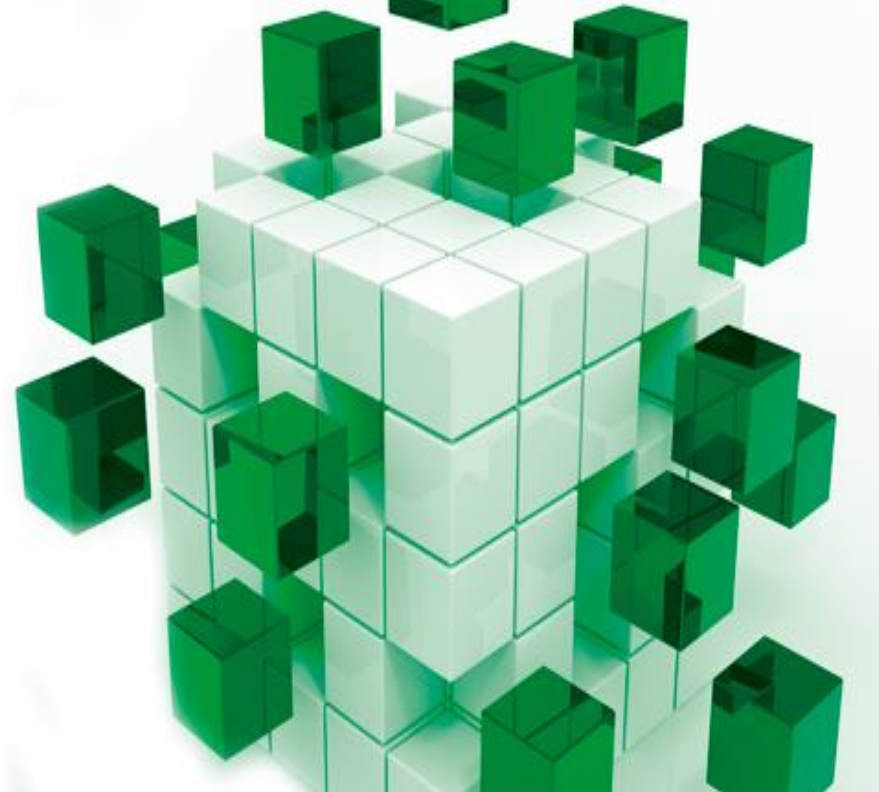


# XVIII Congreso de Confiabilidad

Madrid. 23 y 24 de noviembre de 2016



Organiza:

**QAE**C  
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD



# **Detección automática de planos de rueda de ferrocarril, empleando la transformada de Hilbert, mediante procesado digital de imágenes.**

**Dr. Enrique Hernández**



## Oportunidad del tema

**Aumento de la demanda en el transporte ferroviario**  
**Necesidad de un mantenimiento más eficiente**

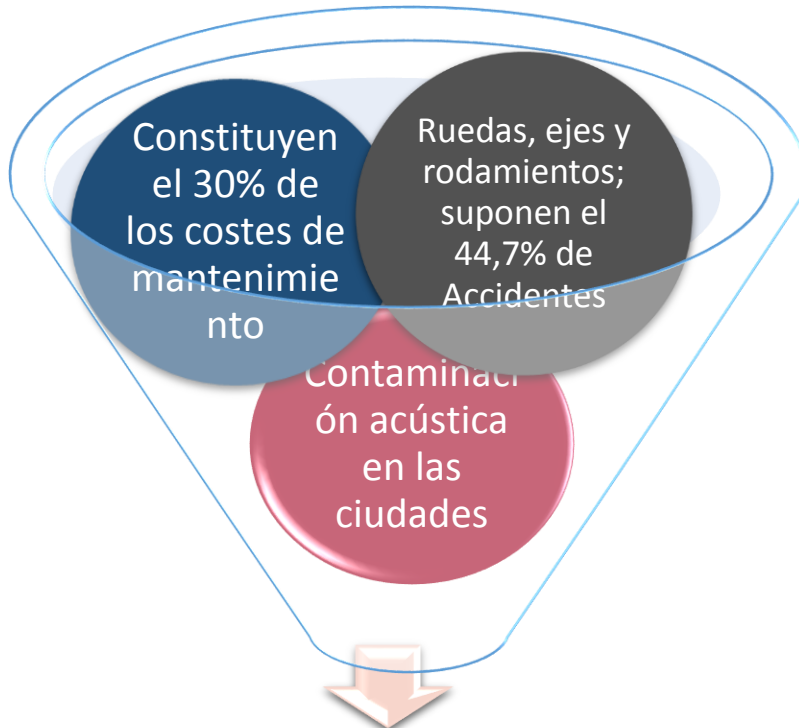
El aumento en las prestaciones ha disparado los costes de mantenimiento

*El mantenimiento preventivo y correctivo, supone paradas en el normal funcionamiento de los vehículos*

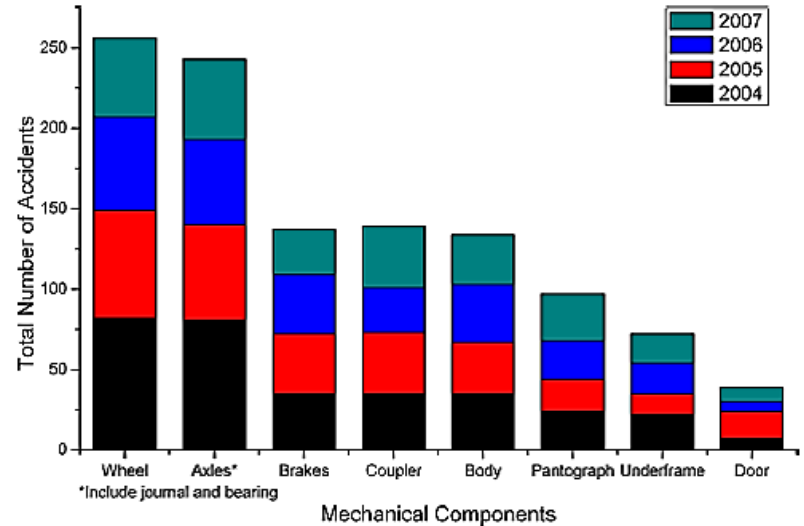
**Las compañías ferroviarias han incorporando el mantenimiento predictivo para mejorar su planificación**



## Las ruedas son causa principal de accidentes ferroviarios



Necesidad de optimización de los procesos de supervisión



Accidentes de tren causados por componentes mecánicos entre los años 2004 a 2007 (FRAOSA).



## Los planos de rueda son causa de otros daños



Plano simple sobre banda  
de rodadura (AMTAB)

### Se producen por

- Frenadas
- Deslizamientos (hojas, hielo)

### Provocan daños

- Calentamiento o roturas de ejes y cajas de grasa
- Daños en los rodamientos
- Grietas que penetran en las ruedas
- Rotura de raíles y traviesas

## No existe un estándar de tolerancia universal



País	Operador Ferroviario	Longitud máxima permitida de un plano de rueda
Inglaterra	BTN (British Network Rail)	De 40 a 80 mm dependiendo de la carga del eje
Japón	JSN (Japanese Shinkansen NetWare)	De 50 mm (30 mm) en la práctica y en la red convencional son 75 mm para un solo plano y de 50 para dos planos sobre una misma rueda
Italia	FS (Ferrovie dello Stato)	40 mm
España	RENFE	50 mm
Internacional	UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles)	60 mm

Diferencias de estandarización en la longitud máxima admitida de un plano de rueda en diferentes países (Steembergen)

## Las frecuencias de inspección y reperfilado varían de unos países a otros

País	Operador ferroviario	Frecuencia
Italia	FS	200000 km
España	RENFE	250000 km
Alemania	ICE	250000 km
Reino Unido	BTN	240000 km

Algunas de las frecuencias de inspección de ruedas en Europa (Molina).



## Objetivo fundamental

### Sistema de supervisión automático

Detectar posibles planos de rueda incipientes  
Donde se encuentran



### Diagnostico precoz

Durante el normal funcionamiento operativo del vehículo



## Métodos tradicionalmente empleados

### ➤ *Basados en modelos*



- ❖ **A priori**
- ❖ A partir de un **profundo conocimiento** del proceso.
- ❖ Deben incluir **todas las situaciones** que se puedan presentar.
- ❖ Elevada **carga computacional**.

### ➤ *Basados en datos*



- ❖ **A posteriori** a partir de medidas realizadas.
- ❖ Transforman las muestras tomadas en unos pocos parámetros denominados “**características**”.

### ➤ *Métodos mixtos*



- ❖ Modelización y análisis frecuencial.





## ➤ *Galgas extensiométricas*



- Registran el esfuerzo cortante.
- Indican claramente **cuando y donde** se produce el fallo.
  - ✓ Algunos casos de uso: WILD de Salient System, Nenov y otros, Bracciali y Folgarait.

## ➤ *Acelerómetros*



- **Muy sensibles** a la velocidad y la carga del tren
- **Dificultan la identificación** de la situación del plano
- Se suelen **añadir galgas** extensiométricas
  - ✓ Algunos ejemplos: KYOWA, WCM, Tillman y Glazar, Danneskiold-Samsoe.



## ➤ Sistemas laser

- Son muy **susceptibles al ambiente** y a la suciedad.
- Son caros , delicados y necesitan de **velocidades extremadamente bajas**.
- Muy **eficaces** en la evaluación del desgaste .
  - ✓ Algunos casos de empleo: WISE, Talgo E.V.A., IDEKO4, Mian y otros, Díaz y otros.

## ➤ Fibra óptica

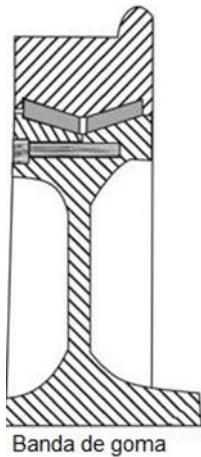
- **Inmunes** a las interferencias electromagnéticas, y no necesitan alimentación eléctrica en el punto de medida.
- Tiene una fuerte **dependencia de la temperatura**, son frágiles y los **interrogadores son caros**.
- Se suele emplear la red de Bragg,.
  - ✓ Algunos ejemplos: Anderson, Wei y colaboradores, Tam y otros, GOTCHA.

➤ **Ultrasonidos**: método tradicionalmente empleado para detectar grietas, se suele llevar a cabo en los talleres de mantenimiento.

## Marco experimental



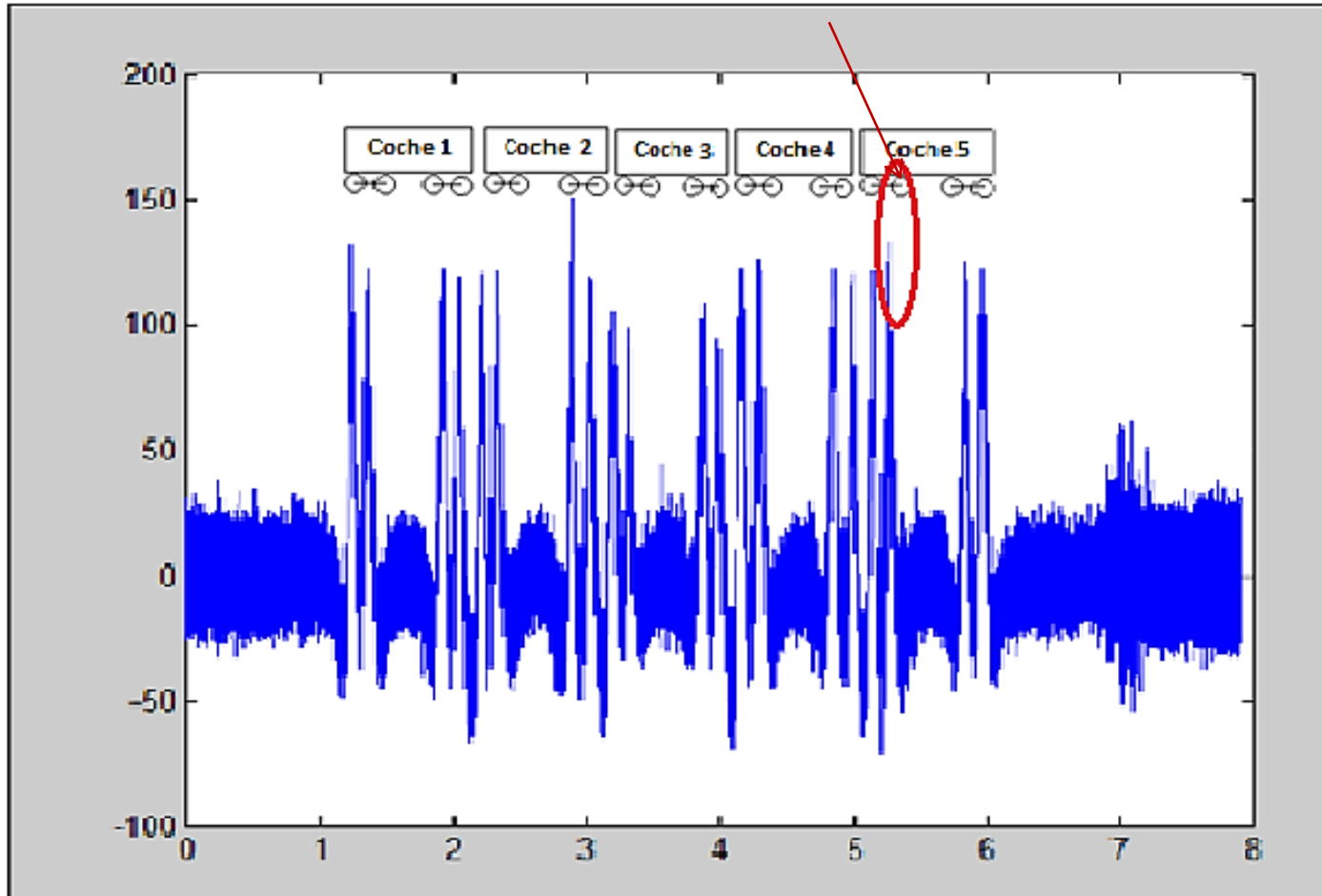
- La adquisición se llevó a cabo monitorizando un rail, modelo **UIC 54 con fijaciones DFF** sobre placa.



Rueda ensamblada  
(Orlova y Boronenco)

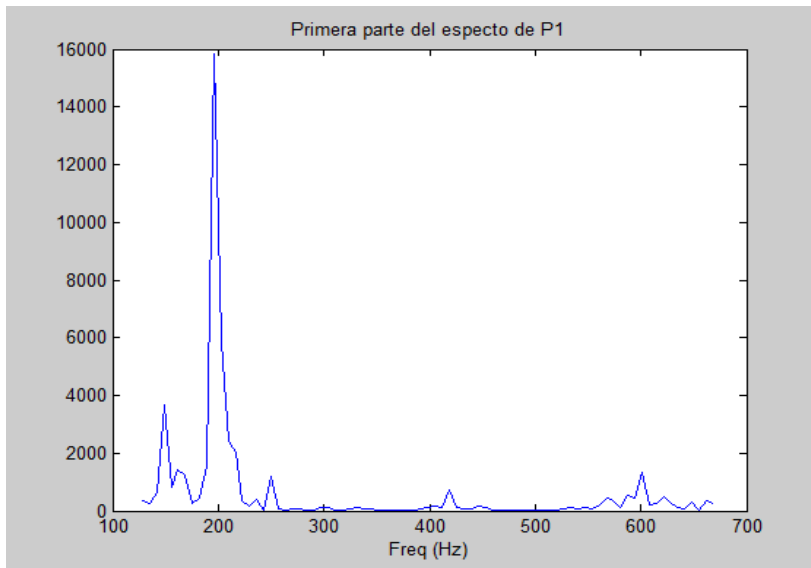
- Empleando como sensor **galgas extensiométricas**.
- La experimentación se realizó en un intervalo de velocidades entre los **53-58 Km/h**.
- El modelo de suburbano consta de 5 coches de composición M-M-M-M-M, es decir con 10 bogies motrices, con un total de **20 ejes**.
- Las ruedas son del tipo **ensambladas**, muy utilizadas en metros y tranvías por su insonorización, de diámetro **840 mm**.

Señales obtenidas en la vía

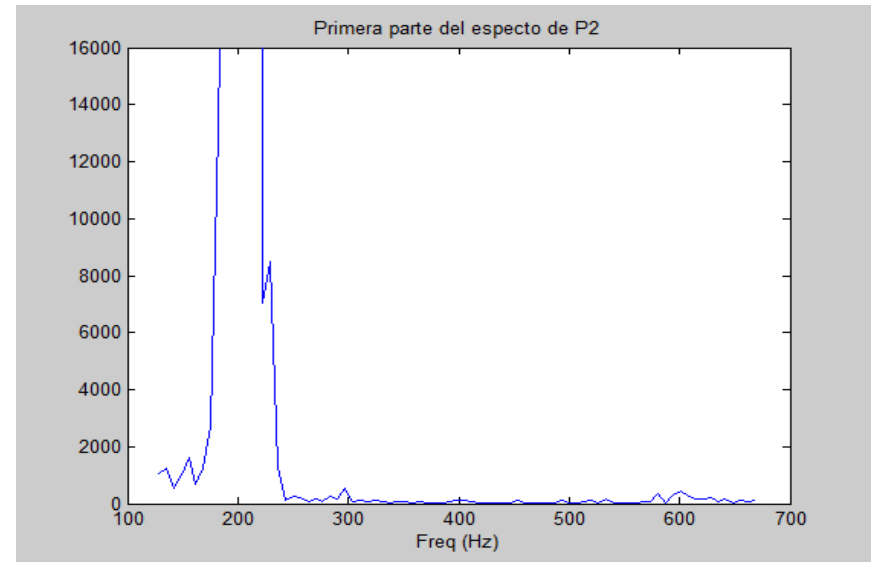




- Se monitorizaron **60 señales**, a una frecuencia de muestreo de **25 KHz**, elevada, con objeto de cumplir las **condiciones de Shanon**, ya que no se utilizó filtro antialiasing.
- Se observa que la frecuencia de interés se encuentra en la banda de **200 Hz**.



Espectro de un pico sin fallo



Espectro de un pico con fallo

## Fuentes de señal en la vía



### ➤ **Infraestructura ferroviaria.**



- La red 50 Hz.
- Pantógrafo-catenaria de alta frecuencia y alto nivel.
- Modos de vibración de la vía 200 Hz.
- Travesaños, inferiores a 50 Hz.
- Interacción raíl-suelo, despreciable

### ➤ **Las debidas al propio tren.**

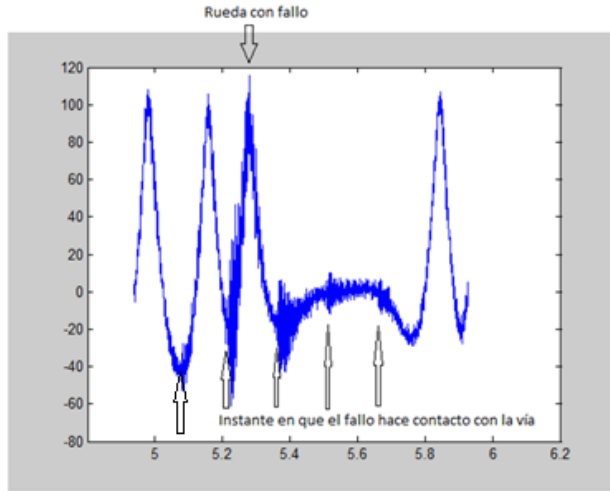
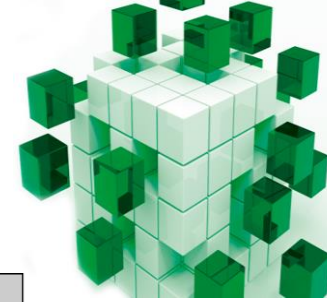


- Bastidor y chasis, inferiores a 10 Hz.
- Suspensiones alrededor de 3 Hz.
- Motores (desalineaciones, excentricidades etc.) < 145 Hz.
- Los ejes entre 5 y 25 Hz.

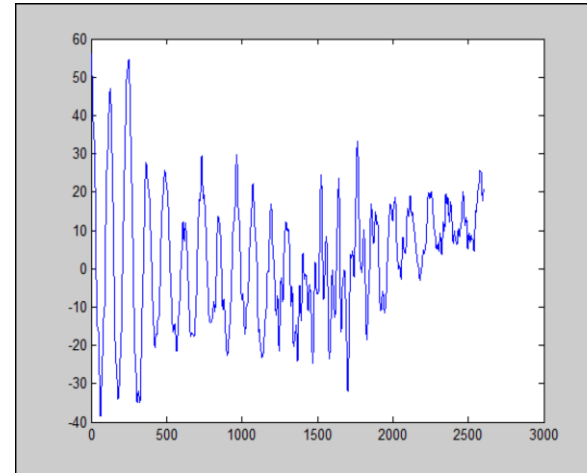
### ➤ **Ruedas**



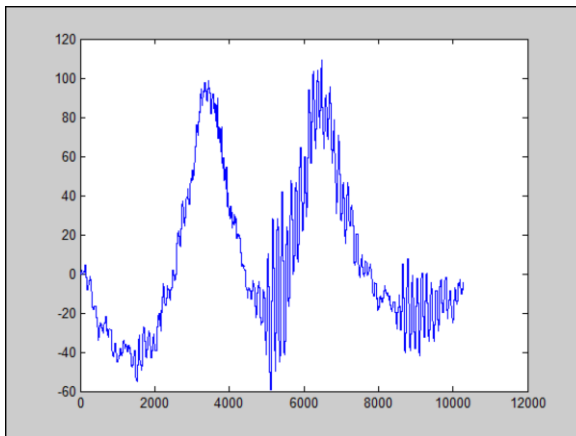
- **Variaciones del radio de la rueda.** frecuencias de giro distintas para cada rueda.
- **Aparición de microfisuras.** Provocan vibraciones de pequeña amplitud y alta frecuencia
- **Planos de rueda.** Vibraciones en el carril de tipo impulsivo, por impacto de la zona plana con la vía.



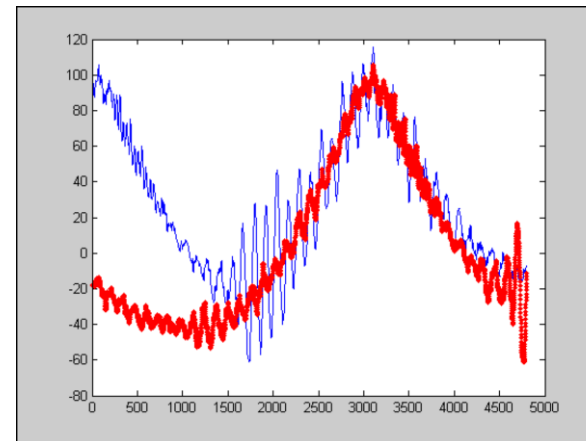
Instante en el que el plano hace contacto con la vía



Vibración correspondiente a la firma del fallo



Detalle de pico afectado



Superposición con el pico anterior, con filtro de orden 6 y ancho de banda 400 Hz

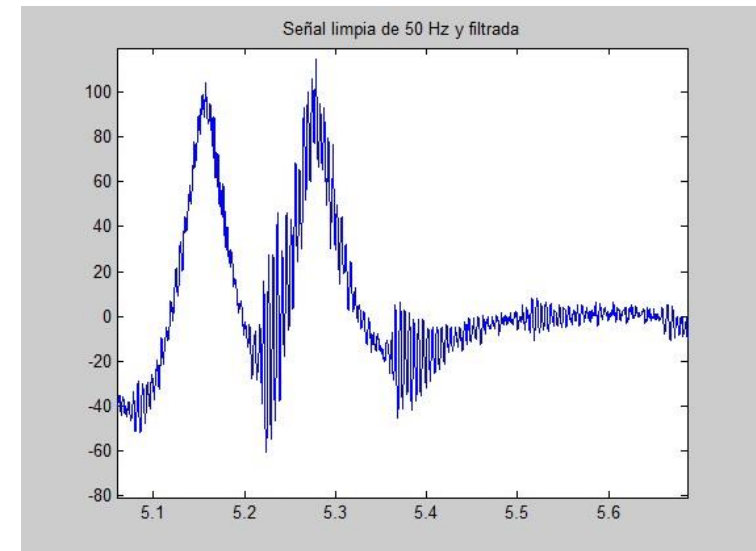
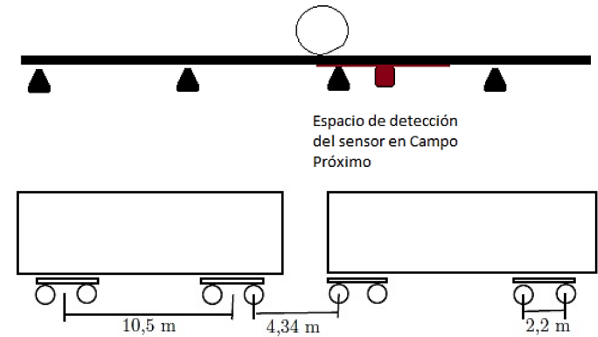
## Detección

El sensor recoge la vibración producida:

- **Espacio de detección (EDS) = 3,2 m.**
- **Perímetro de la rueda: 2,6 m.**

El carril UIC 54, debido a su receptancia cruzada, presenta una **atenuación del 50% a los 2 m.**

- La vibración de las dos ruedas de un mismo bogie se **superponen**, pero solo habrá que atender a la que tiene un transitorio mayor.
- La vibración de **bogies distintos** queda completamente **atenuada**.
- No se admiten diferencias de diámetro, en el **reperfilado mayores de 5mm** entre ruedas de un mismo bogie. Interesa el bogie.





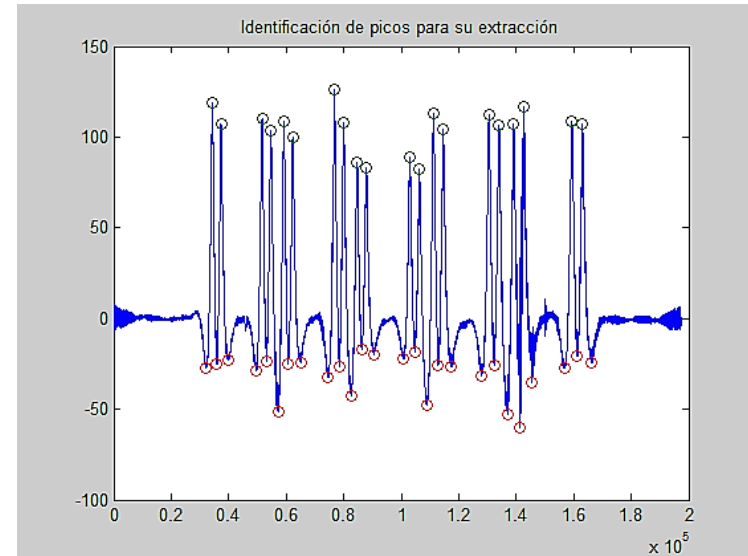


## Extracción automática de los picos

- Se independiza el análisis del dominio del tiempo ya que una rueda contiene oscilaciones o no las contiene. Esto evita la necesidad de realizar un análisis tiempo- frecuencia de tipo transformada de wavelet.

- Sin embargo, se va a hacer uso del concepto de **señal analítica que es una representación en el dominio del tiempo.**

- Hay que adaptar el análisis al número de **muestras** de cada pico, pues en general serán **diferentes.**

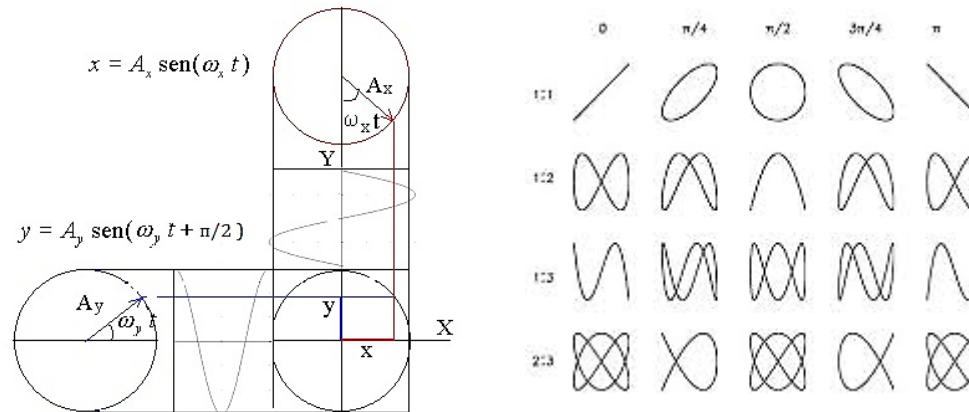


- No todas las señales contienen todos los picos, por lo que se han elegido **20 señales y 3 picos** por señal, uno de ellos con defecto, en total 60.



## ¿ Cómo conseguir una imagen de la señal?

**Las curvas de Lissajous:** a partir de ellas se pueden obtener distintas formas de la señal, dependiendo del desfase, entre su parte real e imaginaria.



Formas de Lissajous ( La web de la Física)

Estamos **interesados en la circular** pues de ella se podrán obtener mejor las características geométricas



Una forma de obtener la señal es mediante:

## ***La transformada de Hilbert***

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

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

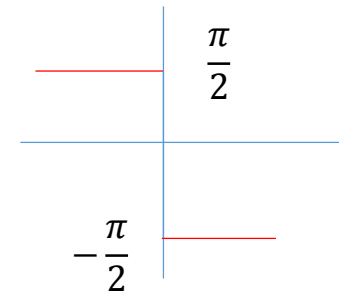
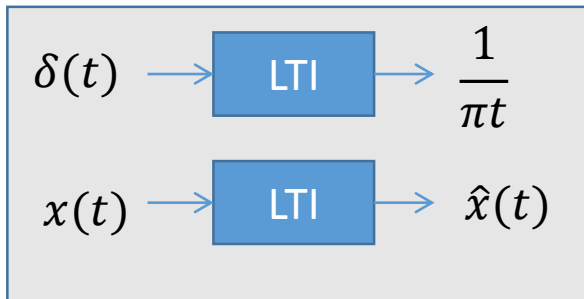


$\hat{x}(t)$  es una convolución

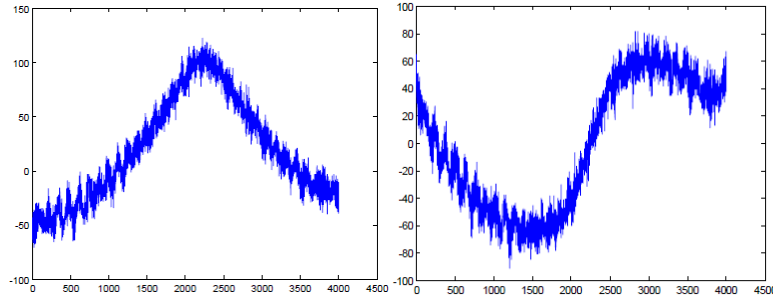
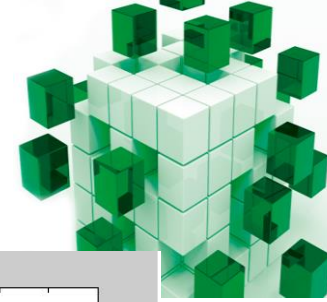
$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t}$$



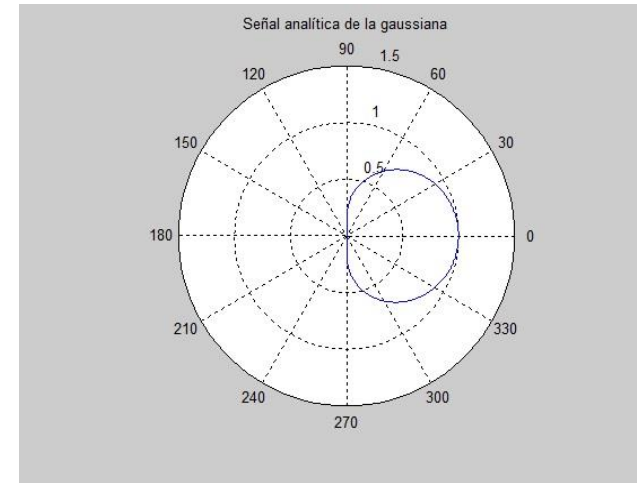
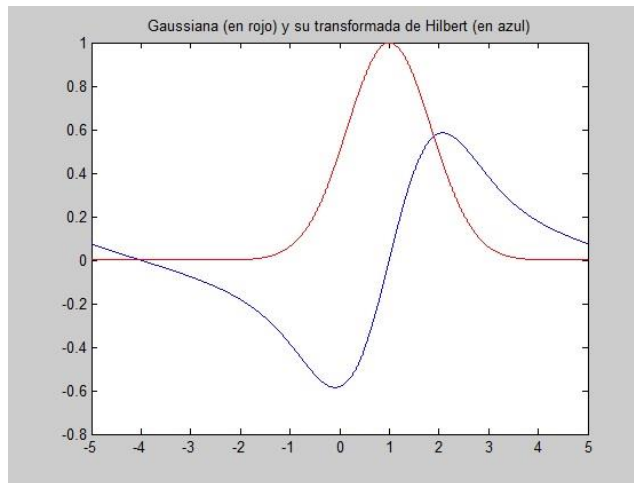
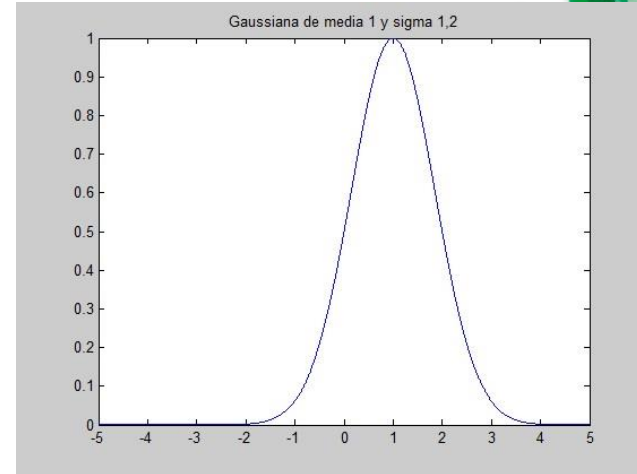
$$\hat{x}(w) = -j \text{sign}(w) X(w)$$



## ¿Qué se espera obtener?



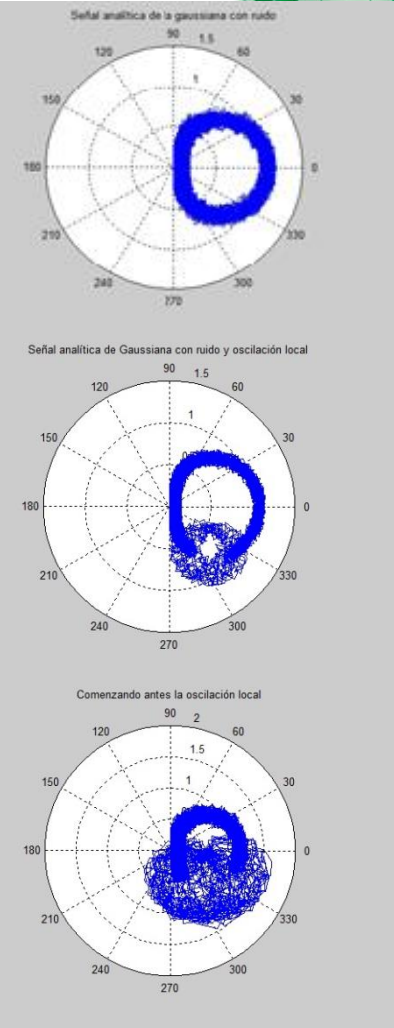
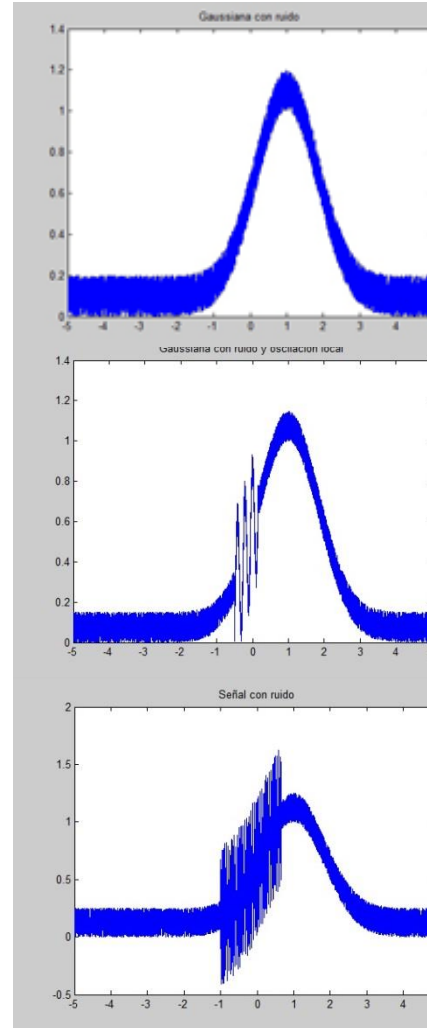
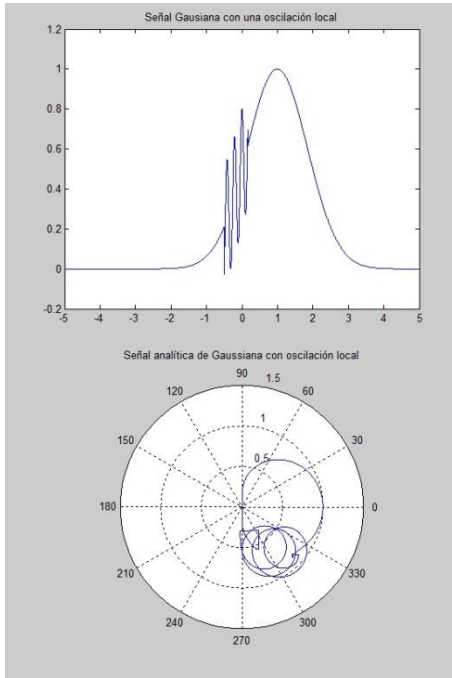
Parte real e imaginaria de la señal analítica de un pico de la señal



Representación de la señal analítica de una Gaussiana en el plano complejo



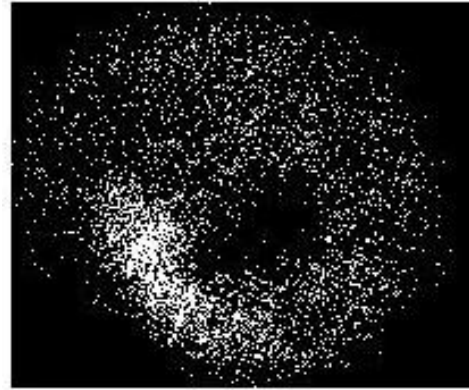
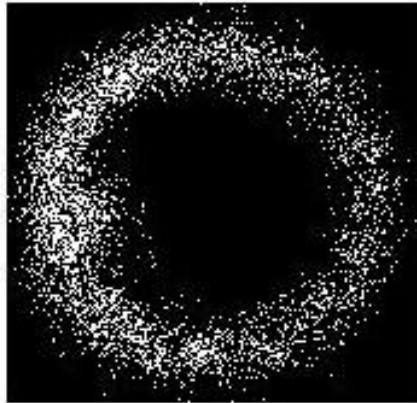
Representación en el plano complejo de la señal Gaussiana con oscilaciones y ruido.



## Extracción de características

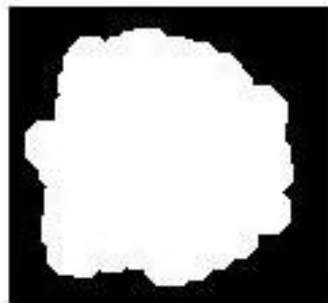


*Regiones obtenidas a partir de las operaciones morfológicas*



Imágenes correspondientes a un pico, a) sin fallo y otro b) con fallo, de la señal

**Cierre o clausura:**  $f \circ h = [(f \oplus h) \ominus h]$



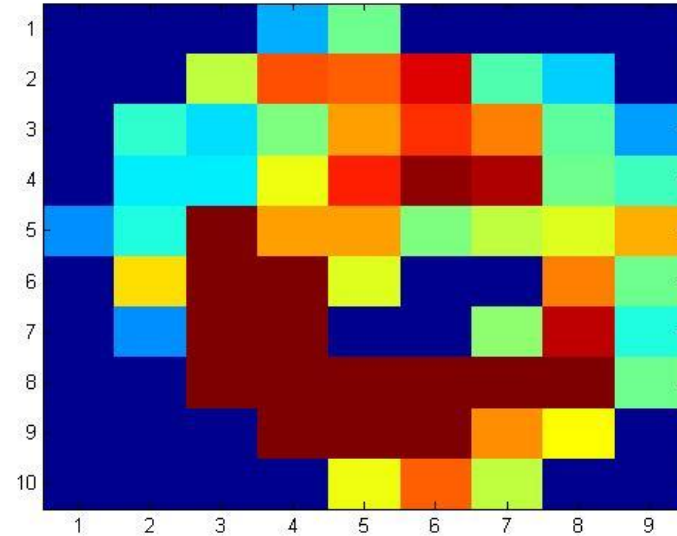
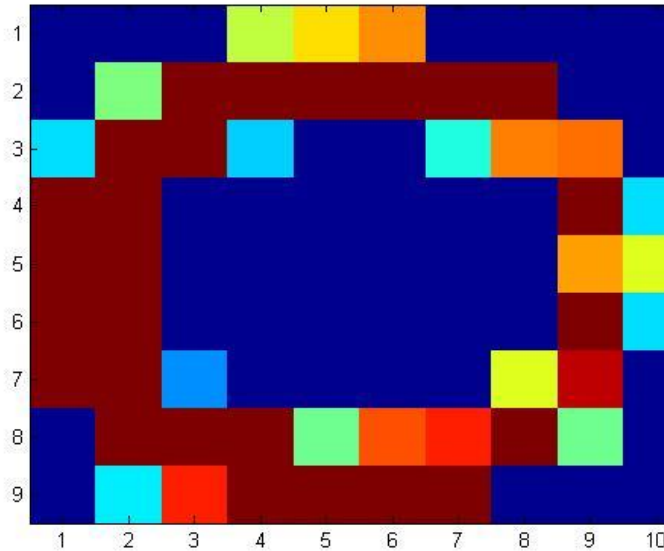
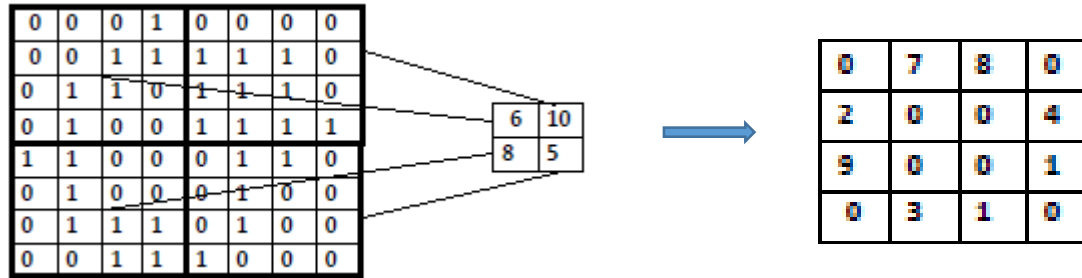
Región interior pico sin fallo



Región interior pico con fallo

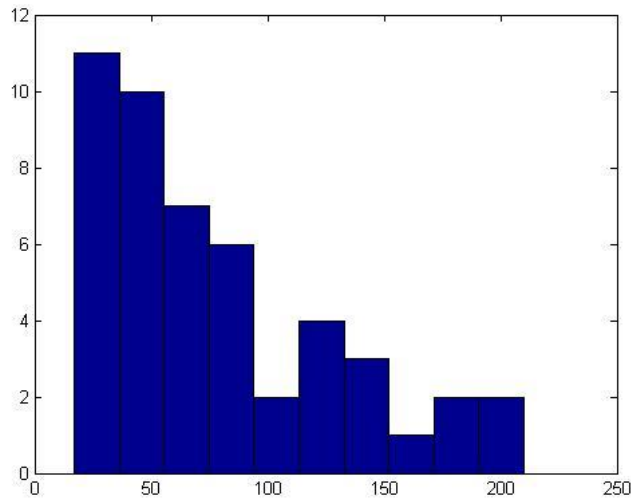
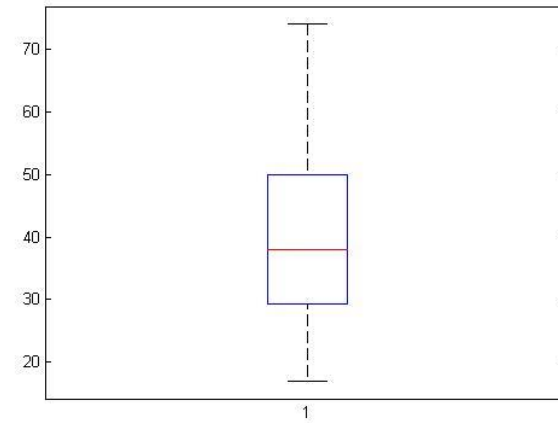
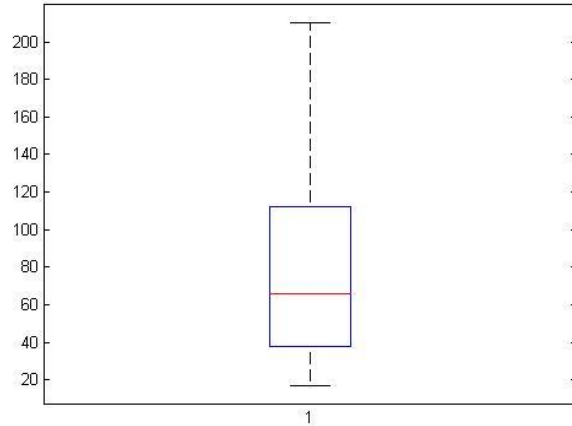


## Escalado

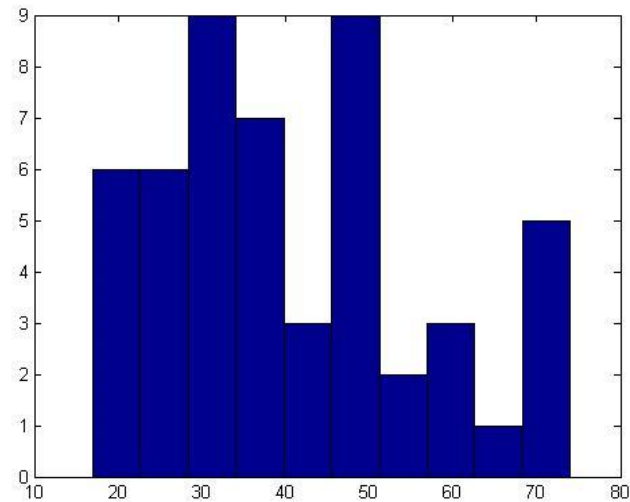


Representación de las texturas de los picos sin y con fallo

## Descriptores de textura



Pico sin fallo



Pico con fallo





## *Descriptorios*

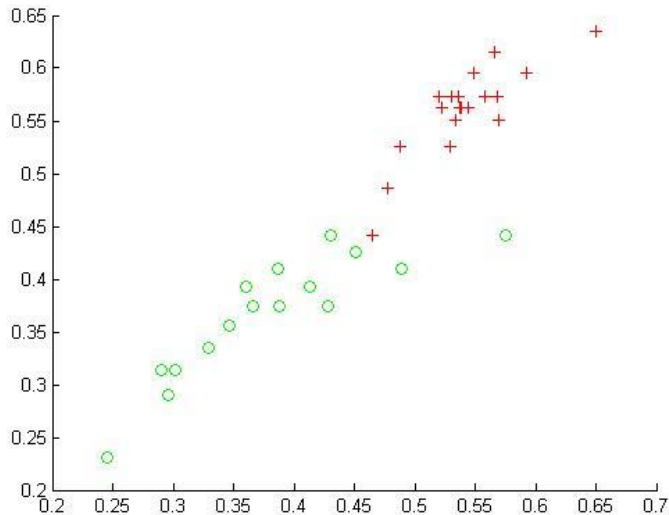
<b>Parámetro geométrico</b>	<b>Pico sin fallo</b>	<b>Pico sin fallo anterior al pico con fallo</b>	<b>Pico con fallo</b>
<b>Área:</b>	24	23	4
<b>Eje mayor:</b>	5.9246	6.3111	2.3094
<b>Eje menor:</b>	5.3732	4.8797	2.3094
<b>Diámetro:</b>	5.5279	5.4115	2.2568
<b>Perímetro:</b>	15.6569	15.6569	4
<b>Parámetro estadístico</b>	<b>Pico sin fallo</b>	<b>Pico sin fallo anterior al pico con fallo</b>	<b>Pico con fallo</b>
<b>Promedio:</b>	79	78.4186	40.6863
<b>Varianza:</b>	2686.9362	2657.9635	248.0996
<b>Sigma:</b>	51.8357	51.5554	15.7512
<b>Mediana:</b>	66	65	38
<b>IQR</b>	76	74	21.5

Valores para los tres picos de la señal

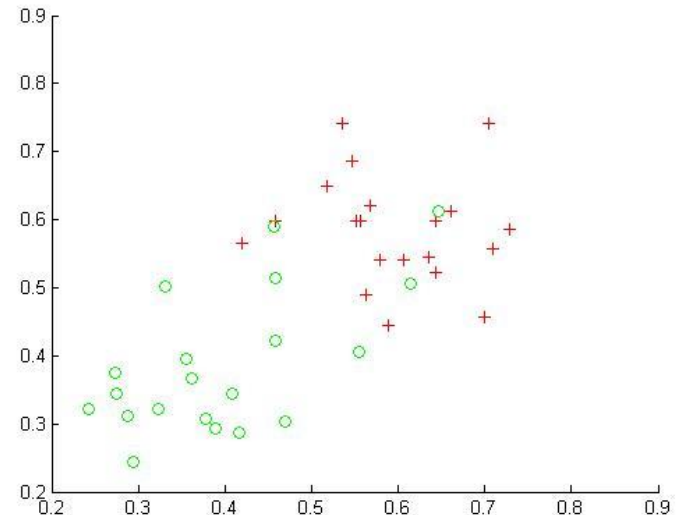


*¿Todas las características elegidas  
son igualmente válidas para la  
clasificación?*

Es necesario efectuar una buena selección



a) Eje menor y diámetro



b) Desviación y mediana

En rojo pico sin fallo y en verde con fallo



## Medida de la bondad de las características

Evaluador de bondad  
 $J_2 = |S/S_w|$



Varianza inter-clase

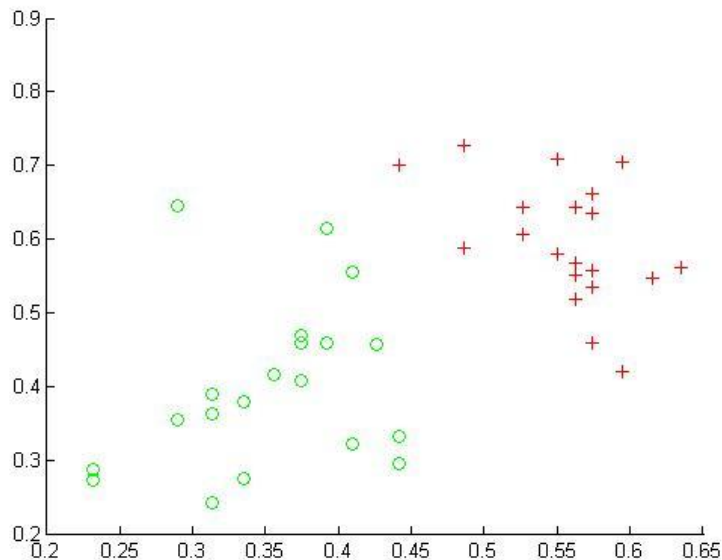
$$S_B = \sum_{k=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_0) (x_{ij} - \bar{x}_0)^T$$

Varianza intra-clase

$$S_w = \sum_{i=1}^m P_i S_i$$

Varianza total

$$S = S_w + S_B$$



Separabilidad para las características:  
**diámetro y desviación**

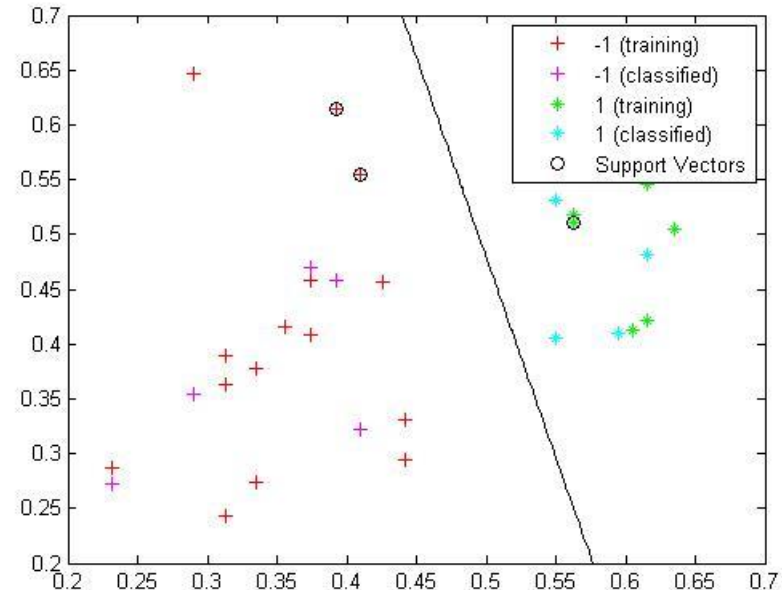


## Clasificación

### Resultados

Para el **entrenamiento** se ha aplicado clasificación lineal, empleando 15 picos sin fallo y otros 15 con fallo. El resultado dado por la **SVM** ha sido:

Para el **test** se han tomado otros cinco valores con fallo y cinco sin fallo



### Validación cruzada



Media aritmética de  $m$  iteraciones, eligiendo al azar cada vez, un subconjunto de prueba y otro de entrenamiento. Se emplea el método de Monte Carlo para decidir  $m$ .



## Aportaciones

*Se independiza el análisis del dominio del tiempo*

*La transformada de Hilbert permite la obtención de la imagen de las señales*

*Ha partir de la imagen es posible identificar el defecto.*

*La selección de variables ha hecho posible una identificación mas sencilla.*

*Se han validado los resultados*

## *Futuros trabajos*



**1. Experimentación en laboratorio con un prototipo que permita determinar la longitud del plano, y crear modelos mas precisos de los distintos fallos.**

**2. A partir del apartado anterior definir parámetros característicos en distintos dominios y aplicarlos a una red neuronal e intentar calificar el fallo**

**3. Realizar estudios estadísticos de pronostico, que permitan predecir evoluciones futuras de fallos, a fin de planificar el mantenimiento de una forma mas eficiente**

**4. En la detección de los picos adaptar una señal gaussiana, que genere el menor error cuadrático medio. La amplitud de la gaussiana se podría calibrar con respecto al peso de los vagones.**



**¡Muchas gracias!**