

COMPOSICIÓN DE IMÁGENES DE ULTRASONIDOS EN LA INSPECCIÓN DE RUEDAS DE TRENES EN SERVICIO.

A. Ibáñez Rodríguez¹, M. Parrilla Romero¹, O. Martinez Graullera¹

¹ ITEFI-CSIC. C/ Serrano, 144. 28006 - Madrid

alberto.ibanez@csic.es

Resumen:

La inspección periódica de las ruedas de los trenes en servicio es fundamental para la seguridad del transporte ferroviario. Los procedimientos basados en los ultrasonidos son los más utilizados actualmente para determinar la presencia de defectos internos en el velo y en la llanta. Aunque la mayoría de las inspecciones siguen realizándose de forma manual con palpadores monoelemento, en un futuro cercano se impondrán las inspecciones realizadas mediante sistemas con transductores phased array instalados en puestos de medida automatizados. Esto permitirá reducir los tiempos de parada dedicados a la inspección y, simultáneamente, mejorará la repetitividad y uniformidad de los procesos de captura de datos y garantizará su trazabilidad. La inspección completa de una rueda con sistemas phased array de ultrasonidos requiere obtener múltiples imágenes desde diferentes puntos de vista para que, entre todas, aseguren que se explora la totalidad de la rueda. El análisis e interpretación de todas esas imágenes es una tarea larga y compleja, por lo que también es esperable que se utilicen sistemas de ayuda para el análisis de los registros de la inspección que faciliten la detección, posicionamiento y calificación de los defectos.

En este trabajo demostramos cómo se pueden combinar múltiples imágenes phased array del interior del velo para obtener una representación realista de su estructura interna. La imagen resultante facilita detectar y evaluar defectos que puedan estar presentes en el interior del velo. El método que proponemos utiliza los elementos constructivos de la rueda para dirigir el proceso de composición de las diferentes imágenes. De esta forma se compensan las distorsiones producidas por la incertidumbre en la posición relativa de rueda y palpador, y por los errores en las velocidades del sonido, tanto en la rueda como en la columna de agua que sirve como medio acoplante.

Abstract:

Periodic inspection of the internal condition of the in service railway wheels is essential for the safety of rail transport. Currently, ultrasound-based procedures are the most used to determine the presence of internal flaws in the web and wheel rim. Although most of the inspections continue to be carried out manually with single-element probes, in the near future they will be carried out by means of systems with phased array probes installed in automated measuring stations. That will improve the repeatability and uniformity of the data capture processes, guaranteeing the traceability and reducing inspection times. It is also expected that inspection assistance systems will be used to facilitate the detection, positioning and qualification of flaws in the recorded data sets.

The complete inspection of a wheel with phased array of ultrasound systems requires obtaining multiple images from different points of view so that, among all, ensure that the entire wheel is scanned. Analyzing and interpreting all these images is a long and complex

task. In this work we demonstrate how multiple phased array images from the web can be combined to obtain a realistic representation of its internal structure. The resulting image facilitates the detection and evaluation of flaws that may be present inside the web. The method we propose uses the constructive elements of the wheel to drive the image composition process. This compensates for the distortions caused by the uncertainty in the relative position of wheel and probe, and by the errors in the sound velocities, both in the wheel and in the water column that serves as a coupling.

Introducción

Para realizar la inspección por ultrasonidos de elementos grandes como, por ejemplo las ruedas de los trenes, se necesita adquirir una gran cantidad de señales desde múltiples puntos de vista. Con ello se pretende conseguir que todas las regiones de interés de la pieza sean revisadas con la redundancia suficiente para que el resultado pueda ser considerado confiable. Tan importante como la adquisición de las señales ultrasónicas es su interpretación, que consiste en asociar las indicaciones de ecos con los elementos estructurales de la pieza que son observables desde cada punto de adquisición, o con la existencia de elementos ajenos a su diseño. A partir de esta correlación se tiene que decidir si el elemento inspeccionado es apto para cumplir, o para continuar cumpliendo, con la función para la que ha sido construido. Realizar manualmente estas tareas es un trabajo lento que exige al inspector mantener un nivel de atención muy alto, lo que aumenta la probabilidad que se cometan errores por fatiga. Además, lo habitual en las inspecciones realizadas de forma manual es que no queden registros de las mediciones efectuadas con los que revisar el procedimiento aplicado y poder trazar la evolución del componente a lo largo de su vida útil.

El empleo de sistemas basados en transductores phased array permite recoger y presentar, en cada captura, información de una región de la pieza relativamente extensa, lo que ayuda a acortar el tiempo necesario para explorar la pieza y facilita la interpretación de los datos obtenidos. Si, además, el equipo de ultrasonidos se incorpora a un sistema de escaneo automatizado se consigue que el proceso de exploración se realice de una forma sistemática y repetitiva, y que los datos adquiridos queden registrados. Con ello se asegura la trazabilidad de la inspección, se independiza el proceso de captura del de evaluación, y se abre la puerta a la utilización de técnicas de procesamiento de señales y de algoritmos que ayuden a la interpretación de los datos y a evaluar el estado de la pieza inspeccionada.

Circunscribiéndonos al sector del ferrocarril, para la inspección por ultrasonidos de ruedas, tanto nuevas como en servicio, se han propuesto y desarrollado unos cuantos sistemas automáticos (1),(2),(3).

Hace algunos años, nuestro grupo participó activamente en varios proyectos de investigación para el desarrollo de sistemas para la inspección automatizada de ruedas de trenes en servicio (4). Nuestra participación se centró, principalmente, en proponer y validar procedimientos de inspección adaptados a sistemas de escaneo automatizados, y en idear e implementar algoritmos para la detección y valoración de defectos en las ruedas a partir de los datos proporcionados por el escáner. Un sistema de evaluación automática, o de ayuda a la evaluación, además de identificar y valorar posibles defectos tiene que generar y presentar información que justifique y explique las razones que apoyan el diagnóstico que propone. Con este trabajo retomamos esa línea y presentamos algunas ideas y procedimientos para integrar la información relevante extraída del escaneado y mostrarla en una representación realista de la parte de la rueda inspeccionada, de manera

que los resultados sobre la situación y extensión de los posibles defectos detectados sean asimilados de forma natural por cualquier operador.

Materiales y métodos.

Aunque las ideas subyacentes pueden ser aplicadas a inspecciones de otros componentes, todos los métodos y procedimientos que presentamos en este trabajo se han aplicado a escaneos diseñados para inspeccionar la región del velo sobre la que se practican los taladros para la fijación de los discos de freno en ruedas enterizas, de velo recto y montadas en bogies tractores. Esta región de la rueda es importante, ya que durante el frenado estos taladros están sometidos a grandes tensiones que pueden dar lugar a la aparición de grietas de fatiga que, si se dejaran progresar, podrían causar la rotura de la rueda.

Las ruedas se han escaneado a través de la banda de rodadura con acoplamiento acústico mediante inmersión local. Se ha utilizado un array lineal IMASONIC de 32 elementos rectangulares separados 0,86mm y con una frecuencia nominal de 3.5MHz. El array se controla con un equipo SITAU 32x4 de la compañía DASEL SISTEMAS. Las inspecciones se realizarán por inmersión local de la banda de rodadura con la dirección activa del array tangente a la rueda, como puede verse en la Figura 1.



Figura 1. Imagen del banco de medida y detalle de la colocación del array.

Las medidas que presentamos se han realizado sobre dos ruedas usadas que designamos R1 y R2. El diámetro nominal de estas ruedas es 890mm, pero durante su vida de servicio han sido reperfiladas varias veces. Su diámetro aproximado actual está en torno a los 815mm y 840mm respectivamente. El diámetro del eje es 198mm y en el velo cuentan con 6 taladros de 32mm de diámetro cuyos centros están sobre una circunferencia de 208mm de diámetro y separados 60° entre sí. Nos referiremos a los taladros con las denominaciones T1 a T6 recorriéndolos en sentido horario. En ambas ruedas se han realizado defectos patrón que sirven de control de la inspección. La rueda R1 tiene, en T1, una grieta de 3 mm a 180° (radial hacia el interior de la rueda) y dos grietas de 3mm a 90° y -90° (tangentes a la llanta) en T2. En la cara interior del velo, entre T3 y T4 a lo largo del segmento que definen sus centros, hay 5 taladros de 3mm de diámetro separados 30mm entre sí y con profundidades desde 2mm hasta 10mm. Entre T4 y T5 hay otra serie idéntica de taladros pero realizados sobre la cara externa del velo. La rueda R2 tiene grietas artificiales cuyos tamaños y orientaciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Defectos en la rueda patrón R2

Taladro	Longitud (mm)	Orientación	Taladro	Longitud (mm)	Orientación
T1	Sin defecto		T4	6	180°
T2	2	90°	T5	10	45°
T3	5	0°	T6	10	-135°

El procedimiento de inspección consiste en hacer girar la rueda e ir adquiriendo imágenes sectoriales de la zona de interés del velo enfrentada al array en ese momento. La separación entre imágenes se controla por odometría con una ruedecilla que gira sobre la banda de rodadura. En las ruedas en servicio el radio nominal de la rueda del tren no coincide necesariamente con el radio real, por lo que esta medida está sujeta a una cierta incertidumbre. En los ejemplos que presentamos las imágenes que forman cada secuencia están separadas, nominalmente, por 1° o por 1,5°.

La Figura 2(a) muestra una representación esquemática de la rueda y la forma de insonificar y adquirir una imagen sectorial. En cada línea que forma el sector el pulso de ultrasonidos viaja inicialmente por el agua hasta que entra en la rueda a través de la banda de rodadura. Si la colocación y orientación de array es la adecuada, el pulso se propaga por el velo y cuando se encuentra con el eje de la rueda, con alguno de los taladros presentes en el velo, o con cualquier otra discontinuidad del material, se genera un eco que, si vuelve hasta el array, aparece en el A-Scan correspondiente.

En el caso del ejemplo representado en la Figura 2(a), se han destacado en color verde las líneas que barren uno de los taladros en el que existe una grieta. En el A-Scan de estas líneas de barrido aparecen dos ecos: el del taladro y el de la grieta. La representación de los A-Scan de todas las líneas del barrido sectorial genera la imagen mostrada en la Figura 2(b). En general, estas imágenes contendrán el eco del eje de la rueda y el de dos o tres taladros (en la figura dos taladros, uno de ellos con una grieta).

Las grietas pueden aparecer y propagarse en cualquier dirección desde la superficie de los taladros y, dependiendo del punto desde el que se realiza la inspección, pueden quedar ocultas por ellos. Con la estrategia de escaneo aplicada, cada taladro es observado desde muchos puntos de vista (en torno a 120° de giro de la rueda). En cada imagen de la secuencia se tiene una visión ligeramente diferente de los ecos del taladro y de la grieta si la hubiera, que sería observada desde varios puntos de vista.

Además de aumentar la probabilidad de detección, la observación desde diferentes

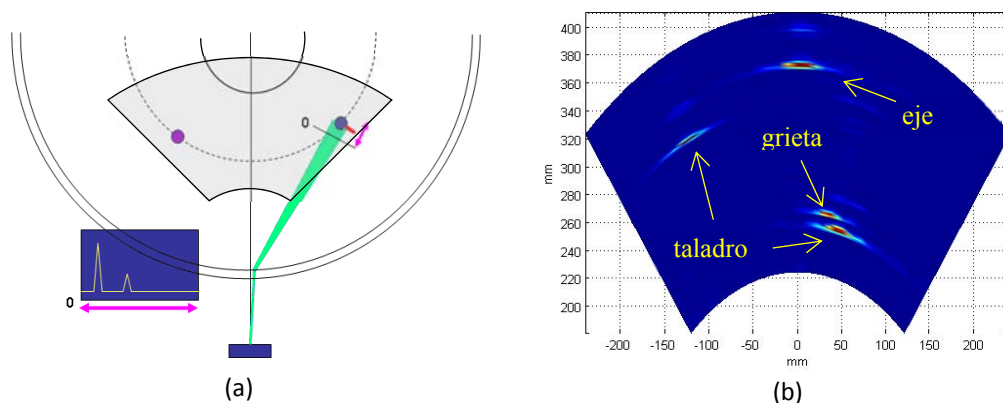


Figura 2. (a): representación esquemática de las líneas de un sector que devuelven ecos de uno de los taladros. (b): imagen resultante de un barrido sectorial.

posiciones hace que se pueda inferir la posición sobre la circunferencia del taladro de los defectos localizados asociados con él y estimar su tamaño. Así, en una grieta a 0° (radial hacia el exterior de la rueda) la indicación desaparece cuando el taladro está alineado con el eje del array y aparece en el resto de posiciones. En, contraste, para una grieta a 90° (tangente a la rueda) la indicación es máxima en esta posición, ya que es en la que la grieta ofrece mayor superficie de reflexión.

La Figura 3 contiene imágenes sintéticas formadas condensando toda la información sobre tres taladros de R1 que se ha extraído de todos los barridos sectoriales realizados en un giro completo de la rueda. En estas imágenes, cada columna corresponde a un punto de observación del taladro analizado y se obtiene proyectando, sobre una de ellas, todas las líneas del sector que cubren un entorno del taladro observado (líneas verdes de la Figura 2(a)). La columna más a la izquierda corresponde a la posición de la rueda en la que el taladro analizado aparece por primera vez en el barrido, la columna del centro de la imagen corresponde a la observación en la que el taladro pasa sobre el eje del array y la columna más a la derecha corresponde a la última detección del taladro antes de salir campo de visión del array. Todas las proyecciones se alinean de forma que los ecos que proceden de la circunferencia del taladro aparezcan como una línea horizontal. La imagen de la izquierda de la Figura 3 corresponde a T6 que es un taladro sin defectos por lo que solo aparece la línea de referencia formada por los ecos generados a lo largo de su circunferencia. La imagen del centro es del taladro T3 que tiene dos grietas de 3mm a 90° y -90° que, en la imagen, se revelan como dos trayectorias que convergen en el centro que, en este caso, es desde donde los ecos de las grietas aparecen más alejados del eco de la superficie. La imagen de la derecha corresponde a T1 con la grieta de 3mm a 180° .

La posición de las indicaciones de grieta en las imágenes y las trayectorias que describen permiten situar y caracterizar de forma fiable los defectos encontrados, sin embargo, se necesita entrenamiento del operador o un procesamiento adicional sobre las imágenes para extraer esta información. En la siguiente sección presentamos una forma complementaria de extraer la información de cada imagen sectorial y organizarla para obtener una representación fácilmente comprensible de la región del velo inspeccionada.

Método de composición de imágenes.

En el sistema de escaneo automático de ruedas que hemos descrito hay tres sistemas de referencia significativos. El primero está ligado al transductor de ultrasonidos con el que se realizan los barridos sectoriales. El origen de este sistema de coordenadas está situado en el

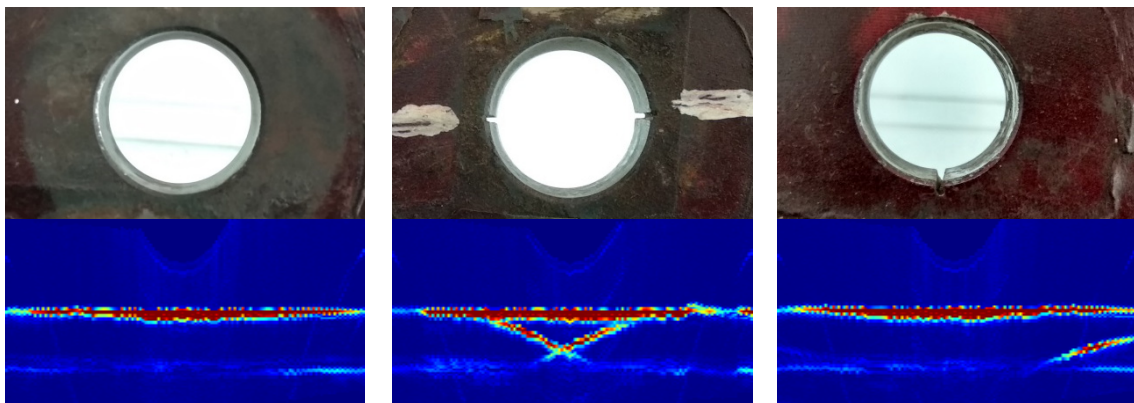


Figura 3. Imágenes condensadas de taladros. Izda: taladro sin defectos. Centro: taladro con dos grietas a $\pm 90^\circ$. Dcha: taladro con grieta a 180°

centro del círculo que define cada sector. Su posición teórica queda establecida cuando se calcula el conjunto de leyes focales que se utilizarán para realizar cada barrido sectorial. En nuestro caso se ha calculado, empleando la fórmula del dioptrio, como el punto en el que se formaría la imagen del punto central del array si se observara desde el interior de la rueda. Su posición se calcula a partir de la distancia del array a la superficie de la banda de rodadura, de la velocidad del sonido en el agua, de la velocidad del sonido en el interior de la rueda y de su radio en el punto de la banda de rodadura por el que los ultrasonidos entran en ella. Esta aproximación, que simplifica notablemente el cálculo las leyes focales, va a producir distorsiones en las imágenes que se obtienen, que se arrastran y multiplican a lo largo del proceso de composición que vamos a aplicar.

El segundo sistema de referencia que consideramos es el ligado al sistema de inspección. Su centro está en el centro de la rueda. Definimos el eje Y sobre la línea que une el centro de la rueda con el centro del array, que estará en el lado positivo de este eje. El cambio de coordenadas del sistema de referencia ligado al array al sistema de inspección supone una traslación y una rotación de 90° .

Por último el sistema de referencia ligado a la rueda tiene su origen, como el sistema de inspección en el centro de la rueda y gira solidariamente con ella. Establecemos, de forma arbitraria, que el eje Y pasa por el centro del primer taladro del velo que, durante el escaneo de la rueda, atraviesa el lado positivo del eje Y del sistema de inspección. Las coordenadas en el sistema de la rueda se relacionan con las del sistema de inspección, por una rotación pura del ángulo girado por la rueda desde el inicio de la inspección.

Segmentación y localización de las indicaciones de eco.

El primer paso del procedimiento de composición que proponemos es la segmentación de cada una de las imágenes sectoriales para separar, del fondo de la imagen, las regiones que corresponden a indicaciones de ecos. Para ello se aplica un suavizado de la imagen seguido de un filtrado de corte por umbral. De cada una de las regiones identificadas se calcula su centro de masas, utilizando la amplitud del eco recibido como factor de ponderación. El resultado de este proceso, representado en la Figura 4, es una lista de coordenadas de ecos en el sistema de referencia local ligado al transductor.

Calibración de parámetros de inspección.

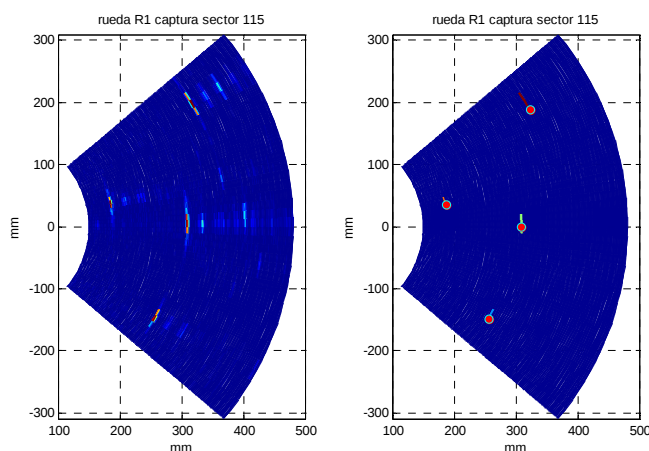


Figura 4. Resultado del proceso de segmentación de una imagen sectorial

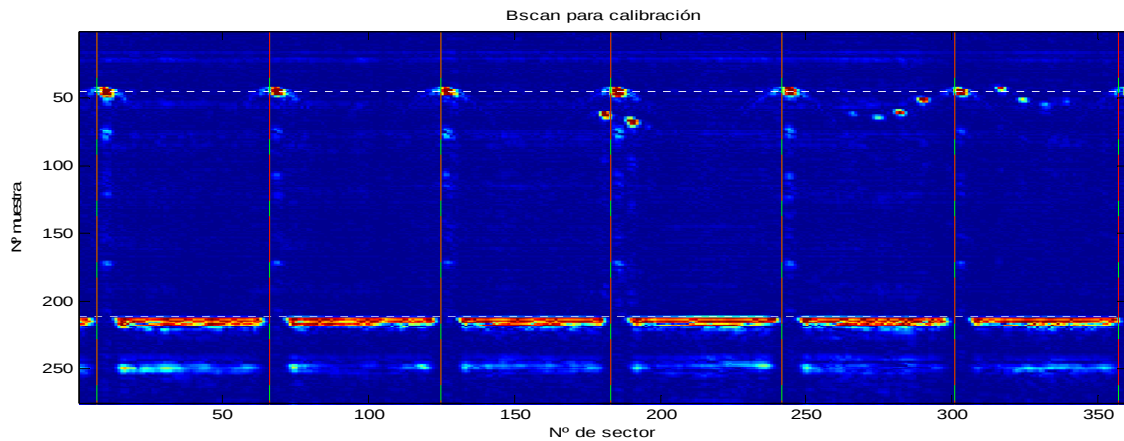


Figura 5. Bscan generado para calibrar parámetros de la inspección. Las líneas verticales rojas marcan los sectores en los que un taladro se alinea con el eje de la rueda en el sistema de referencia del array. Las líneas blancas de puntos corresponden a las distancias en las que se localiza el eco del eje (línea inferior) y los ecos de los taladros cuando se alinean con el eje (línea superior).

Para pasar del sistema de referencia del transductor al sistema de coordenadas de la rueda, es necesario conocer con precisión el ángulo girado por la rueda entre la captura de dos imágenes sectoriales cualesquiera. Como ya indicamos, este ángulo se obtiene a partir de las lecturas de un codificador de posición ligado a una ruedecilla odométrica que gira sobre la banda de rodadura durante la inspección. Como no se conoce con suficiente exactitud el radio de la rueda en el punto de entrada de los ultrasonidos, se realiza una calibración específica para cada rueda. El procedimiento consiste en identificar la línea del barrido en la que aparece el eco del eje de la rueda en las imágenes sectoriales y buscar los sectores en los que el eco de un taladro atraviesa esta línea y eclipsa al eco del eje. La separación angular entre taladros consecutivos es un parámetro constructivo de la rueda que no cambia con el uso y sirve de referencia para realizar la calibración. La Figura 5, que ilustra el procedimiento descrito, es un Bscan formado a partir de los Ascan de la línea de referencia extraída de cada sector, el eje X corresponde al número de la imagen sectorial de la que procede cada Ascan y el eje Y al número de muestra en ese Ascan. Los sectores identificados como de paso del taladro por delante del eje se han marcado con líneas rojas verticales.

Una vez conocidos los ángulos de giro de la rueda en cada inspección es posible pasar las coordenadas de los ecos al sistema de referencia de la rueda. En la imagen izquierda de la Figura 6 se han representado, en el sistema de referencia de la rueda, los ecos obtenidos en el proceso de segmentación (puntos negros). Como referencia se han dibujado la circunferencia del eje (línea continua roja) y las de los taladros (en color azul). Como puede verse en la figura, hay una gran distorsión en la imagen obtenida, la causa es el error en la posición asignada al origen del sistema de referencia del array que se ha calculado utilizando el diámetro nominal de la rueda.

En el Bscan de la Figura 5 también se pueden identificar los instantes de llegada de los ecos procedentes del eje (línea blanca de puntos inferior) y de los taladros cuando se alinean con él (línea blanca de puntos superior). La diferencia de esos tiempos está determinada, además de por la velocidad del sonido en la rueda, por los diámetros del eje, de los taladros y de la circunferencia en que se sitúan sus centros. Dado que estos son parámetros constructivos de la rueda, que se conocen con precisión, pueden utilizarse para mejorar la estimación del valor de la velocidad del sonido en la rueda. Con el nuevo valor de la velocidad y con el tiempo de vuelo hasta el eje, se corrige la posición del origen del sistema de coordenadas ligado al array y se hace una estimación mejor del radio de la rueda. La imagen de la derecha en la Figura 6 es la reconstrucción tras aplicar estas correcciones. La nueva imagen se ajusta a la geometría de la rueda mucho mejor que la anterior pero es aún demasiado imprecisa para tener una representación inteligible del estado de los taladros, como puede verse en la ampliación de la imagen del taladro T1.

Identificación de los ecos producidos por los taladros.

Para mejorar aún más esta imagen procedemos a calcular, en el sistema de coordenadas de inspección, la trayectoria esperada del eco de cada taladro en todos los ángulos de giro de la rueda en los que se ha capturado una imagen sectorial. En la **Figura 7(a)**, se ha representado esta trayectoria en color amarillo. A continuación se seleccionan, en cada sector, todos los ecos cercanos a un taladro y se etiquetan los ecos como ecos de taladro (marcados como puntos rojos en la **Figura 7(a)**) o como ecos próximos al taladro (puntos verdes

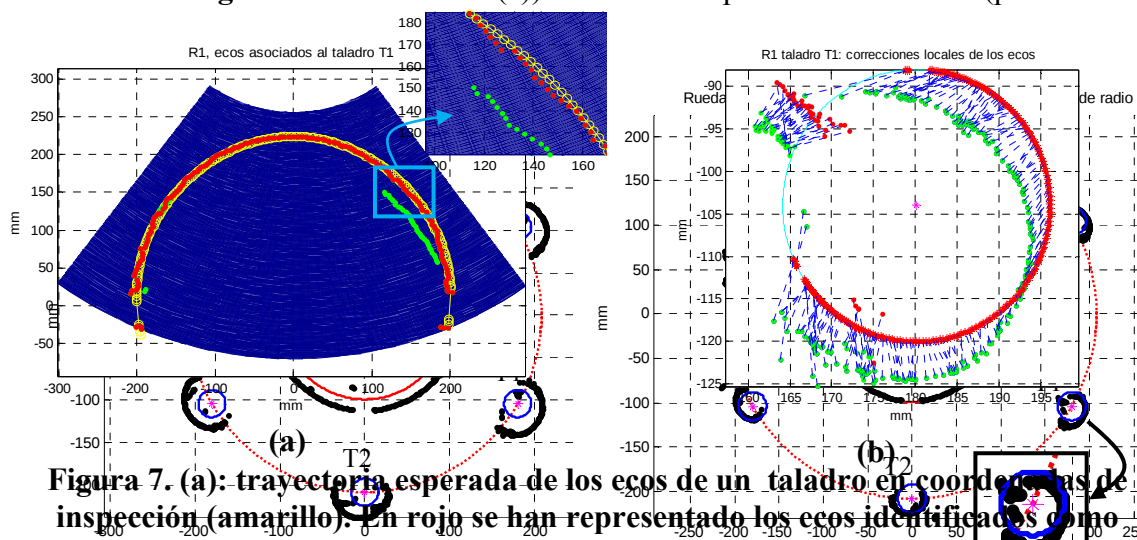


Figura 7. (a): trayectoria esperada de los ecos de un taladro en coordenadas de inspección (amarillo). En rojo se han representado los ecos identificados como producidos por T1, en verde los ecos próximos a T1. (b): representación en coordenadas de rueda de los ecos asociados a T1. Los puntos verdes son los ecos del eje de la rueda se ha dibujado con un trazo rojo continuo y los contornos de los taladros en azul. En la figura izquierda se han utilizado los datos con los que se generaron los barridos. En la derecha se ha empleado el radio corregido.

de la misma figura). Ajustando las coordenadas de los ecos de taladro a las de sus posiciones teóricas se obtiene una función de transformación que se aplica a todos los ecos localizados. Los puntos rojos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(b) son el resultado de aplicar estas correcciones locales representadas por las líneas de puntos azules. Como se aprecia en la figura, el resultado es una representación realista del taladro donde se distingue su contorno y la grieta patrón aparece claramente identificada en su posición real.

Resultados.

Hemos utilizado los procedimientos descritos en este trabajo para obtener la representación de todos los ecos identificados en las ruedas patrón que se muestra en la Figura 8. Los ecos independientes se han dibujado en color negro, los de taladro en azul y los cercanos a taladro en rojo. En la Figura 9 se muestran ampliados los taladros del patrón R1. La fila superior corresponde a T3, T2 y T1, que aparecían en la Figura 3, y la inferior a T4 y T5, donde aparecen seis de los 10 defectos de control practicados en el velo.

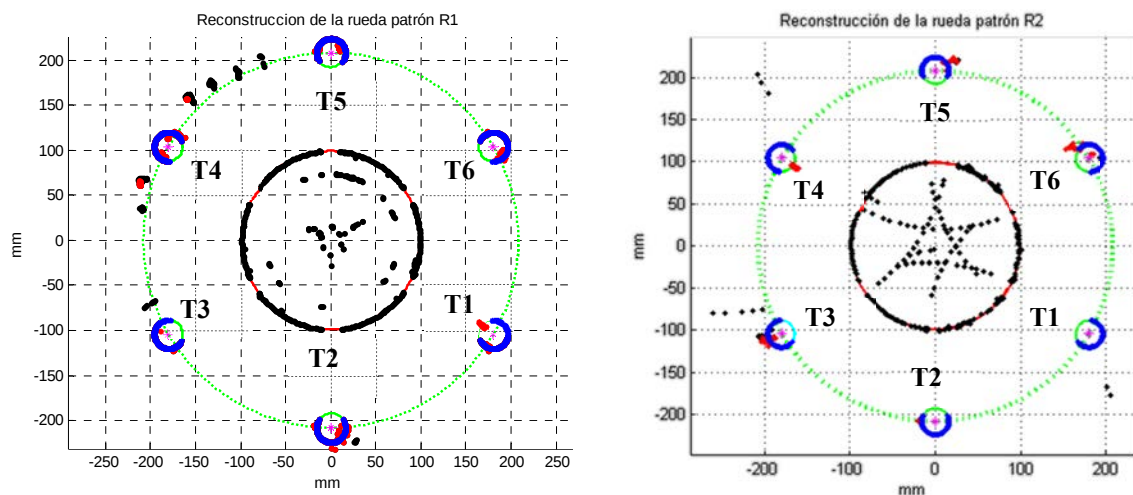


Figura 8. Imágenes de las ruedas patrón R1 y R2 realizadas con el procedimiento descrito en el trabajo. Los ecos de taladro se han dibujado con puntos azules, los ecos próximos a taladro con puntos rojos y los independientes con puntos negros.

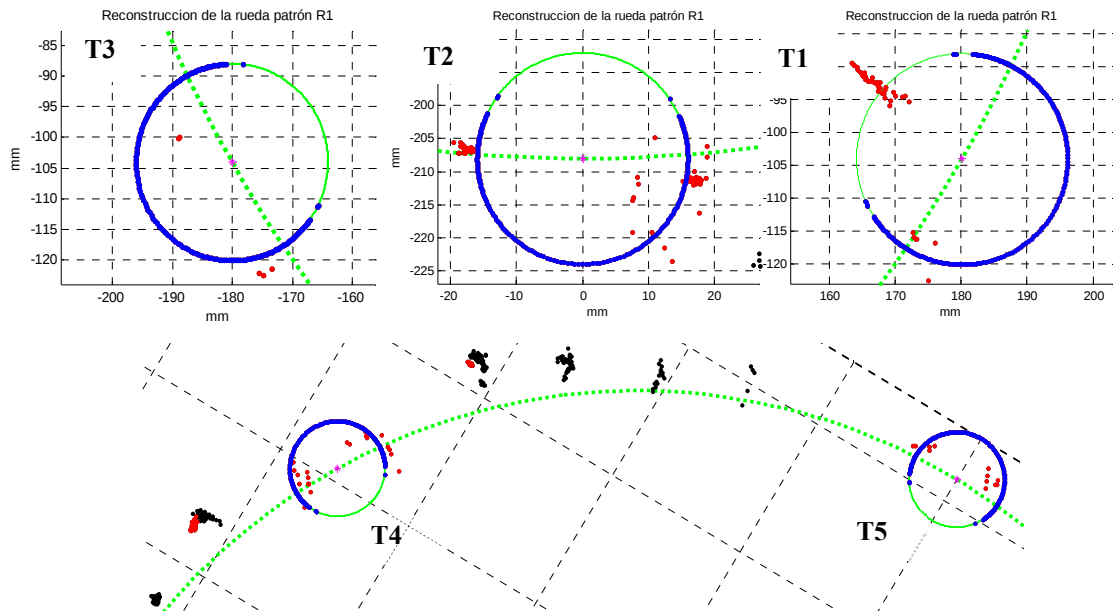


Figura 9. Vista ampliada de taladros de R1

En la Figura 10 se muestran ampliados los taladros del patrón R2 donde son identificables todos los defectos enumerados en la Tabla 1.

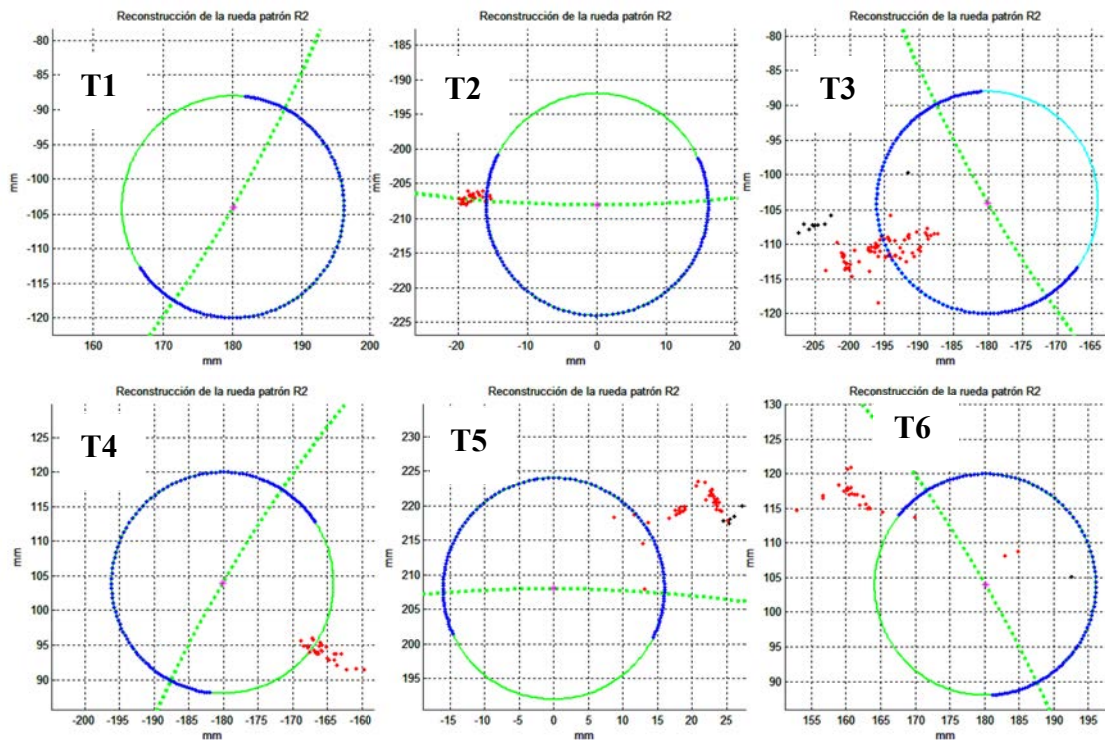


Figura 10. Vista ampliada de los taladros de R2

Conclusiones.

En este trabajo hemos mostrado como se pueden utilizar los conocimientos sobre la estructura de la pieza inspeccionada (en este caso ruedas de tren) para obtener una representación de los datos de una inspección por ultrasonidos que fácilmente interpretable

por cualquier operador y que puede servir de complemento a otras representaciones utilizadas para efectuar el diagnóstico del componente analizado.

Agradecimientos.

Este trabajo está financiado por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AEI/FEDER, UE) a través del proyecto DPI2016-80239-R.

Referencias.

- (1) <https://www.izfp.fraunhofer.de/en/Geschaeftsfelder/Bahn.html>. [accedido 20-04-2019]
- (2) Marty, P. N., et al. "Latest development in the UT inspection of train wheels and axles". En *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa*, 2012. [conferencia]
- (3) Rockstroh, Bernd, et al. "Ultrasonic and eddy-current inspection of rail wheels and wheelset axles". En *17th World Conference on Nondestructive Testing 2008*. [coferencia]
- (4) M. Parrilla, et al. "Ultrasonic imaging of solid railway wheels," *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Beijing, 2008. [conferencia]