Sistema integral para inspección automática por ultrasonidos de ruedas elásticas ferroviarias

Francisco Javier González-Fernández* Doctor Ingeniero Industrial
María Antonia García-San Andrés** Ingeniera Industrial
Carlos Sancho-de Mingo** Doctor Ingeniero industrial
Antonio González-Rodriguez** Ingeniero Industrial
Miguel Gómez-Parra** Ingeniero Industrial

* 2 iT - Ingeniería de Instalaciones y Trenes, S.L. Avda Nazaret, 3 - 28009 Madrid. Tfno: +34 914 094594. javier.gonzalez@2itingenieria.com

** Metro de Madrid. C/ Néctar, s/n - 28022 Canillejas (Madrid). Tfno: +34 917 415942. mantonia.garcia@metromadrid.es; carlos.sancho@metromadrid.es; antonio_gonzalez@mail.metromadrid.es; miguel.gomez@mail.metromadrid.es

Recibido: 02/11/2010 • Aceptado: 21/03/2011

Automatic inspection system for railway wheels

ABSTRACT

• Currently, the railroad complies with stringent security requirements. A key element from the point of view of security is the condition of the wheels of railway vehicles. From the standpoint of maintenance, ensuring the optimum state of wheels is always a priority, so the development of advanced inspection methods of the wheels (both external geometry and internal defects) is nowadays more relevant in the sector. This paper presents an innovative ultrasonic inspection system in railway resilient wheels, incorporating full automation of the measurement process, diagnosis and management of information, all without having to remove any wheel.

• Keywords: railways, wheels, maintenance, automatic inspection, ultrasounds, shrinkage cracks, Non Destructive Testing (NDT).

RESUMEN

En la actualidad, el ferrocarril debe cumplir con exigentes requisitos de seguridad. Un elemento fundamental, desde el punto de vista de la seguridad, es el estado de las ruedas de los vehículos ferroviarios. Desde el punto de vista del mantenimiento, garantizar el estado óptimo de la rodadura está siempre a la cabeza de las prioridades, por lo que el desarrollo de métodos de inspección avanzados de las ruedas (tanto de su geometría externa como de defectos internos) cobra día a día mayor relevancia en el sector. El coste de estas inspecciones de forma manual es muy elevado. Este artículo presenta un innovador sistema de inspección por ultrasonidos en ruedas ferroviarias elásticas, integrando una automatización completa del proceso de medida, diagnosis y gestión de la información, y todo ello sin necesidad de desmontar una sola rueda, y con mínimas intervenciones manuales; lo que implica un reducido coste de explotación.

Palabras Clave: ferrocarril, ruedas, mantenimiento, inspección automática, ultrasonidos, fisuras, Ensayos No Destructivos (END).

1. ANTECEDENTES

En las explotaciones ferroviarias, el método de desplazamiento suburbano más ampliamente utilizado es el de rueda de acero rodando sobre un carril igualmente de acero. Las ruedas de los trenes tienen por misión sustentar, guiar, transmitir al carril los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce solicitaciones térmicas y mecánicas en las ruedas.

Los elevados requerimientos de seguridad que se aplican en el sector ferroviario exigen una revisión periódica del material rodante y muy especialmente de las ruedas de los trenes, por la posible aparición de fisuras que en caso de progresar conducen a la fractura de la rueda con consecuencias potencialmente catastróficas. El coste de estas intervenciones suele ser uno de los más relevantes en cualquier explotación, por lo que su optimización es un reto para todas ellas.

En la actualidad todas las explotaciones ferroviarias inspeccionan regularmente sus ejes y ruedas mediante ensayos no destructivos, siendo la técnica predominante la de ultrasonidos. La inspección puede realizarse de forma manual o mediante sistemas

automatizados. El principal problema de la inspección manual de ruedas es disponer de personal muy especializado en la técnica de análisis de fisuras por ultrasonidos y la gran cantidad de tiempo que se emplea en la misma y que afecta a la disponibilidad del material móvil.

En tranvías, metros ligeros y ferrocarriles suburbanos, se suelen utilizar ruedas elásticas (Figura 1), que consisten en unir el bandaje metálico (llanta) al bloque también metálico de la rueda a través de una banda elástica o tacos de goma que permiten dos grandes ventajas:

- amortiguar ruidos y vibraciones derivadas de la rodadura, mejorando el confort de los viajeros;
- permitir la posibilidad de cambiar la llanta conservando el bloque de la rueda, lo que abarata el mantenimiento del material rodante.

La aparición de fisuras en las ruedas elásticas es un fenómeno de vital importancia para la correcta circulación de los trenes debido a dos factores principalmente:

- Seguridad: debido al peligro de rotura de la rueda o de que parte de la pestaña o de la banda de rodadura se desprenda, pudiendo ocasionar un descarrilo.
- Confort: las grietas pueden llegar a ocasionar coqueras que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros.

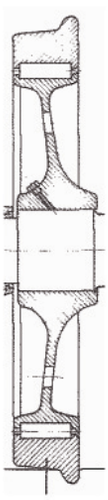


Fig.1: Rueda elástica

2. TIPOLOGÍA DE FISURAS ESPERABLES EN EL BANDAJE DE RUEDAS ELÁSTICAS

A efectos del estudio de las posibles fisuras en el bandaje, se consideran tres zonas de análisis, tal como se muestra en la Figura 2.

2.1. ZONA INTERNA DEL BANDAJE

Se caracteriza por ser la zona donde es más probable la aparición de fisuras, interesando la detección de fisuras lo más pequeñas posibles, incluso incipientes.

Dentro de esta zona, destaca específicamente la cobertura de la parte alrededor del vértice central, que es donde es de esperar la mayor probabilidad de aparición de fisuras, al ser el área donde se produce el contacto eléctrico de tierra, a través de tres tacos con *shunt* de cobre dispuestos a 120º que son los que permiten el paso de la corriente de tracción y servicios auxiliares.

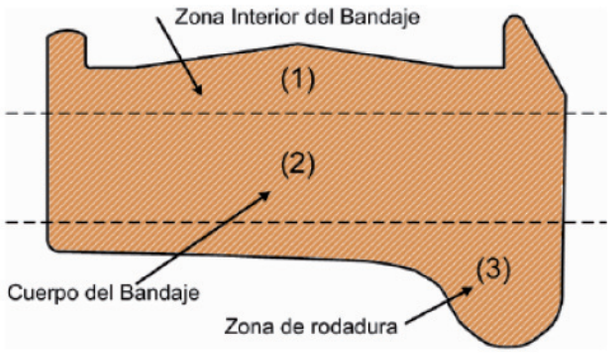


Fig.2: Zonas del Bandaje

2.2. CUERPO DEL BANDAJE

En esta zona la probabilidad de aparición de fisuras es escasa. Concretamente, podrían encontrarse poros, pliegues de laminación o zonas con aglomeración de óxidos e inclusiones no metálicas, estando estos defectos más relacionados con el proceso de fabricación que con el desgaste propio de la rueda.

Aunque la aparición de este tipo de defectos es poco frecuente, estos defectos pueden dar lugar a grietas de fatiga que van progresando en el tiempo y terminar en la rotura del bandaje.

Para esta zona, se deberá disponer un conjunto de palpadores que realicen la inspección del interior del bandaje desde la banda de rodadura para detectar los defectos que se encuentren en la zona central.

2.3. BANDA DE RODADURA

En esta zona es esperable la aparición de fisuras superficiales (*spalling*), causadas por la formación de planos de bloqueo en la zona de rodadura, donde la fricción entre el carril y la rueda introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, alcanzándose temperaturas próximas a 800ºC. A estas temperaturas el limite elástico disminuye, pudiéndose producir deformación plástica.

Cuando se libera la rueda se produce un rápido enfriamiento y se puede producir un cambio de fase en la banda pasando de estructura *perlítica* a *martensita* mucho más frágil, lo que - unido a una contracción por el enfriamiento - produce una microfisura que tiende a progresar por la acción de las tensiones del contacto de la rodadura.

Por este motivo, deben eliminarse por retorneo lo antes posible todos aquellos planos que se formen en las ruedas elásticas. En la normativa de cada explotación se suele establecer el plazo máximo para el retorneo de planos.

Para esta zona, la inspección de fisuras debe orientarse a detectar fisuras no en su fase incipiente, sino cuando ya

han alcanzado una cierta profundidad. De otro modo, los arañazos normales en esta zona de la rueda podrían dar lugar a un elevado número de falsas alarmas.

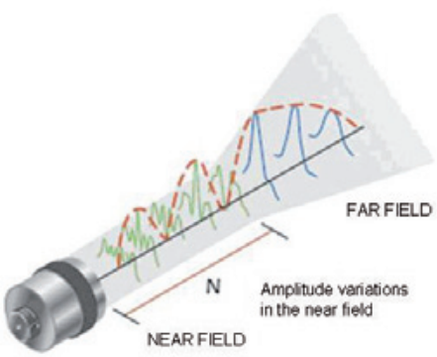
3. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

La técnica de inspección por ultrasonidos es la más ampliamente utilizada actualmente en la detección de fisuras en aceros, y de los diferentes métodos aplicables mediante esta técnica, el más indicado para la inspección de ruedas ferroviarias es el llamado "pulso-eco".

Otros métodos como "transmisión", que se emplea en materiales de gran atenuación como los *composites* aeronáuticos o "*time-of-flight diffraction*" (Difracción del tiempo de vuelo) ampliamente usados para inspección de soldaduras no son apropiados para esta aplicación.

De forma muy breve, un sistema de inspección por ultrasonidos utiliza las propiedades de transmisión del sonido en los materiales para identificar la presencia, posición y tamaño de discontinuidades en el mismo.

Para obtener resultados aprovechables, se utilizan frecuencias mucho más allá de las frecuencias audibles, en el rango de los megahercios, de ahí el nombre de ultrasonidos. Para generar los ultrasonidos se utilizan unos transductores denominados palpadores, basados en el efecto piezoeléctrico y que convierte la energía eléctrica en acústica y viceversa. Se aplican impulsos eléctricos de muy corta duración para generar frentes de onda muy cortos y poder disponer así de una gran resolución en distancia. La Figura 3 muestra la composición de un palpador clásico.



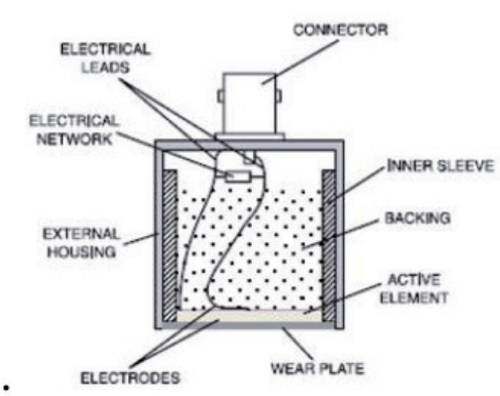


Fig. 3: Palpador de Ultrasonidos

Estos palpadores ultrasónicos generan un haz sonoro que se propaga en línea recta perpendicular a la cara frontal del mismo. Como cualquier onda, a la salida del elemento emisor se encuentra un campo cercano donde la amplitud del campo sonoro presenta grandes variaciones. La longitud de este campo cercano depende del diámetro del elemento radiante y de la frecuencia. En concreto:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 \times f}{4c}$$

Mas allá del campo cercano, en el llamado campo lejano, la onda sonora se va atenuando de forma gradual a la vez que el haz se va abriendo con un ángulo que de nuevo depende del diámetro del emisor y de la frecuencia:

$$\alpha_{-6dB}: \quad \sin(\alpha/2) = 0{,}514 \times \frac{\lambda}{D} = 0{,}514 \times \frac{c}{f \times D}$$

En ambas formulas, c representa la velocidad del sonido en el material por donde viaja la onda acústica, su valor depende del *modulo de Young* del material y de su densidad. La Figura 4 muestra una representación de los parámetros anteriormente descritos para un palpador típico.

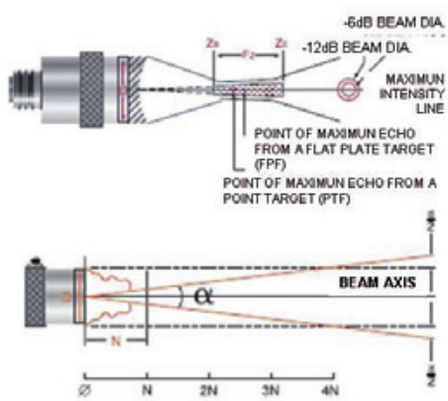


Fig. 4: Parámetros físicos del sonido

Las ondas generadas pueden avanzar según ciertos modos de propagación. Los más habituales en la inspección industrial por ultrasonidos son:

- **Ondas longitudinales**: la dirección de propagación de la onda y la de la vibración coinciden.
- **Ondas transversales**: la dirección de propagación de la onda y de la vibración son perpendiculares.
- **Ondas superficiales**: también llamadas de *Rayleigh*, que se propagan por la superficie de los materiales, siguiendo su contorno.

La Figura 5 ilustra los modos de propagación longitudinal y transversal.

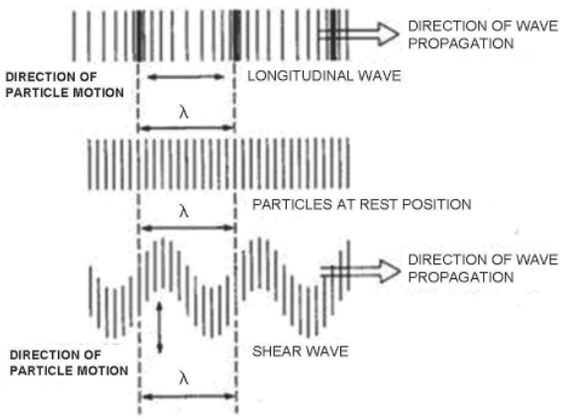


Fig.5: Palpador de Ultrasonidos

La velocidad del sonido en el medio depende del modo de propagación del sonido. En el acero la velocidad de las ondas longitudinales es de aproximadamente 5.940 m/seg, mientras que para las ondas transversales esta velocidad se reduce a 3.260 m/seg. En el agua la velocidad del sonido, ondas longitudinales, es de 2.730 m/seg, en los líquidos y gases no se propagan las ondas transversales.

Dos importantes propiedades de las ondas, en general, y del sonido, en particular, son la Reflexión y la Refracción.

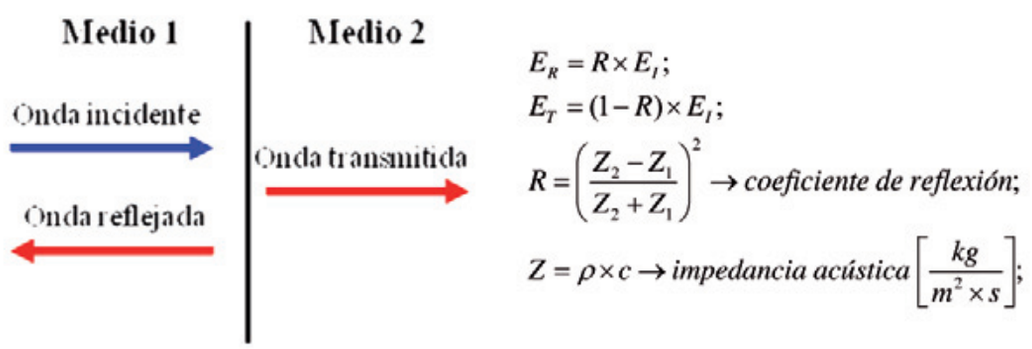
Cuando una onda viaja por un medio y pasa a otro medio diferente, con velocidades de propagación diferentes en uno y otro, una parte de la energía "incidente" pasa al otro material, onda "transmitida", pero otra parte se "refleja" y retorna hacia el medio incidente dando lugar a una onda "reflejada".

La cantidad de energía que se transmite y se refleja depende la relación de velocidades en cada medio, es lo que se denomina coeficiente de reflexión. La figura 6 ilustra estos conceptos:

Si la onda incide perpendicularmente a la superficie del otro material la onda transmitida y reflejada mantienen la dirección, pero si incide oblicuamente se produce el fenómeno de la refracción. Ver Figura 7.

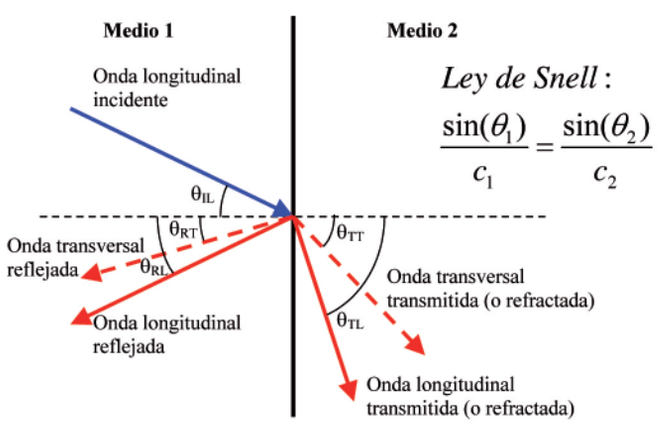
Las velocidades del sonido en ambos medios vienen dadas por c1 y c2. Hay un par de velocidades para cada medio según hablemos de ondas longitudinales o transversales.

Para un determinado ángulo de incidencia, la onda transmitida se refracta 90º dando lugar a una onda de superficie. Por encima de este ángulo critico, se produce la reflexión total.



$$E_R = R \times E_I;$$
$$E_T = (1-R) \times E_I;$$
$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2 \rightarrow \textit{coeficiente de reflexión};$$
$$Z = \rho \times c \rightarrow \textit{impedancia acústica} \left[\frac{kg}{m^2 \times s}\right];$$

Fig. 6: Reflexión de onda con incidencia normal



Ley de Snell :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2}$$

En este caso :

$$\sin(\theta_{TT}) = \frac{c_{2T}}{c_{1L}} \times \sin(\theta_{IL});$$
$$\sin(\theta_{TL}) = \frac{c_{2L}}{c_{1L}} \times \sin(\theta_{IL});$$
$$\sin(\theta_{RT}) = \frac{c_{1T}}{c_{1L}} \times \sin(\theta_{IL});$$
$$\sin(\theta_{RL}) = \frac{c_{1L}}{c_{1L}} \times \sin(\theta_{IL}) = \sin(\theta_{IL});$$

Fig.7: Reflexión y refracción de onda con incidencia oblicua

Para detectar un defecto se utiliza el hecho de que una fisura (o el final del material) presenta un cambio de impedancia radical, con un cambio de velocidades que hace que la práctica totalidad de la onda se refleje. Un palpador emite un pulso de ultrasonidos que en el caso de ausencia de defectos alcanzara el otro extremo del material reflejándose de forma total.

Una fisura producirá un eco, de amplitud proporcional a su área y que alcanzará el palpador en un tiempo, llamado "tiempo de vuelo" proporcional a su distancia a la superficie. Ver Figura 8.

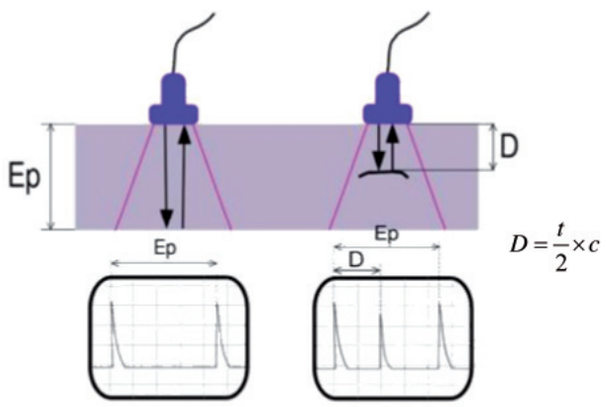


Fig. 8: Ecos de un defecto y el fondo

La distancia se determina con gran precisión simplemente midiendo el tiempo de vuelo. La dimensión de una posible fisura se estima comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado con la amplitud del sonido reflejado por un reflector de referencia de tamaño conocido o con el eco de fondo en las zonas que no contienen grietas.

Cuando se inspecciona volúmenes la representación más habitual es el C-Scan, que representa la amplitud de los ecos recibidos en función de la posición del palpador en un barrido bidimensional. La amplitud se representa en falso color (escala de grises o colores). La Figura 9 muestra una representación C-Scan.

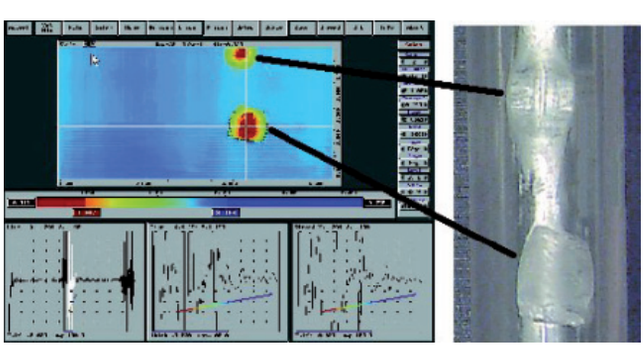


Fig.9: Representación C-Scan

En el eje de abscisas se tiene la posición horizontal del palpador (barrido), mientras que en el eje de ordenadas tenemos la posición vertical del palpador (pasadas), la información de amplitud se tiene en el color de la representación. No hay información de profundidad.

4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN MANUAL DE RUEDAS CON BANDAJE

Actualmente, en METRO de Madrid, la inspección de las ruedas se realiza mediante ultrasonidos, utilizando la técnica de impulso-eco, que presenta las ventajas de permitir estimar la posición y el tamaño de las fisuras detectadas.

La localización de la fisura está determinada por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. Para una velocidad del sonido ese tiempo se traduce en una distancia.

Las dimensiones de las fisuras se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una falla con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido.

La inspección se realiza de forma manual, utilizando palpadores posicionados en la banda de rodadura, utilizando grasa como acoplante y con el ángulo de inclinación apropiado (se utilizan palpadores con ángulos de incidencia de 0º y 45º) para examinar la llanta (bandaje metálico de la rueda).

Para el ajuste del equipo se utiliza un bloque patrón de calibración tipo K1-V1 y, como ayuda a la interpretación de resultados, se utiliza otro bloque de un acero con características similares al de la pieza a examinar, con taladros de fondo plano a distintas profundidades.

5. LIMITACIONES OPERATIVAS DE LA INSPECCIÓN MANUAL

Con el método de inspección manual descrito en el punto 3, el tiempo de indisponibilidad por unidad de 2 coches (16 ruedas) se estima en unas 7 horas, incluyendo, además del proceso de inspección propiamente dicho, el tiempo necesario para el correcto posicionamiento de los ejes y la disposición del equipo de inspección. En términos operativos, se requiere una jornada de trabajo y dos agentes especializados para realizar la inspección de una unidad de dos coches.

A la vista de esto, en las explotaciones ferroviarias medianas o grandes, la gran cantidad de ejes a inspeccionar justifica sobradamente la inversión en un equipo de inspección automatizado que permita realizar las mediciones necesarias para garantizar el buen estado del material rodante sin penalizar su disponibilidad.

Vista la necesidad de mejorar el actual método de inspección manual y la inadecuación de los equipos de inspección automática disponibles a sus necesidades específicas, METRO de Madrid ha decidido abordar un proyecto de I+D+i para diseñar y desarrollar un sistema

de inspección automática específicamente adaptado a sus necesidades, con los siguientes objetivos específicos:

- conseguir la inspección periódica de la totalidad del material móvil con ruedas elásticas de la red;
- aumentar la seguridad del material móvil mediante un sistema de inspección de mayor fiabilidad;
- optimizar las necesidades de personal cualificado en la realización de la inspección, eliminando la necesidad de un conductor para posicionar los ejes a inspeccionar y sacar el máximo partido a los técnicos con alto nivel de cualificación que realizan inspecciones por ultrasonidos;
- minimizar el tiempo de indisponibilidad de las unidades inspeccionadas;
- efectuar el diagnóstico del estado del bandaje de las ruedas en tiempo real;
- incorporar los resultados de cada inspección en una base de datos que pueda ser consultada a distancia a través de la red informática de la explotación;
- diseñar una estrategia de inspección específica orientada hacia la inspección completa de todas las zonas críticas del bandaje de las ruedas, diferenciando zonas según el tipo y el origen de los defectos encontrados.

6. REQUISITOS PARA UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPECCIÓN

El sistema que aquí se describe está concebido para automatizar la totalidad del proceso de inspección de ruedas elásticas de los trenes de la red en servicio, permitiendo sistematizar el complejo proceso de inspección para la detección de fisuras en el bandaje metálico de las ruedas. Para conseguir esto, el sistema debe hacer frente a una serie de requisitos técnicos.

6.1. AUTOMATIZACIÓN COMPLETA DEL PROCESO DE INSPECCIÓN Y REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE INDISPONIBILIDAD

Se pretende que, al situar el tren a inspeccionar en un punto determinado, el sistema sea capaz de operar de forma totalmente desatendida mediante la simple activación de un pulsador.

Esta mejora del proceso de medida puede lograrse con un sistema de medición automatizado, que pueda operar de forma totalmente desatendida o, como mínimo, con un grado de intervención muy limitado.

Una de las principales dificultades para lograr estas condiciones operativas es conseguir automatizar el proceso de colocación de los sensores de ultrasonidos sobre la superficie de la rueda a inspeccionar.

Con el tren movido por medios externos, se sitúa sobre un lugar fijo predefinido donde se ubican los sensores de medida. Esta solución requiere de un sistema de carros de arrastre, complementado con un sistema de elevación que permita despegar la rueda del carril unos milímetros y girar la rueda mediante un accionamiento externo.

Para el desarrollo del presente proyecto se ha optado por esta solución, ya que permite operar de forma desatendida pues, una vez posicionado el tren en una zona, son los carros de arrastre y su control electrónico el que realiza toda la secuencia de operaciones necesaria.

6.2. DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO

La posibilidad de realizar una diagnosis automática elimina la posibilidad del fallo humano, como puede ser la incorrecta disposición del equipo de ultrasonidos o la posibilidad de que pueda quedarse alguna zona de la rueda sin inspeccionar convenientemente.

Además, la utilización de un equipo automático multicanal permite incrementar el número de palpadores utilizados en la inspección sin penalización en el tiempo empleado para la misma, lo que redunda en una cobertura más completa de todas las zonas a inspeccionar, pudiendo implementarse estrategias específicas para la inspección completa de cada una de las tres zonas del bandaje.

La diagnosis automatizada tiene grandes ventajas asociadas, como son la repetitividad en la medida, la eliminación de la subjetividad de la diagnosis del especialista y la posibilidad de almacenar de manera cifrada (mediante firma digital) los resultados de diagnosis, garantizando la veracidad y autenticidad de los resultados de cada inspección.

6.3. REORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA SU EXPLOTACIÓN REMOTA

Con la información obtenida en tiempo real, el sistema debe generar por sí mismo una base de datos disponible, a través de la red informática de la explotación, para el personal técnico, que no tendrá que desplazarse hasta el equipo para poder ver los resultados del ensayo. Esta posibilidad de acceso remoto a los resultados elimina la necesidad de que haya técnicos cualificados presentes en el momento y lugar en que se realiza el ensayo.

Si bien la calidad de la inspección es clave para garantizar el buen estado del bandaje de la rueda, no es menos importante garantizar una trazabilidad de las inspecciones. La identificación unívoca de qué rueda está siendo inspeccionada se convierte en un aspecto crucial para el adecuado mantenimiento de la rodadura.

Las exigencias de automatización y mínimo grado de servidumbre obligan a la instalación de un sistema de reconocimiento de caracteres por visión artificial (OCR), que en combinación con una estructura adecuada de base de datos permita identificar unívocamente qué rueda está siendo inspeccionada.

A medida que el tren vaya atravesando la zona de captura, el equipo irá recopilando la información relativa a la composición de la unidad y almacenando los resultados de inspección de cada rueda en la base de datos.

6.4. GESTIÓN INTELIGENTE DE LA INFORMACIÓN

Para poder utilizar la información obtenida en tiempo real por el proceso de diagnóstico automatizado y almacenada en una base de datos accesible remotamente maximizando la disponibilidad de la flota y superando los problemas enunciados en el punto 4, el sistema desarrollado debe tener la capacidad de informar cuándo se produzcan incidencias que requieran la intervención de un técnico responsable.

Este aviso se realizará mediante e-mail o SMS, enviados directamente a los teléfonos móviles de los responsables. Las listas de distribución de estos mensajes deben ser configurables en función de la severidad del defecto encontrado, de los turnos de trabajo y de la hora del día en el que ocurra.

Una vez recibido el mensaje de alerta, el técnico responsable puede conectarse mediante una aplicación VPN al servidor donde se almacena la base de datos con los resultados de la inspección desde cualquier parte, pudiendo hacer un diagnóstico exhaustivo, pues en caso de detectarse una alerta el sistema guardará en un archivo la inspección completa registrada.

El responsable puede así tomar la decisión de qué intervención realizar sobre el tren con el máximo de datos disponibles, pues tendrá acceso total a las bases de datos de los históricos de las inspecciones realizadas sobre esa misma rueda o sobre otras. Estas bases de datos están perfectamente integradas con el GMAO utilizado.

Dado que el estado de la rodadura es un aspecto de vital importancia de cara a la seguridad del transporte ferroviario, el sistema cuenta con un mecanismo especial de codificación de archivos (Firma Digital), que permite garantizar la autenticidad de los datos obtenidos por el sistema de inspección. También aporta una garantía absolutamente fiable sobre la integridad de los informes generados automáticamente asegurando que no han sido modificados a posteriori.

Todas estas especificaciones del sistema de gestión de información facilitan enormemente la obtención de efectos de sinergia entre las ventajas de la automatización de procesos y la gran experiencia acumulada por los expertos, sin perder nunca de vista la seguridad que aporta la autenticidad e inviolabilidad de los informes generados.

6.5. CERTIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN

Una vez instalado, el sistema deberá ser certificado en el cumplimiento de la normativa sobre la inspección de ruedas elásticas por ultrasonidos aplicada por METRO de Madrid y demostrar que iguala e incluso supera la fiabilidad de la inspección en relación al método manual establecido de acuerdo a dicha normativa. La normativa internacional de referencia que se sigue (ver [1] y [2]) es para ruedas nuevas y es sobre la que se basa la normativa interna de la organización.

Concretamente, la Norma UIC 810-1 establece, para el ensayo por ultrasonidos, que los ecos obtenidos en un bandaje nuevo deben ser inferiores a los de una pieza patrón que dispone de varios taladros de fondo plano de diámetro 3 mm, distribuidos según se muestra en la Figura 10, de acuerdo a la clase B en que se encuentra ubicado el material rodante.

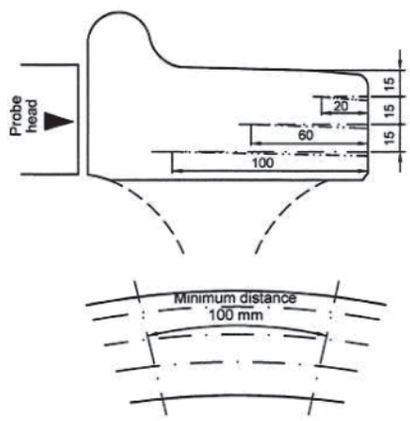


Fig. 10: Sección de la rueda patrón según UIC 810-1

Como se aprecia en la Figura 10, los reflectores de fondo plano preconizados por la normativa para la calibración de los equipos de inspección sólo se ubican en el cuerpo del bandaje, esto es, en la zona en la que es más probable la aparición de defectos de fabricación. Esto es coherente con el hecho de que la normativa esté orientada a la inspección de ruedas nuevas, en las que sólo cabe esperar la presencia de este tipo de defectos.

Sin embargo, el equipo que aquí se describe está concebido para la inspección del bandaje a lo largo de su vida útil, por lo que, en su inspección, no sólo cubre el cuerpo del bandaje, sino también la zona interna del mismo y la banda de rodadura, zonas en las que es más probable la aparición de fisuras por fatiga durante la vida útil de la rueda y, por tanto, de mayor interés desde el punto de vista del mantenimiento.

Por este motivo, la rueda patrón diseñada para la calibración y certificación del equipo de inspección desarrollado, además de los taladros de fondo plano que establece la norma, dispone de entallas de superficie equivalente a la de estos reflectores, distribuidas por la superficie interna del bandaje y en la banda de rodadura.

De este modo, el patrón permite calibrar el equipo para la detección de posibles fisuras que se puedan formar en la banda de rodadura (*spalling* debido a bloqueos de rueda) o en la parte interna del bandaje (por fenómenos de electroerosión en las zonas donde se realiza el contacto eléctrico de tierra).

7. ESTRATEGIA DE INSPECCIÓN

De acuerdo con el planteamiento del apartado 2, se han definido unas estrategias específicas para cada una de las tres zonas del bandaje que se describen a continuación.

7.1. INSPECCIÓN DE LA ZONA INTERNA DEL BANDAJE

Con el fin de maximizar la sensibilidad a pequeñas fisuras que arranquen desde la superficie interior del bandaje, se empleará un conjunto de seis palpadores distribuidos a ambos lados de la rueda y con ángulos de incidencia adaptados al perfil específico del bandaje en esa zona, tal como se muestra en la Figura 11.

En esta figura se muestran, en línea continua, el perfil de rueda nueva (diámetro 860mm) y en línea discontinua, el perfil correspondiente a rueda al límite de desgaste (diámetro 780mm).

El diseño del sistema de inspección deberá considerar este rango de diámetros para posicionar los palpadores adecuadamente al diámetro de la rueda a inspeccionar.

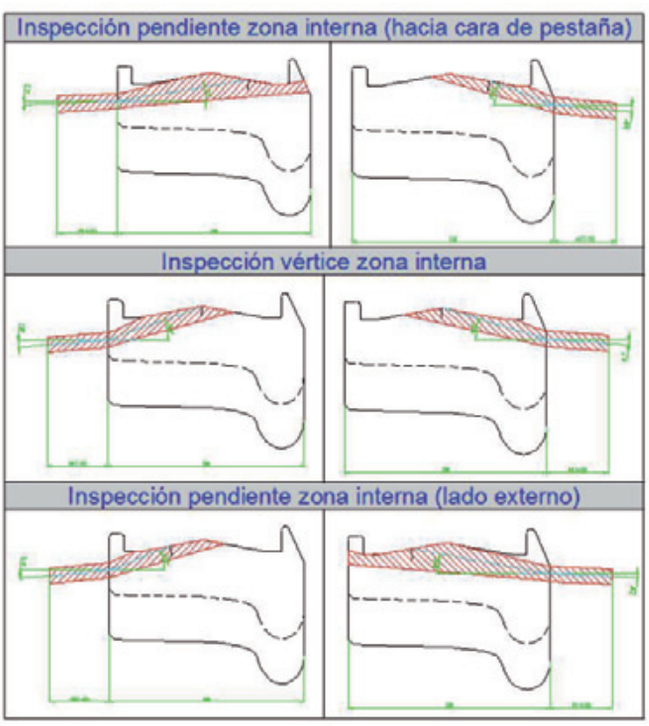


Fig. 11: Inspección Zona Interna

7.2. INSPECCIÓN DEL CUERPO DEL BANDAJE

Aunque la aparición de este tipo de defectos es poco frecuente, se ha previsto un conjunto de nueve palpadores, tal como se muestra en la Figura 12, para la inspección del cuerpo del bandaje, con un grado de solape del 10 %, de forma que se garantice la cobertura completa de esta zona.

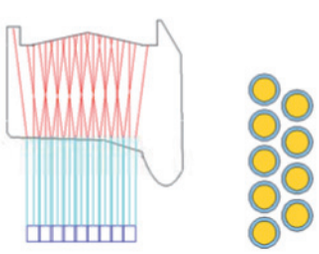


Fig. 12: Inspección Cuerpo

7.3. INSPECCIÓN DE LA BANDA DE RODADURA

Para esta zona, la inspección de fisuras debe orientarse a detectar fisuras no en su fase incipiente, sino cuando ya han alcanzado una cierta profundidad. De otro modo, los arañazos normales en esta zona de la rueda, derivados del contacto entre la zona de rodadura y el raíl podrían dar lugar a un elevado número de falsas alarmas.

Por ello, se utilizan dos palpadores para cubrir esta zona, tal como se muestra en la Figura 13. Uno, mirando desde la zona de pestaña con incidencia normal, cubre la zona de rodadura y el otro, mirando desde el lado opuesto y con incidencia angular, cubre la transición de la zona de rodadura a la de pestaña.

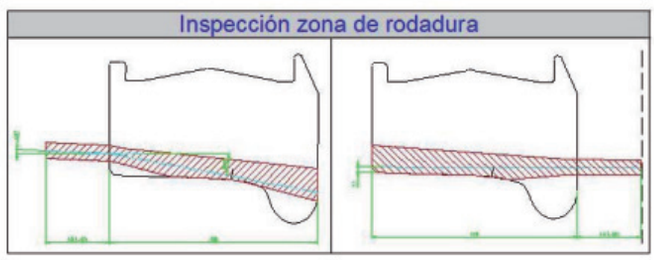


Fig.13: Inspección Zona Rodadura

8. DISEÑO DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN

Para que el sistema de Inspección Integral que aquí se describe pueda cumplir satisfactoriamente con todos los objetivos descritos en los puntos precedentes, implementando la estrategia de inspección descrita en el punto anterior de forma totalmente automática, es necesario integrar el funcionamiento de varios subsistemas distintos, que se describen someramente a continuación. La Figura 14 muestra un diagrama de bloques funcionales del sistema.

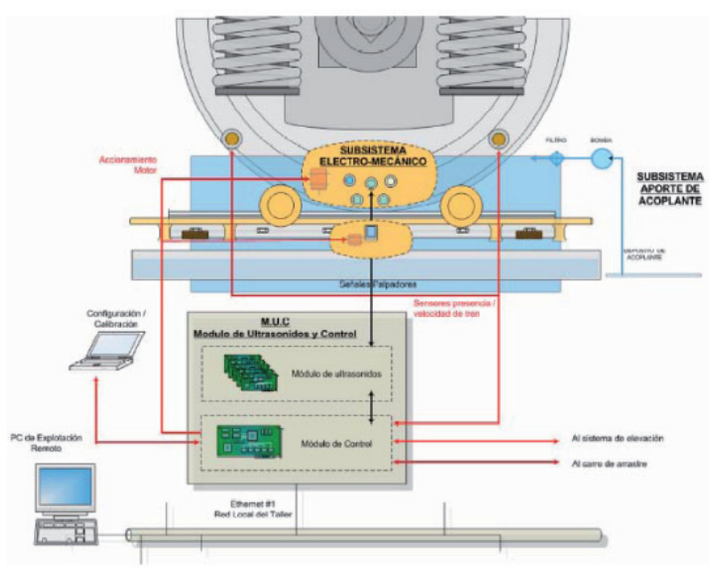


Fig. 14: Bloques funcionales del sistema de inspección. (Por simplicidad del esquema no se muestran en la imagen los subsistemas Elevador, Tractor y Óptico)

8.1. SUBSISTEMA DE ULTRASONIDOS

El subsistema de ultrasonidos está integrado por los tres conjuntos de palpadores descritos en el apartado 7. Estos palpadores irán montados en zapatas portapalpadores, cuya posición se controla automáticamente para implementar la estrategia de inspección planificada.

Como ya se mencionó en el apartado 7, la geometría de la rueda cambia en función del desgaste de la misma, con una variación del diámetro desde 860mm (rueda nueva) hasta un mínimo de 780mm (rueda al límite del desgaste).

Para que el sistema diseñado pueda adaptarse automáticamente a estas variaciones en el diámetro de la rueda, se han agrupado los palpadores en dos módulos, *superior* e *inferior,* cuya posición está referenciada al centro de la rueda y al extremo inferior de la banda de rodadura respectivamente.

Así, los palpadores que inspeccionan la zona interior del bandaje, van montados en el módulo superior, lo que asegura que siempre tengan la misma posición relativa con respecto a la superficie de interfaz entre el bandaje y la banda de goma que se sitúa entre éste y el bloque de la rueda.

El resto de palpadores, que inspeccionan el cuerpo del bandaje y la banda de rodadura, irán montados en el módulo inferior, de forma que su posición se mantenga fija con respecto a la banda de rodadura independientemente del desgaste de la rueda.

El movimiento de las zapatas portapalpadores está motorizado y se controla, de forma totalmente automática, desde el módulo de control en función de la información aportada por los sensores inductivos.

8.2. SUBSISTEMA DE APORTE DE ACOPLANTE

Para garantizar la correcta transmisión del sonido desde los palpadores al interior del bandaje durante la inspección, se utiliza el método de inmersión parcial en un medio acoplante (agua decantada y filtrada).

Para implementar este acoplamiento por inmersión parcial, se sumergen las zapatas portapalpadores en sendas cubetas (una para cada rueda), que se mantiene llena de acoplante. El sistema incluye una bomba de aporte en cada cubeta y sendos detectores de nivel, de modo que el subsistema de control puede mantener el nivel de acoplante adecuado en cada cubeta utilizando la información aportada por los detectores de nivel para activar o no las bombas de aporte de acoplante.

Los conjuntos de palpadores deben desplazarse verticalmente en función del diámetro de la rueda y horizontalmente para situarse con precisión en la zona de inspección. Estos ajustes de precisión se consiguen mediante sensores de posicionamiento inductivos.

En la Figura 15 se muestra el prototipo de una de las cubetas portapalpadores. La instalación constará de dos cubetas portapalpadores, una por cada rueda del eje a medir. Las cubetas portapalpadores alojan el subsistema de ultrasonidos y a su vez van montadas en el Elevador.

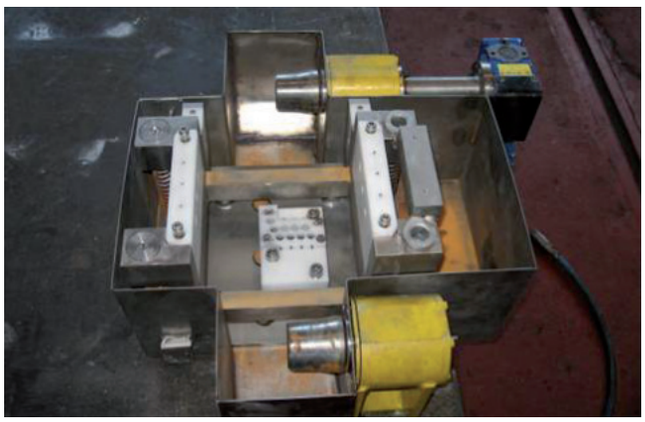


Fig.15: Cubeta portapalpadores

8.3. SUBSISTEMA DE ELEVACIÓN Y GIRO DE RUEDA

Este subsistema realiza varias funciones necesarias para la realización automática de las inspecciones:

Eleva el eje, separando ligeramente las ruedas del raíl de forma que se las pueda hacer girar libremente.

A la par que eleva el eje, sube las cubetas portapalpadores, de forma que las ruedas a inspeccionar queden parcialmente sumergidas en el acoplante.

Hace girar las ruedas, de forma que la totalidad del bandaje vaya pasando por delante de los palpadores para realizar la inspección completa de la rueda.

Para realizar estas funciones, el elevador (ver Figura 16) cuenta con dos accionamientos principales (elevador mediante un husillo y motor de giro de ruedas) y los sensores necesarios (detectores de presencia de rueda sobre el elevador y *encoders* angulares para controlar la posición de las ruedas a inspeccionar).

Fig.16: Elevador

8.4. SUBSISTEMA TRACTOR

Para que el sistema de inspección sea capaz de funcionar de manera automática, sin intervención de un conductor que

vaya posicionando cada eje de la unidad sobre el subsistema elevador, se han incluido dos carros de arrastre.

En la Figura 17 se muestra uno de estos carros de arrastre durante su instalación en el foso de vía 17 de los talleres de mantenimiento en **Hortaleza**.

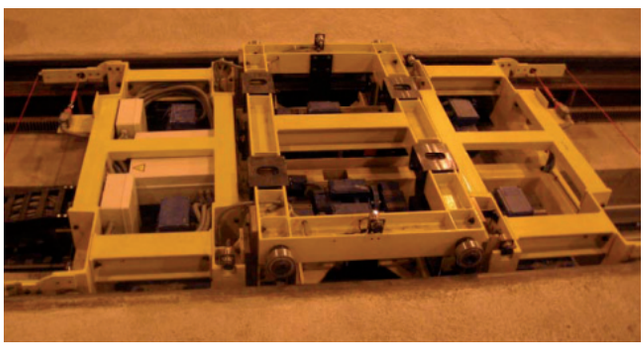


Fig. 17: Carros Tractores

Ambos carros estarán conectados al subsistema de control, que se encarga de controlar la posición de la unidad y dar las órdenes de avance y parada pertinentes a los dos carros de arrastre para ir posicionando sucesivamente cada eje sobre el elevador.

8.5. SUBSISTEMA ÓPTICO

Éste es un sistema de visión artificial cuya misión es identificar las unidades que van a ser inspeccionadas por el equipo de ultrasonidos.

Mediante un sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) que trabaja en tiempo real, se informa al puesto de control acerca de la unidad que va a ser procesada, de forma que se gestione de forma automática el almacenamiento de los datos de inspección asociados al fichero de resultados de dicha unidad en la base de datos de unidades inspeccionadas.

El sistema OCR permite la identificación del tren al paso (siempre que la velocidad sea inferior a 20 km/h) y consta de una cámara situada a una cota elevada justo a la altura de las matrículas identificativas de los coches, que se activa cuando las ruedas del primer eje del tren son detectadas mediante unos sensores inductivos colocados unos pocos metros delante de la cámara.

8.6. SUBSISTEMA DE PROCESO Y CONTROL

El subsistema de control está integrado por el equipo de generación, captura y proceso de ultrasonidos, y el PC de operación.

El equipo de generación, captura y proceso de ultrasonidos se basa en el sistema ULTRASEN®, aportado por la empresa colaboradora externa INTERLAB, que con su tecnología modular de proceso de ultrasonidos puede configurarse para el número de canales necesarios sin merma en la velocidad o prestaciones del sistema, manteniendo su capacidad de operar en tiempo real.

Además, el equipo de ultrasonidos, mantiene el sincronismo entre el disparo de los pulsos de ultrasonidos en cada palpador y la posición angular de la rueda durante la inspección de forma que la adquisición de datos se produzca a intervalos regulares, garantizando una inspección completa y homogénea del bandaje. Para ello, los subsistemas de ultrasonidos, acoplante, elevador y tractor se controlan directamente a través del módulo de ultrasonidos.

Por otro lado, el PC de Operación, basado en un ordenador industrial, se comunicará con el equipo de ultrasonidos para obtener los datos de la inspección, el estado de los diferentes subsistemas de la máquina, etc., junto con el envío de órdenes (inicio de inspección, activación selectiva de actuadores en modo manual, etc.).

El PC de Operación se encarga de ir almacenando los resultados de las inspecciones en la base de datos, utilizando la información aportada por el subsistema óptico para identificar cada unidad inspeccionada.

Por otra parte, el mencionado PC de operación se conecta a la red local del taller, de modo

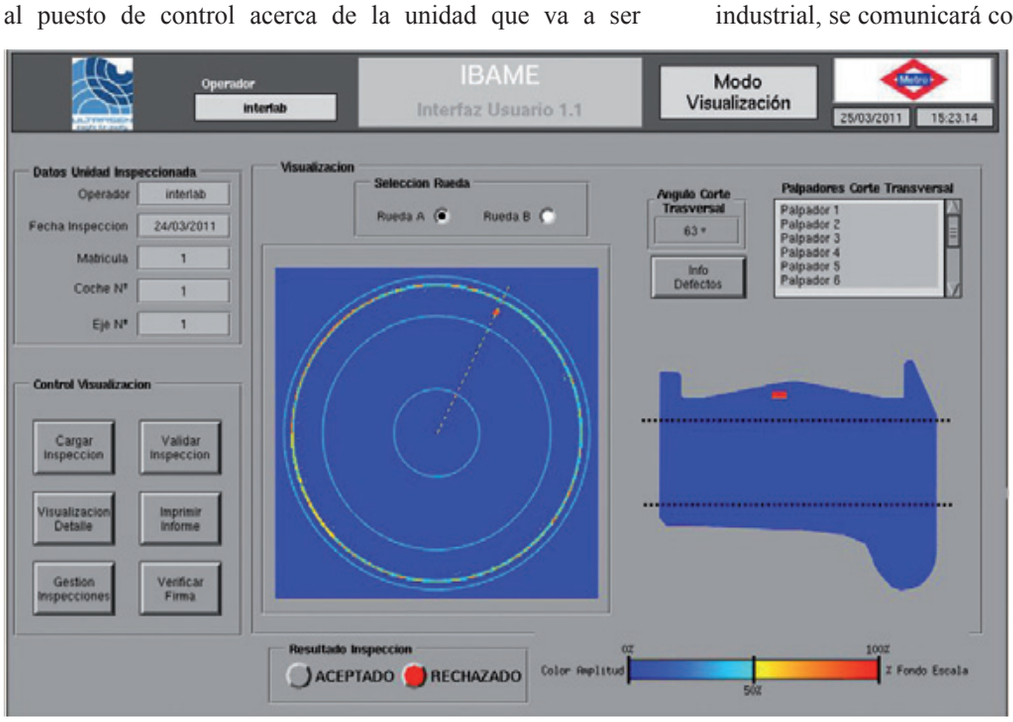


Fig.18: Pantalla con el resultado de una inspección

que se puedan explotar los resultados de inspección de forma remota, operando el sistema de forma desatendida y gestionándose de forma automática los avisos a los técnicos especialistas en caso de que se produzca alguna incidencia.

También se podrá conectar al equipo un PC portátil para así realizar tareas propias del trabajo "a pie de vía" tales como el mantenimiento o configuración del equipo.

Aunque el sistema decide con los algoritmos internos si cada una de las ruedas cumple con los requerimientos de las normas establecidas, existen una serie de herramientas para presentar los resultados y facilitar su análisis y comparar con inspecciones previas de esa misma rueda. La figura 18 muestra un ejemplo de una de esas pantallas donde se presenta un C-*Scan* de la rueda con un B-*Scan* de una sección marcada por el cursor.

9. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema integral para la inspección automática de ruedas elásticas que consigue una serie de ventajas sobre los sistemas existentes que se resumen en los siguientes puntos:

Permite la inspección sin necesidad de personal cualificado para la realización de la misma.

Efectúa el diagnóstico del estado del bandaje de las ruedas en tiempo real.

Genera una base de datos con los resultados de las inspecciones que puede ser consultada a distancia a través de la red informática de la explotación.

- Dispone de una estrategia de inspección específica orientada hacia la evaluación completa de todas las zonas críticas del bandaje de las ruedas, diferenciando zonas según el tipo y el origen de los defectos encontrados.
- Aumenta la fiabilidad del diagnóstico al realizar un análisis automático, eliminando de esta forma la posibilidad del fallo humano, como puede ser la incorrecta disposición del equipo de ultrasonidos o la posibilidad de que pueda quedarse alguna zona de la rueda sin inspeccionar convenientemente.
- Proporciona diagnosis automática en tiempo real del estado de la rodadura, con la información en tiempo real el sistema generará por sí mismo una base de datos a disposición del personal técnico, que no tendrá que desplazarse para poder ver los resultados del ensayo.
- Automatiza el proceso de inspección, al situar el tren a inspeccionar en un punto determinado, el sistema es capaz de operar de forma totalmente desatendida mediante la activación de un pulsador.
- Reduce el tiempo de indisponibilidad, el nuevo sistema remolca el tren automáticamente mediante dos carros de arrastre que se detienen automáticamente al paso de cada eje por la instalación de inspección para, una vez realizada la medida activar de nuevo los carros de arrastre. De esta forma el tiempo de indisponibilidad de la unidad se reducirá drásticamente hasta el orden de unos minutos.
- Realiza un mantenimiento predictivo, ante defectos incipientes en una rueda, se pueden establecer estrategias de inspección para observar la progresión de la posible fisura en el tiempo y establecer el plan de cambio de ejes en paralizaciones programadas del coche afectado, optimizando el mantenimiento.

10. BIBLIOGRAFÍA

- UNE-EN 13262. Aplicaciones ferroviarias, ejes montados, bogies, ruedas, requisitos de producto.
- UIC 810-1. Especificaciones Técnicas para el suministro de bandajes para material rodante motor y remolcado.
- González-Fernandez FJ. *Ingeniería Ferroviaria*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2ª edición 2010. 674 p. ISBN: 978-84-362-6074-8
- González-Fernández FJ, Melis-Maynar M. *Ferrocarriles Metropolitanos: tranvías, metros ligeros y metros convencionales* 3ª edición 2009. 650 p. ISBN 84-380-0287-0
- González-Fernández FJ. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial 3ª edición 2009. 597 pag. ISBN 978-84-96743-92-2
- González-Fernández FJ. *Reducción de costes y mejora de resultados en mantenimiento* FC Editorial 2010. 331 pág. ISBN 978-84-92735-34-1
- UNE-EN 473. Ensayos no destructivos, Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos.
- ISO 5948. Railway rolling stock material-Ultrasonic acceptance testing.
- UNE-EN 13715 Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Perfil de rodadura.
- Ferrer-Jiménez C, Amigó-Borras V. *Tecnología de Materiales*. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial UPV. 560 p. ISBN: 84-9705-363-X.
- Molina-Sánchez B. "*Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias*". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- ISO 1005. Railway rolling stock material. Part1: Rouge-rolled tyres for tractive and training stock. Technical delivery conditions
- UNE-EN 12.668-1. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 1: Aparatos.
- UNE-EN 12.668-2. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 2: Palpadores.
- UNE-EN 12.668-3. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 3: Equipo completo.