

Nueva técnica detección y medición de defectos en ruedas de tren por ultrasonido en condiciones dinámicas

Jose Brizuela¹

Consejo Superior de Investigaciones Científicas
La Poveda (Arganda del Rey), Madrid, 28500, España,
Tel.: (+34) 91 871 1900
Fax: (+34) 91 871 7050
brizuela@iai.csic.es

Resumen

Los procesos de frenado en el transporte ferroviario pueden dar origen a la formación de defectos superficiales en la llanta cuando la rueda se bloquea o patina sobre el carril. Estas situaciones pueden ocasionarse por la presencia de un freno defectuoso, congelado, o inclusive, por una baja adherencia rueda-carril causada por condiciones ambientales. El efecto de abrasión que sufre la rueda, genera un desgaste en la superficie de rodadura formando un defecto plano con longitudes que van normalmente entre los 20 y 100 mm. Asimismo, los planos pueden estar asociados con el origen de otros defectos superficiales, que en conjunto, reducen los estándares de seguridad y producen daños al material rodante e infraestructura.

Por estos motivos, es de interés para los operadores ferroviarios, detectar y cuantificar planos formados en las ruedas lo antes posible. Además, son preferentes los métodos automáticos para reducir los costes de mantenimiento en su aplicación periódica.

Este trabajo presenta una metodología de inspección por ultrasonido, basada en el envío de ondas de Rayleigh por un carril de medida para analizar el eco de contacto rueda-carril con el tren en movimiento lento. La técnica, de manera automática, detecta y cuantifica los planos formados en la banda de rodadura. Se presentan algunos resultados experimentales realizados con planos de 26 y 40 mm de longitud y con diferentes grados de desgaste. El método es muy robusto y proporciona una medida de la pérdida de material y longitud del plano inicial producido por el proceso de abrasión.

1. Introducción

Las ruedas de tren, durante su vida útil, están sometidas continuamente a procesos termodinámicos que pueden dar origen a la formación y crecimiento de fallas estructurales en la banda de rodadura. Entre los defectos superficiales más comunes se encuentran los planos, que se forman al deslizar la rueda cuando la fuerza de tracción o frenado supera a la de rozamiento rueda-carril ⁽¹⁾.

Cuando el tren circula a una velocidad superior a la crítica (30 - 50Km/h), la presencia de planos produce pérdidas del contacto rueda-carril que generan fuertes impactos, varias veces superior a la carga estática, y ocasionan daños a la superficie de rodadura y averías en el material rodante y en el fijo. Por otra parte, los planos elevan considerablemente los niveles de ruido y vibraciones y, asimismo, producen cierto incremento del consumo energético ⁽²⁾. Otros defectos (grietas, excoriaciones, exfoliaciones, etc.) también suelen estar involucrados con la presencia de planos, que en casos extremos, pueden ser motivo de descarrilamiento ⁽³⁾.

Por estas razones la detección prematura y reparación de los defectos formados en la superficie de rodadura es muy importante. También es deseable que la inspección de todo el material rodante se realice de manera automática y con el menor coste y tiempo posible. Diversos métodos han sido desarrollados para abordar esta problemática. Los sistemas más utilizados para la detección de planos, se basan en cuantificar la fuerza de impacto que generan las ruedas al transitar sobre un tramo de carril instrumentado con galgas extensiométricas ubicadas en el alma del carril ^(4,5). En otros casos, se emplean acelerómetros ubicados debajo del patín del carril para medir la deflexión que se produce al paso de las ruedas sobre el puesto de medida y determinar su estado ⁽⁶⁾. Ambas propuestas solo analizan el impacto producido por los defectos en la superficie de rodadura pero no ofrecen indicación sobre su dimensión.

Otras técnicas, mecánicas ⁽⁷⁾ y ópticas ⁽⁸⁾, miden la diferencia entre el radio de la superficie de rodadura y el de la pestaña (considerada libre de desgaste). Sin embargo, el entorno ferroviario hace que estos métodos sean muy sensibles a las vibraciones y poco robustos, limitando su resolución.

Las técnicas ultrasónicas también son utilizadas frecuentemente para detectar fallas superficiales. Por lo general, se emplea un transductor piezoeléctrico ⁽⁹⁾ o EMAT ⁽¹⁰⁾ que emite ondas de Rayleigh por la banda de rodadura y captura los ecos producidos por los defectos. Estos sistemas permiten inspeccionar toda la banda de rodadura desde un único punto de contacto con la rueda y son adecuados para detectar grietas en sentido axial y no tanto para otras orientaciones. Además es muy difícil discernir el tipo de defecto causante de la indicación y estimar su tamaño. Tampoco permiten la detección de planos, pues éstos no presentan cambios suficientes de impedancia acústica a la propagación de la onda superficial.

1.1 Descripción de una irregularidad plana

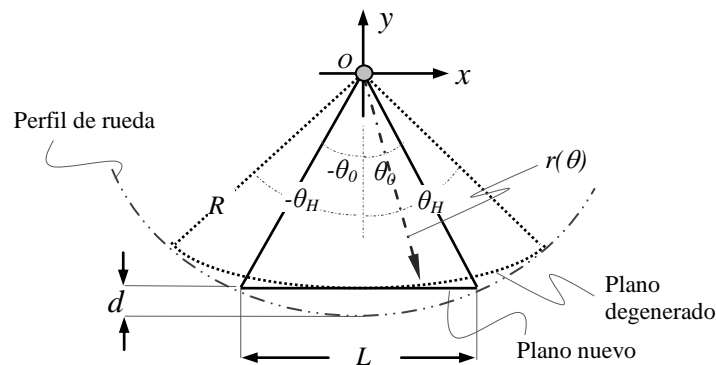


Figura 1. Representación a gran escala de un plano nuevo y su desgaste.

En una irregularidad plana destacan tres etapas desde su formación. En su origen (plano nuevo o inicial), el defecto puede representarse como la cuerda de una circunferencia (Fig. 1). La longitud L , el radio R y la pérdida de material d se relacionan mediante:

$$L = 2\sqrt{2Rd - d^2} \approx \sqrt{8Rd} \quad (1)$$

Sin embargo, con los sucesivos impactos de la irregularidad sobre el carril, sus bordes comienzan a redondearse (*plano parcialmente gastado*) hasta desgastarse por completo

hacia el centro (*plano degenerado*). No obstante, en las tres etapas, el plano conserva su máxima pérdida de radio d pero con un radio de curvatura finito ($r(\theta) \geq R$) y continuo en todos sus puntos ⁽¹¹⁾. Por otra parte, su longitud es mayor que la original y cubre un arco $[-\theta_H, \theta_H]$, siendo el centro del intervalo el punto de máxima pérdida de radio $r(\theta) = R - d$ con $\theta_H > \theta_0$ (Fig. 1). El plano puede seguir aumentando su longitud hasta derivar en una pérdida de redondez (ovalidad) ⁽¹²⁾.

1.2 Cinemática del punto de contacto rueda carril

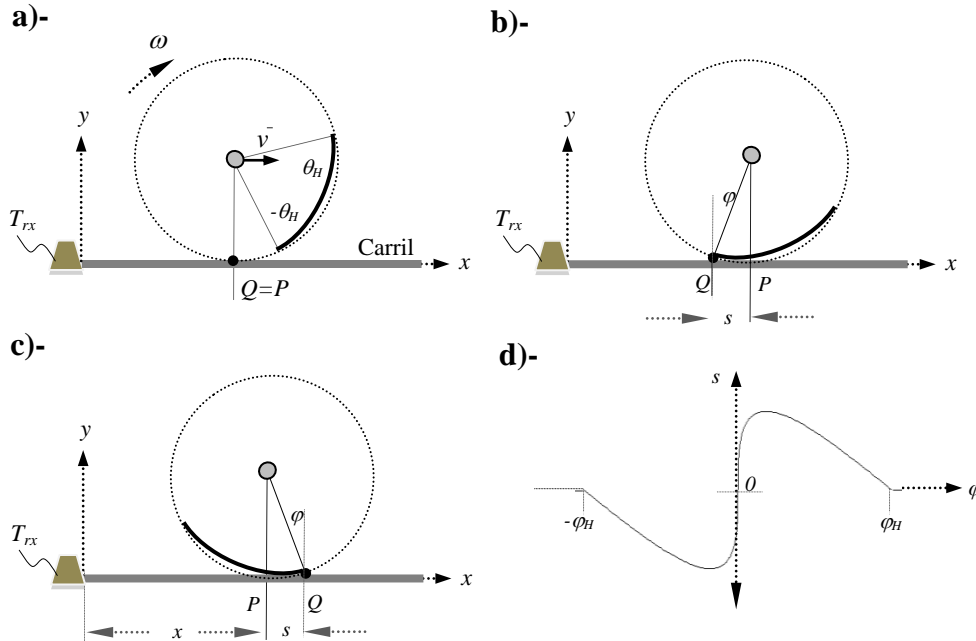


Figura 2. Rueda con una irregularidad desgastada. a)- Apoyo sobre un punto sin defecto. b)- Apoyo en la irregularidad (Q retrasa a P, $s < 0$). c)- Q adelanta a P ($s > 0$). d)- Representación del desplazamiento s en función de φ

El giro de la rueda respecto a su punto de contacto puede describirse siguiendo los esquemas de la Fig. 2. Mientras la rueda gira sobre la zona libre de irregularidades, el punto de contacto Q coincide con la proyección del centro de la rueda sobre el carril P (Fig. 2a). Esta situación se mantiene hasta que Q alcanza la irregularidad. A partir de este momento la rueda gira con un ángulo φ dentro del intervalo $[-\theta_H, 0]$ y el punto de contacto y la proyección se separan en una distancia s que es función de φ ($s \leq 0$, ver Fig. 2b). Cuando el giro de la rueda alcanza el valor $\varphi = |\theta_H|$, la irregularidad se apoya en el punto de máxima pérdida de radio, por tanto P y Q coinciden ($s = 0$). Para valores $0 < \varphi \leq \theta_H$, se refleja un retraso de P respecto a Q (siendo $s \geq 0$, ver Fig, 2c). La Fig. 2d muestra una representación de $s(\varphi)$ para una irregularidad desgastada.

El desplazamiento relativo entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril en función del ángulo de giro φ , está directamente vinculado con la pérdida de material que sufre la rueda en el momento de la abrasión. Puede demostrarse que el área encerrada bajo la curva $s(\varphi)$ es igual a 2 veces el valor de la pérdida d ⁽¹³⁾:

$$A = \int_{-\varphi_H}^{\varphi_H} |s(\varphi)| d\varphi = 2d \quad (2)$$

donde los límites de integración $\varphi_H = \theta_H$ se corresponden con el intervalo angular que determina la irregularidad. Por otra parte, la función $s(\varphi)$ es continua en todo el intervalo de integración, aún si existen puntos singulares (plano nuevo). Además, como la pérdida de radio d se mantiene constante desde el plano inicial a cualquier otra etapa de deterioro que le suceda, el resultado de (2) es válido para cualquier irregularidad plana con independencia del grado de desgaste.

Los límites de la integración indicados en (2) pueden extenderse a un valor arbitrario $\varphi_A \geq \varphi_H$, pues para un único plano, $s(\varphi) = 0$ cuando $|\varphi| > \varphi_H$. Por tanto, (2) puede formularse alternativamente para ser evaluada en toda la revolución de la rueda y obtener d , a partir de un parámetro auxiliar α :

$$d(\alpha) = \int_{\alpha}^{\alpha + \varphi_A} |s(\varphi)| d\varphi, \quad \text{siendo } 0 \leq \alpha \leq 2\pi - \varphi_A \text{ y } \varphi_A \geq \varphi_H \quad (3)$$

1.2 Velocidad del punto de contacto

En el sistema de referencia de la Fig. 2c, la proyección del centro de la rueda se ubica a una distancia x del origen, situado en una referencia fija sobre el carril en T_{rx} . Cuando la rueda se desplaza sobre el carril, la posición instantánea del centro de la rueda es x mientras que la del punto Q es $x + s$. Derivando respecto al tiempo se obtiene la velocidad del punto de contacto rueda-carril como:

$$v_Q = \frac{dx}{dt} + \frac{ds}{dt} = v + \frac{ds}{dt} = v + \omega \frac{ds}{d\varphi} \quad (4)$$

donde v es la velocidad de desplazamiento del tren y ω es la velocidad angular de la rueda. Durante el movimiento sobre una parte libre de defecto se tiene $s = 0$ y $v_Q = v$. Al llegar el punto de rodadura a una irregularidad el valor de s es negativo, pues la proyección del centro de la rueda adelanta al punto de contacto y $v_Q < v$. Cuando se produce el fenómeno inverso, Q adelanta a la proyección P , $s > 0$ y $v_Q > v$. Por tanto la presencia de una irregularidad se puede determinar midiendo las variaciones en la velocidad de desplazamiento del punto de contacto, o lo que es lo mismo, las variaciones de s en el tiempo (o de s con respecto al ángulo φ , ya que $d\varphi = \omega dt$).

2. Técnica de medida

Siguiendo el esquema de la Fig. 3, el carril es utilizado para enviar ondas ultrasónicas superficiales y determinar los cambios de velocidad del punto de contacto.

En una primera opción, pueden enviarse ondas superficiales monocromáticas y emplear las técnicas Doppler que son sensibles a la velocidad de un móvil. En este caso se trata de determinar las variaciones de velocidad v_Q del punto de contacto al pasar por una irregularidad. Así, cuando la rueda está en perfecto estado ($s = 0$), la velocidad de desplazamiento del punto de contacto es constante e igual a la del tren ($v_Q = v$), y proporcional a una frecuencia Doppler (referencia). Las irregularidades son detectadas analizando las desviaciones de la frecuencia Doppler respecto a la nominal ($s \neq 0$).

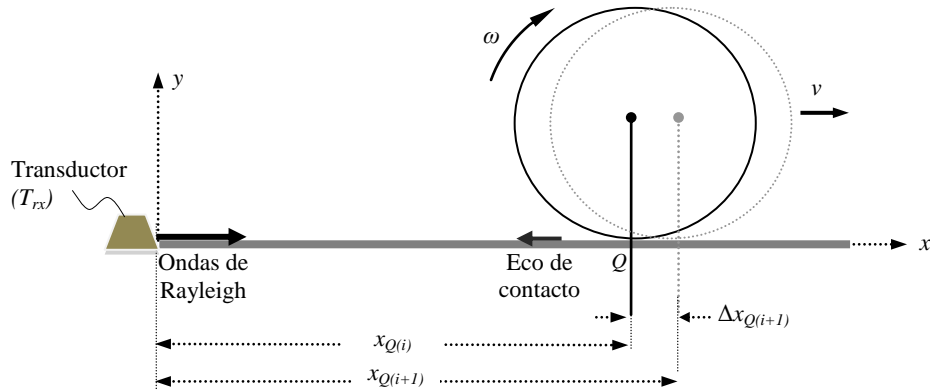


Figura 3. Representación del principio de medición

Esta técnica permite detectar planos mayores a 30mm de manera fiable. Sin embargo, está limitada por el conflicto de tiempo-frecuencia que surge entre obtener con buena resolución temporal los desplazamientos y, al mismo tiempo, resolver la frecuencia de Doppler con gran precisión para abarcar toda la longitud de los posibles defectos ⁽¹⁴⁾.

Una segunda alternativa, basado en el mismo montaje de la Fig. 3, es operar en pulso-eco, enviando un impulso ultrasónico de frecuencia central f_E a cadencia constante T_{PRF} por la superficie del carril de medida y recibiendo los ecos producidos por el punto Q . La posición de la rueda en el tiempo de ida y vuelta $T_Q(i)$ para el pulso i es:

$$x_Q(i) = \frac{c \cdot T_Q(i)}{2} \quad (5)$$

siendo c la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh. Por otra parte, asumiendo que el tren se mueve a velocidad constante v , la posición de la proyección del centro de la rueda sobre el carril para el pulso de interrogación i es $x_P(i) = i T_{PRF} v$. Por tanto, el desplazamiento relativo entre Q y P se obtiene de la siguiente manera:

$$s(i) = x_Q(i) - x_P(i) = \frac{c \cdot T_Q(i)}{2} - i T_{PRF} v \quad (6)$$

Considerando que $\Delta\phi = \omega \Delta t = v T_{PRF} / R$, se puede aproximar la integral indicada en (3) por una sumatoria de medidas discretas sobre un intervalo de M muestras:

$$d_k(M) = \frac{v T_{PRF}}{R} \sum_{i=k}^{k+M} s(i) \quad (7)$$

donde $s(i)$ está dado por (6) y M es la versión discreta del ángulo ϕ_A en (3). El proceso indicado en (7) puede interpretarse como la convolución entre la señal adquirida s con una ventana rectangular w de amplitud unitaria y anchura M . La secuencia resultante $d_k(M)$, para un plano simple, presenta dos máximos: uno negativo d_N y otro positivo d_P , correspondientes a los semiciclos positivo y negativo de s , cuyo valor absoluto escalado por el factor $v T_{PRF} / R$ proporciona la estimación de la pérdida de material d . Sin embargo, en aplicaciones reales donde las señales contienen cierto nivel de ruido, es conveniente considerar la estimación de d como el promedio de ambos valores:

$$d_E(M) = \frac{vT_{PRF}}{R} \frac{|d_P(M)| + |d_N(M)|}{2} \quad (8)$$

Una vez conocido el valor d_E , la longitud del plano inicial L_E se estima mediante (1). Por otra parte, la variable de velocidad v requerida en (8) puede obtenerse a partir del sistema de medición. Considerando que la posición del punto de contacto Q en el pulso siguiente $i+1$ es $x_Q(i+1) = x_Q(i) + T_{PRF} v_Q(i)$ (Fig. 3), el tiempo de vuelo $T_Q(i+1)$ y la velocidad instantánea $v_Q(i)$ son:

$$T_Q(i+1) = \frac{2x_Q(i+1)}{c} = T_Q(i) + \frac{2v_Q(i)}{c} T_{PRF} \quad (9)$$

$$v_Q(i) = \frac{T_Q(i+1) - T_Q(i)}{2T_{PRF}} c = \frac{\Delta T_Q(i)}{2T_{PRF}} c \quad (10)$$

siendo en (10) todos los parámetros conocidos o medidos. Por tanto, la velocidad del tren v puede estimarse tomando la media móvil de N medidas $v_Q(i)$:

$$v \approx \hat{v}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=j}^{i=j+N-1} v_Q(i) \quad (11)$$

Por otra parte el producto $vT_{PRF} = \Delta x$ presente en (8), indica el intervalo espacial de muestreo y determina la resolución en longitud de la irregularidad L . Por tanto el valor de M debe ser lo suficientemente grande como para capturar la mayor irregularidad de interés, siendo la longitud máxima estimable $L_{max} \leq 2vT_{PRF}M$.

2.1 Simulación del proceso de medida

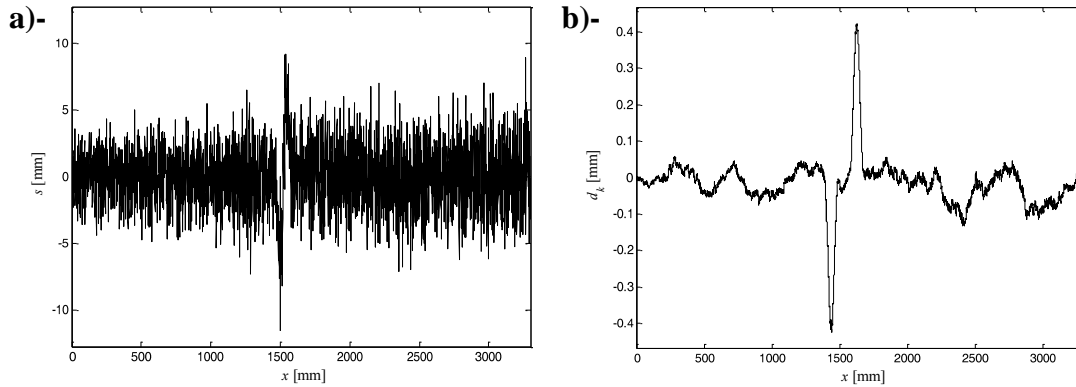


Figura 4. Simulación del proceso de medida. Parámetros: $R = 500$ mm, $c = 3000$ m/s, $d = 0.4$ mm, $\Delta x = 0.6$ mm.

En aplicaciones reales, las señales adquiridas están contaminadas por el ruido eléctrico y estructural del carril, provocando variaciones en la medida de la posición del punto de contacto. Sin embargo, el proceso de medida es muy robusto a este tipo de interferencias debido a la integración efectuada en (7). Para estudiar su comportamiento, se muestra la simulación de una señal $s(i)$ adquirida a intervalos $\Delta x = 0.6$ mm, correspondiente a un plano degenerado con $d=0.4$ mm en una rueda de $R = 500$ mm (Fig. 4a). La secuencia está contaminada de ruido gaussiano de media cero y desviación

estándar creciente con la distancia. El ruido representa una incertidumbre considerable en la búsqueda de la posición del eco después de cada pulso i .

La secuencia d_k obtenida por medio de (7) a partir de $s(i)$, empleando una ventana $M = 640$ muestras (o equivalente a una longitud $M_x = M \Delta x = 320\text{mm}$), se muestra en Fig. 4b. Se puede observar el efecto de filtrado causado por la sumatoria así como la concordancia de los picos negativo y positivo con el valor verdadero ($d = 0.4\text{ mm}$, $d_N = 0.4246\text{ mm}$, y $d_P = 0,4202\text{ mm}$), siendo el valor estimado $d_E(M) = 0.4224\text{ mm}$.

2.2 Elección de la ventana de integración

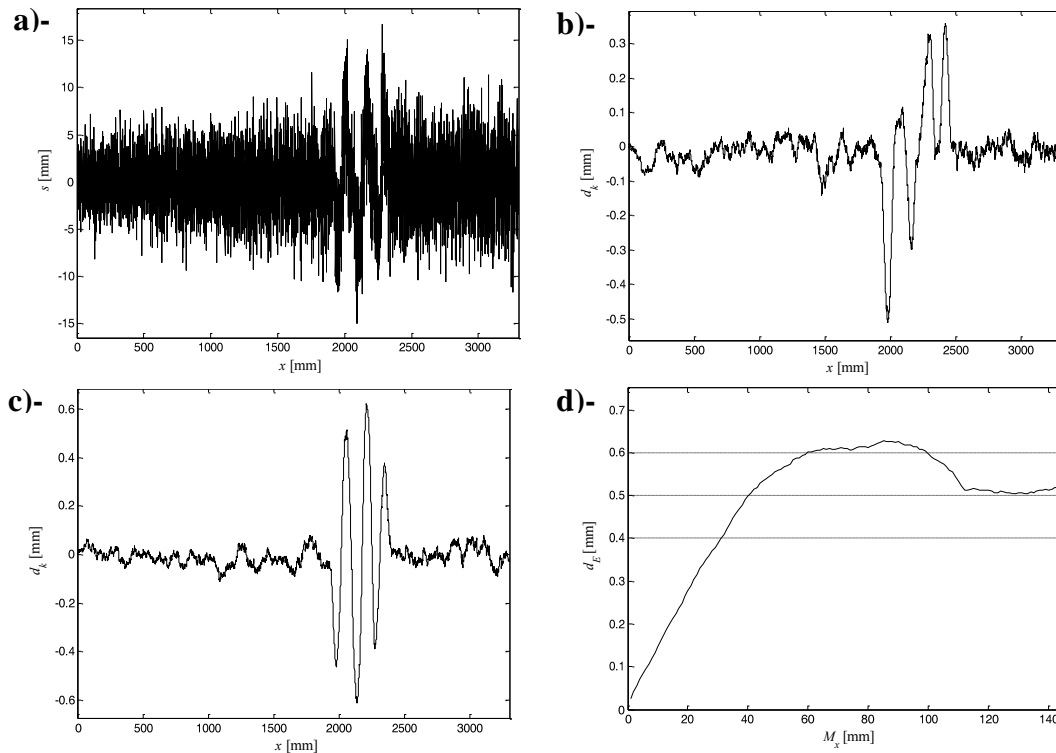


Figura 5. a)- Simulación una señal s con tres planos de $d = 0.4, 0.5, 0.6$ en una rueda con $R = 500\text{ mm}$. b)- Secuencia d_k obtenida con una ventana $M_x = 157\text{ mm}$. c)- Secuencia d_k con $M_x = 75\text{ mm}$. d)- Pérdida de material obtenida por un proceso de múltiples ventanas

Estrictamente el valor de M debe ser superior al número de muestras que forman un ciclo de s para realizar una estimación robusta de la pérdida de radio d , siempre que exista una irregularidad. Sin embargo, el uso de una ventana demasiado grande puede dar resultados erróneos cuando existen planos múltiples (defecto común en trenes de alta velocidad ⁽¹⁵⁾), pues la integración puede incluir partes de los ciclos positivos y negativos de s pertenecientes a distintos planos, que tienden a cancelarse.

En la Fig. 5a se muestra una señal s adquirida a intervalos $\Delta x = 0.6\text{ mm}$, correspondiente a tres planos con un cierto nivel de desgaste, sin solapamiento entre ellos (distanciados a 157mm), con sus respectivas pérdidas de material $d = 0.5, 0.6$, y 0.4 mm , en una rueda de $R = 500\text{ mm}$. La secuencia d_k que se obtiene de aplicar (7) con una ventana de integración $M_x = 150\text{ mm}$ (inferior al intervalo entre los planos), proporciona una información errónea de las irregularidades y, además, no revela la presencia del plano intermedio, que es el mayor de los defectos con $d = 0.6\text{ mm}$ (Fig. 5b).

Estos efectos son consecuencia del tamaño M_x escogido para la ventana, pues al realizar la integración se combinan valores de s que corresponden a planos consecutivos (los ciclos extremos se evalúan correctamente).

Repetiendo el mismo procedimiento pero con una ventana de menor tamaño $M_x = 75$ mm (la mitad que en el caso anterior), la secuencia obtenida d_k contiene una información acorde con la pérdida de material d de todos los planos: $d_{P1} = 0.514$ mm, $d_{N1} = 0.465$ mm, $d_{P2} = 0.623$ mm, $d_{N2} = 0.613$ mm, $d_{P3} = 0.389$ mm, $d_{N3} = 0.3677$ mm (Fig. 5c).

Por tanto, el valor de M debe determinarse mediante un proceso heurístico que prueba diferentes tamaños de ventanas de integración para la cada señal obtenida de s . De este proceso interesa la mayor de las estimaciones, pues se vincula con el defecto de mayor profundidad. Por otra parte, desde el punto de vista del mantenimiento ferroviario, este valor indica si la rueda debe ser reperfilada o retirada del servicio. Asimismo, a partir del mayor valor de d se puede determinar la profundidad de torneado, eliminando las irregularidades menores. La Fig. 5d muestra la gráfica de $d_E(M_x)$ donde se ha variado el tamaño de la ventana ($1 \leq M_x \leq 150$ mm) para la señal de Fig. 6a. El máximo de la gráfica proporciona una estimación de las características de la mayor irregularidad: $\max[d_E(M)] = 0.625$ mm, valor muy próximo al nominal de $d_3 = 0.6$ mm.

3. Experimentos y resultados

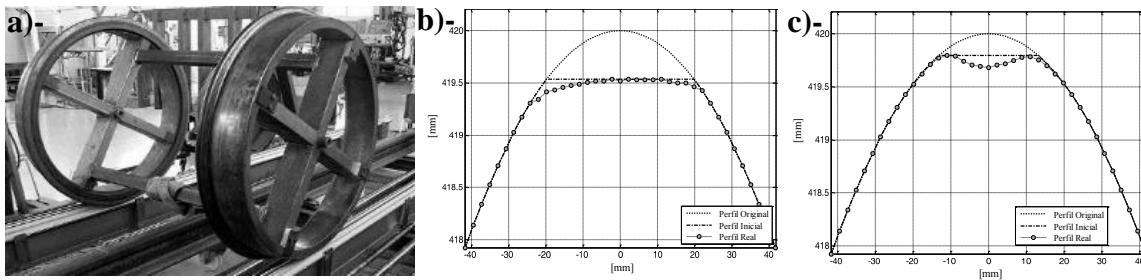


Figura 6. a)- Bancada experimental. b)- Perfil correspondiente al Defecto 1. c)- Perfil del Defecto 2

La verificación de la técnica propuesta se realizó en el laboratorio con un sistema prototipo. El banco de ensayos consta de un par de carriles de 2000 mm de largo y de un juego de llantas ferroviarias con radio $R = 420$ mm (Fig. 6a). Los pulsos de ondas de Rayleigh son generados por un transductor piezoeléctrico de 1 MHz excitado con un período de repetición T_{PRF} de 2 ms. El control se realiza con el sistema de ultrasonidos UltraScope® (Dasel, S.L., Madrid, España) que fue acondicionado a las necesidades de la técnica presentada ⁽¹⁶⁾. Se mecanizaron dos defectos de prueba, uno en cada rueda, y sus perfiles fueron determinados mediante un comparador mecánico (Figs. 6b y 6c).

El *Defecto 1* tiene un perfil asimétrico desgastado. La máxima pérdida de radio medida es $d = 0.46$ mm que se corresponde, aplicando (1), con una longitud de plano inicial $L = 39.3$ mm. Por otro parte, la geometría del *Defecto 2* se corresponde a una cavidad. Sin embargo, su comportamiento en condiciones dinámicas equivale a una irregularidad parcialmente gastada (de bordes redondeados y una zona central plana, ya que no puede rodar por la cavidad). La profundidad d correspondiente al plano inicial se obtiene a partir del valor a los bordes de la irregularidad, siendo $d = 0.20$ mm y $L = 25.9$ mm.

El ensayo se realizó alejando manualmente el juego de ruedas del transductor y, por tanto, la velocidad no es constante. Sin embargo, evaluando la posición del valor máximo en cada captura que contiene la señal del eco, se obtiene el tiempo $T_Q(i)$

necesario para calcular la posición del punto de contacto $x_Q(i)$ en (5), siendo $c \approx 3000$ m/s. Luego, la velocidad de la rueda se estima para cada disparo mediante (11).

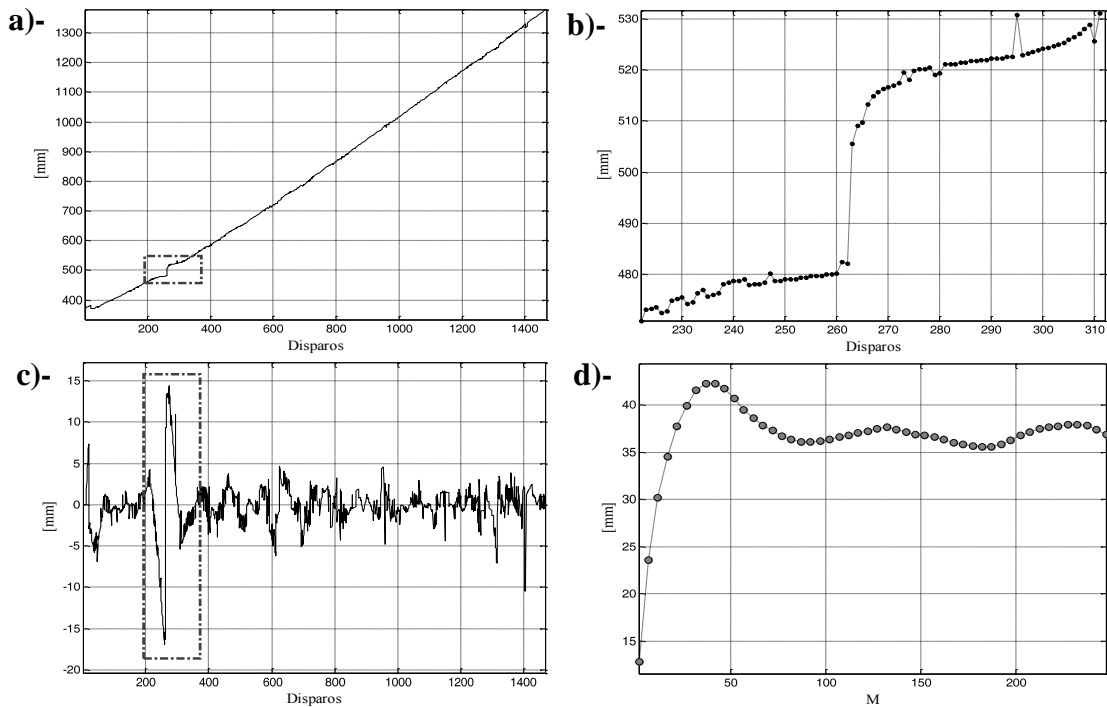


Figura 7. Resultados del ensayo realizado con el Defecto 1. a)- Curva de posición del punto de contacto $x_Q(i)$. b)- Zoom en la zona de discontinuidad $x_Q(i)$. c)- Curva de desplazamiento s . d)- Longitud del plano inicial estimado $L_E(M)$.

Siguiendo el procedimiento de evaluación, se obtuvo para el Defecto 1, la curva de posición correspondiente al punto de contacto en función del número de disparo x_Q (Fig. 7a). Presenta una zona de discontinuidad, que se muestra con detalle en la Fig. 7b, y coincide cuando la rueda se apoya sobre la zona del defecto. La velocidad media de la rueda en torno a la irregularidad es $v \approx 0.337$ m/s y el intervalo espacial de muestreo $vT_{PRF} = \Delta x = 0,67$ mm. El cambio de la pendiente se produce entre los disparos #220 y #300, en un intervalo de tiempo $\Delta t = 160$ ms. Por tanto, el salto en la posición del punto de contacto es $v\Delta t \approx 54$ mm, valor que ofrece una primera estimación de la longitud del defecto. Sin embargo esta medida es poco fiable, pues depende del intervalo escogido para su determinación (este valor coincide con el estado actual de la irregularidad, sin embargo no ofrece información del plano inicial y, por tanto, de la pérdida de material). El desplazamiento s , obtenido mediante (6), presenta los dos semiciclos que ocurren cuando la rueda transita sobre una zona irregular (Fig. 7c). Se observa además en la señal la contaminación de ruido residual, resultante de la incertidumbre al evaluar la posición del eco sometido a interferencia con el ruido estructural del carril. Por tanto, las áreas encerradas en ambos semiciclos no son equivalentes y la estimación de d mejora mediante el promediado de ambas.

La pérdida de radio $d_E(M)$ estimada mediante (8) se realizó empleando diferentes anchos de ventana $2 \leq M \leq 250$ muestras. La máxima estimación se obtiene para $M = 37$ (o bien, $M_x = 24.8$ mm), donde $d_E(37) = 0.53$ mm; valor algo superior al real medido (0.46mm). Para valores de $M > 37$ la estimación se estabiliza en torno al valor medio $d_{Emean} = 0.40$ mm con una desviación estándar $\sigma_{dE} = 0.08$ mm.

La estimación del plano inicial $L_E(M)$ se obtiene a partir de los valores $d_E(M)$ encontrados y en función de (1) (Fig. 7d). Del mismo modo que para $d_E(M)$, la máxima longitud estimada se encuentra en $L_E(37) = 42.30$ mm, y para ventanas de integración $M > 37$; los valores se estabilizan en la media de $L_{Emean} = 36.57$ mm con $\sigma_{LE} = 4.42$ mm. Continuando con la misma metodología, ambos defectos se evaluaron en varias posiciones de sus respectivos carriles de medida de forma que estén sometidos a diferentes estados de interferencia con el ruido estructural (ver resumen en Tabla 1). El intervalo espacial de muestreo es diferente en cada ensayo, pues la velocidad de inspección no es controlada. En todos los casos, se observa un mínimo error relativo cuando las estimaciones son máximas, situación que ocurre cuando la longitud de la ventana de integración es próxima a la del defecto. Sin embargo cuando el defecto se ubica a la máxima distancia de inspección (a más de 1300 mm), los errores en las estimaciones tienden a incrementarse debido, principalmente, a la atenuación del pulso e interferencias con el ruido estructural del carril que dificultan la correcta determinación de la posición del eco. No obstante, el error relativo en las estimaciones de la longitud del plano inicial para el *Defecto 1* nunca superaron el 12%.

Tabla 1. Resumen de los ensayos

Parámetro		<i>Defecto 1</i>			<i>Defecto 2</i>		
d	[mm]	0.46			0.20		
L	[mm]	39.3			25.9		
x	[mm]	500	1000	2000	700	900	1300
v	[m/s]	0.33	0.45	0.54	0.21	0.25	0.34
Δx	[mm]	0.66	0.90	1.62	0.42	0.50	0.68
d_{Emax}	[mm]	0.45	0.48	0.56	0.21	0.20	0.16
L_{Emax}	[mm]	38.90	40.75	43.72	27.07	26.16	23.57
$Err(L_{Emax})$	%	-1.01	3.68	11.32	4.51	0.10	-8.99
L_{Emean}	[mm]	35.40	36.03	40.30	24.14	23.02	21.06

Por otra parte, la detección el *Defecto 2* resulta más dificultosa debido a que las amplitudes de los semiciclos de la señal s son comparables con los niveles de ruido residual. Sin embargo, las estimaciones de la longitud del plano inicial se mantuvieron con errores relativos por debajo del 9%, confirmando de manera experimental la robustez del método propuesto.

El ensayo también fue realizado a múltiples velocidades de inspección, para verificar cómo influye este parámetro en las estimaciones de la pérdida de radio y por tanto en la longitud del plano inicial. La señal de desplazamiento s mostrada en la Fig. 7c fue diezmada para incrementar la velocidad hasta 3 m/s, y la longitud de la ventana de integración fue modificada hasta un valor máximo ($1 \leq M_x \leq 150$ mm). El resumen del experimento se muestra en la Tabla 2.

La máxima longitud estimada del plano inicial se continúa encontrando cuando la longitud de la ventana de integración M_x es próxima a la inicial del defecto (39.9 mm). Por otra parte, el tamaño de la ventana de integración en muestras M disminuye conforme aumenta la velocidad de inspección y, por tanto, las longitudes medias L_{Emean} tienden a disminuir, reduciendo la resolución del sistema. Sin embargo, las longitudes estimadas máximas L_{Emax} se mantienen en valores muy próximos al real, con errores relativos que no exceden el 4%.

Tabla 2. Resumen de las estimaciones a distintas velocidades

Parámetro	Defecto 1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v [m/s]	0,33	0,62	0,94	1,25	1,56	1,87	2,18	2,49	2,80	3,28
Δx [mm]	0,66	1,31	1,97	2,62	3,28	3,94	4,60	5,25	5,90	6,56
M [mues]	38	20	12	12	9	7	7	6	5	5
L_{Emax} [mm]	38,90	39,10	38,29	40,01	40,45	39,24	37,75	39,06	37,74	40,10
Err (%)	-1,01	-0,50	-2,57	1,80	2,92	-0,15	-3,94	-0,61	-3,97	2,14
L_{Emean} [mm]	35,40	36,22	34,32	36,90	36,43	35,88	34,28	33,12	33,09	32,80

4. Conclusiones

Se describió una novedosa metodología de detección de planos por ultrasonido, fundamentada en la medición del desplazamiento relativo entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. Esta medida establece la pérdida de material que dio origen a la formación de la irregularidad en el momento de la abrasión. Los desplazamientos pueden determinarse cuando el tren circula a velocidad lenta (verificado hasta $v = 3$ m/s) sobre un carril de medida, enviando ondas de Rayleigh y aplicando técnicas Doppler o pulso-eco.

El sistema de inspección es estático (independiente de la técnica que se escoja), con características constantes para todas las ruedas y estables en el tiempo. Sin embargo, la técnica de medida es dinámica, utiliza el propio movimiento del tren para efectuar las mediciones. El sistema ofrece importantes características para la industria ferroviaria, pues la inspección tiene un coste en tiempo prácticamente nulo, con lo que la frecuencia de inspección puede ser muy alta, facilitando llevar un histórico de cada rueda.

Las medidas son independientes del grado de desgaste de la rueda y de la irregularidad, resolviendo muchas de las dificultades a las que se enfrentan otros sistemas de inspección por medios ópticos, mecánicos, fuerzas de impacto, etc.

El método propuesto garantiza un correcto acoplamiento acústico transductor - carril, es válido para inspeccionar ruedas con perfiles de diferentes geometrías, y tolera bien superficies de contacto sucias o mojadas.

Por otra parte, la técnica presentada utiliza pulsos de interrogación a cadencia constante, lo que permite determinar la velocidad de la rueda, detectar y cuantificar los planos de manera automática y con elevada resolución. Las prestaciones de esta técnica fueron analizadas por simulaciones y comprobadas experimentalmente, demostrando una robustez frente a condiciones de ruido intenso. La resolución del sistema decrece con el aumento de la velocidad a la que se efectúa la inspección; sin embargo, las estimaciones se mantienen próximas al valor real con velocidades de hasta 3 m/s. Por último, la elección del tamaño de la ventana de integración no es crítica, pues el uso de múltiples ventanas, proporciona un método independiente el número y distancia entre planos.

Agradecimientos

El autor extiende un especial agradecimiento a la Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales (AAENDE) por su invitación a participar en la 8^{va} edición del CORENDE. El trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto TRA-2007-67711/AVT, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y del

proyecto D0100SR contratado por DANO-RAIL, S.L. del Grupo DANOBAT, Productos y Servicios Ferroviarios (Elgoibar – Guipuzcoa).

Referencias

1. N. Kumagai, H. Ishikawa, and et al., 'Factors of wheels flats occurrence and preventive measures', *Wear*, Vol 144, No 2, pp 277-287, 1991.
2. N.A., Ackerman, 'Research Pay Off: Dynamic Wheel Load Detector Extends Life of Concrete Railroad Ties', Informe técnico 128, Transportation Research Board, TR News, Washington D.C., 1987.
3. J. Jérgeus, C. Odenmark and et al., 'Full-scale railway wheel flat experiments', *IME Proc.*, Vol 213, No 1, pp 213, 1-13, 1999.
4. Salient Systems, Inc., 'Intelligent track solutions', información disponible en <http://www.salientsystems.com>, accedido 29 de Julio, 2011.
5. B. Stratman, Y. Liu and S. Mahadevan, 'Structural health monitoring of rail road wheels using impact load detectors', *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol 7, No 3, pp 218 – 225, 2007.
6. V. Belotti, F. Crenna and et al., 'Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform', *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 20, No 8, pp 1953–1966, 2006.
7. Q. Feng, J. Cui and et al., 'A dynamic and quantitative method for measuring wheel flats and abrasion of trains', 15th World Congress on NDT, Rome, Italy, 15-21 October 2000.
8. P. Gutauskas, 'Railroad flat wheel detectors'. US Patent No. 5 133 521, 1992.
9. A. Ibáñez, M. Parrilla and C. Fritsch, 'Inspección mediante ultrasonidos de ruedas de tren en operaciones de mantenimiento', V CORENDE, Neuquén, Argentina, 2-4 Noviembre, 2005.
10. H. J. Salzburger, L. Wang and X. Gao, 'In-motion ultrasonic testing of the tread of high-speed railway wheels using the inspection system (AUROPA III)', 17th World Conference on NDT. Shangai, China, 25-28 October, 2008.
11. T. X. Wu and D. J. Thompson, 'On the parametric excitation of the wheel/track system', *Journal of Sound and Vibration*, Vol 278, No 5, pp 725-747, 2004.
12. T. Snyder and D. H. Stone, 'Wheel flat and out-of-round formation and growth', *IEEE/ASME Joint Rail Conf. Proc.*, pp 143-148, 2003.
13. J. Brizuela, 'Detección de planos en ruedas de tren por análisis ultrasónico del contacto rueda-carril en condiciones dinámicas', Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Cap. 2, pp 50-57, ISBN: 978-84-694-2445-2, disponible en: <http://eprints.ucm.es/12316>, accedido 29 de Julio, 2011.
14. J. Brizuela, A. Ibáñez, P. Nevado and C. Fritsch, 'Flaw detector for railways wheels by Doppler effect', *Physics Procedia*, Vol 3, No 1, pp 811 – 817, 2010.
15. M. Grosse, M. Ceretti, and P. Ottlinger, 'Distribution of radial strain in a disc-braked railway wheel measured by neutron diffraction'. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol 74, pp 1400–1402, 2002.
16. J. Brizuela, A. Ibáñez and C. Fritsch, 'NDE system for railway wheel inspection in a standard FPGA', *Journal of System Architecture*, Vol 56, pp 616-622, 2010.