula** sobre ella. Esto puede permitir reducir el mantenimiento mediante la creación de “puntos de medida de fallos”.
- El **método es sencillo** ya que basta con muestrear la señal, **extraer** los picos, **preprocesar** la señal, **extraer las características** de los fallos y realizar su **clasificación**. Todos estos pasos se pueden automatizar de forma relativamente sencilla.
- **La DEP por el método de Welch** proporciona una **buena herramienta** para la extracción de las características.

Se ha observado que en un pico puede haber **“restos” de las oscilaciones** producidas por la rueda correspondiente a otro pico. Sin embargo, se tiene la seguridad de que si esto sucede, la rueda con restos de la firma de otra rueda está en **el mismo bogie**.

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

tecnalia  Inspiring  
Business

