

# Inspección de ejes ferroviarios con tecnología de Phased Array

J. Brizuela ([josebrizuela@conicet.gov.ar](mailto:josebrizuela@conicet.gov.ar))<sup>1\*</sup>, C. Desimone ([desimon@cnea.gov.ar](mailto:desimon@cnea.gov.ar))<sup>2\*</sup>,  
R. Romero ([rromero@cnea.gov.ar](mailto:rromero@cnea.gov.ar))<sup>2\*</sup>, G. Cosarinsky ([cosarinsky@cnea.gov.ar](mailto:cosarinsky@cnea.gov.ar))<sup>2\*</sup>,

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup>INEND-UAENDE, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

\*Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, ARGENTINA.

## 1. Introducción

Los ejes ferroviarios son componentes críticos dentro del material rodante, puesto que su fallo implica un alto riesgo de descarrilamiento con consecuencias potencialmente desastrosas y con graves daños socioeconómicos. Por tanto, los ejes deben ser sometidos a rutinas periódicas de verificación, las cuales pueden ser proyectadas según las horas de servicio, tipo de tráfico, carga, y estado de la ruta, etc. [1].

En Argentina, la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT) establece el control general obligatorio de ejes cada 150.000 Km [2]. La integridad de estos componentes se verifica mediante Ensayos No Destructivos (END), utilizando técnicas de Ultrasonido convencional (UT). No obstante, esta metodología es poco efectiva si se aplica de forma manual. Las actuales exigencias del mantenimiento ferroviario exigen que el tiempo de parada sea mínimo y que los ensayos sean fiables y repetitivos.

Los procedimientos de UT sugeridos por la [CNRT](#) para el control de ejes se encuentran en las guías ND1, ND2 y ND3 [3] que están vigentes desde los años 70. No obstante, presentan importantes limitaciones:

- **Fiabilidad de los ensayos:** la complejidad de la inspección es elevada por la geométrica del eje. Los diferentes bordes que tiene el diseño del componente, los cambios de sección, incluso el apriete de la rueda, producen diversas reflexiones que pueden dar lugar a la lectura de falsas indicaciones. Por tanto la técnica queda sujeta al nivel y experiencia del técnico.
- **Tiempos de inspección:** la inspección de un eje ferroviario por UT, requiere algo más de una hora/hombre y el control de toda una formación puede llevar días.
- **Registro de datos:** cuando la tecnología del equipamiento es obsoleta (Fig. 1) y si algún eje presenta observaciones o debe ser rechazado, la extracción de datos para elaborar un reporte debe ser manual. Por tanto, el tiempo de ensayo se incrementa aún más, dejando la posibilidad de que el operario introduzca errores en la carga de valores. El retraso en la documentación y la no digitalización de los resultados, impide elaborar posteriores análisis estadísticos de las averías e implementar registros históricos de cada eje.

Durante los últimos años en el sector ferroviario se han propuesto y descrito una gran diversidad de técnicas de END, para distintos componentes del sistema, en particular para ejes [4], ruedas [5] y vías [6], que abordan las limitaciones anteriores. Sobre todo se destacan aquellas propuestas donde la inspección, detección y evaluación de fallos se realizan de manera automática, asegurando la repetitividad de los ensayos, reduciendo los tiempos de parada y optimizando los costos. Esta modalidad de operación facilita llevar la trazabilidad de los ensayos, estudiar tipo y origen de fallas, y planificar y gestionar el mantenimiento adecuadamente.



Fig. 1.- Ejemplo de ensayo por UT de un eje, gentileza de Argentren - Línea General Roca. **A)-** Defecto practicado para la calibración de la técnica UT. **B)-** Indicación en el equipo del defecto de referencia. Se requiere de personal muy experimentado para interpretar las señales y discriminar los defectos de los ecos geométricos. A pesar de que el equipo es digital, la información no se puede extraer fácilmente para generar un reporte, lo más frecuente es capturar las indicaciones de pantalla mediante fotografías. **C)-** Exploración manual del eje, aplicando la técnica de UT por contacto.

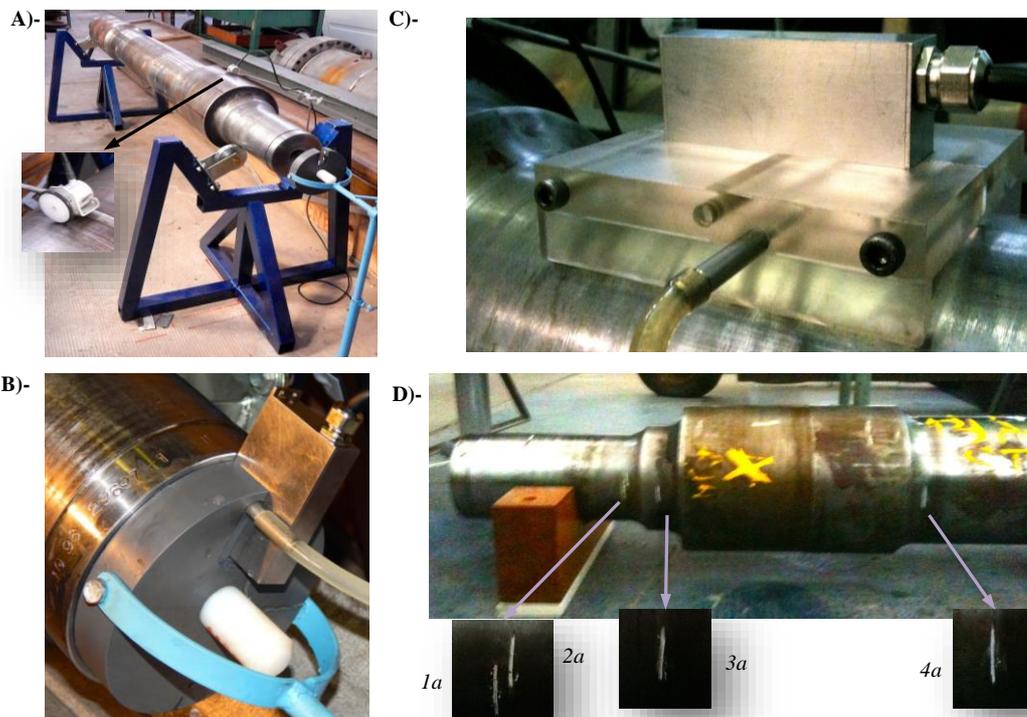
## 2. Motivación y Desarrollo

Ante el profundo detrimento en el que se encuentran las prácticas de END para evaluar la integridad de los ejes en Argentina, y con perspectivas a la conservación de las nuevas formaciones que pronto prestarán servicio en la red ferroviaria interurbana, se abordó el desarrollo de un sistema piloto de inspección de ejes basado en imágenes ultrasónicas adquiridas mediante tecnología de Phased Array (PA). La propuesta, permite la detección fiable de grietas transversales, que normalmente se forman en las regiones más vulnerables del eje [7].

### 2.1 Técnica de Ultrasonidos Phased Array (PAUT)

A partir de los años 90 la técnica (PAUT) se ha introducido como un método alternativo de END, abriendo grandes posibilidades para abordar la inspección de piezas complejas. Mientras la tecnología UT convencional requiere utilizar múltiples cuñas, interpuestas entre el transductor (monoelemento) y el eje, para examinar las regiones más vulnerables con distintos ángulos. La tecnología PA, emplea un gran número de elementos transductores dispuestos en un arreglo (o *array*), que son controlados individualmente y de forma coordinada para enfocar el haz ultrasónico en la dirección deseada. Las reflexiones del haz dentro del medio, luego son utilizadas para componer una imagen de corte de alta resolución (S-Scan). Asimismo, la tecnología PA prescinde de la exploración manual sobre la superficie del componente para elevar la probabilidad de detección de defectos, pues el barrido se realiza electrónicamente desde una posición fija.

### 2.2 Sistema propuesto



**Fig. 2. A)-** Bancada de ensayos con detalles del codificador de giro. **B)-** Soporte para posicionar el array en el extremo del eje y distribuir el acoplante. **C)-** Soporte para posicionar el array sobre el lateral del eje. **D)-** Entallas de referencia para las Figs. 3 y 4.

El desarrollo se realizó sobre una bancada experimental que soporta un eje motriz [8], aportado por Línea General Roca ([Argentren S.A.](#)), en donde se puede rotar la pieza codificando la posición de giro (Fig. 2A). Las imágenes ultrasónicas fueron adquiridas con un sistema PA de 32 canales de ultrasonidos (SITAU 311, [Dasel - España](#)) y un array de 5MHz y 128 elementos ([Imasonic - Francia](#)). Todos los ensayos se realizaron

empleando ondas longitudinales aplicadas en pulso-eco. El acople array-eje se realizó interponiendo a presión constante una fina capa de lubricante mineral líquido, para transferir la mayor energía acústica posible y evitar la posterior corrosión del material.

Los ensayos se realizaron sobre el asiento "A", sin embargo todos los conceptos que se describen son válidos para el otro extremo (Fig. 3A). En las regiones de transición se mecanizaron por corte, entallas transversales estrechas de diversas profundidades (Tabla 1). Las dimensiones de los defectos están muy por debajo de lo que exige la norma ASME-2010, sección V para ensayos de UT (profundidad de la entalla 3% del diámetro con un límite máximo de 1/4"). Para el diseño del sistema se diagramaron dos posibles configuraciones para ensayar el eje: *accediendo desde la testa* (Fig. 3B) y desde la *superficie lateral*, aplicable cuando se dispone del par montado (Fig. 3C).

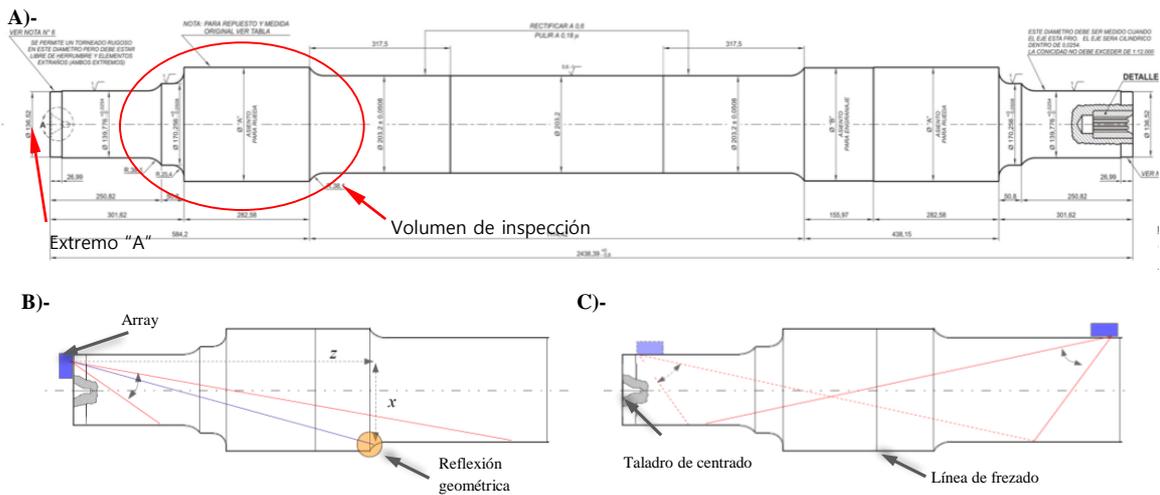


Fig. 3. A)- Esquema del eje motriz utilizado para los ensayos. B)- Esquema *acceso desde la testa*. C)- Esquema para *par montado*.

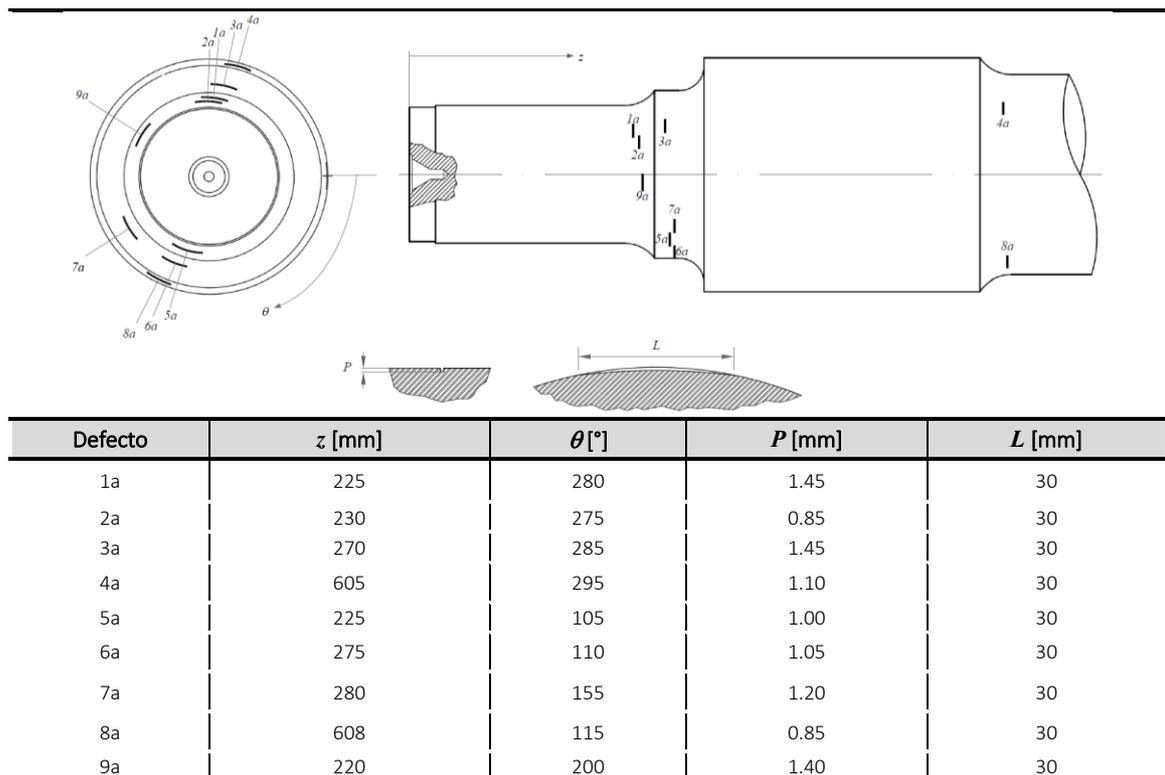
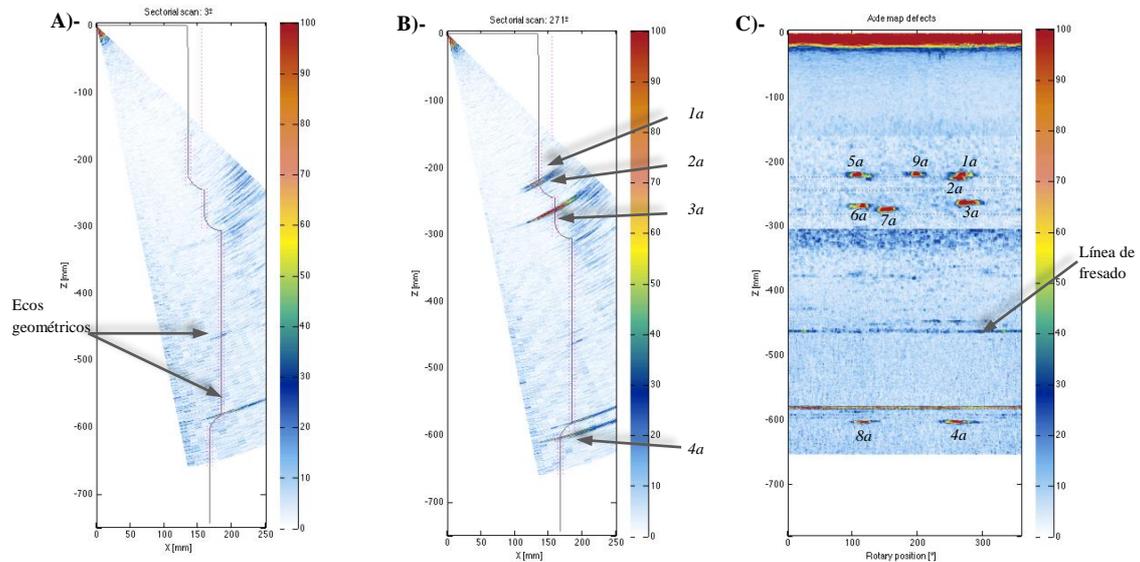


Tabla 1. – Descripción de las entallas mecanizadas en el asiento "A". Ángulos medidos respecto a la posición inicial de adquisición.

## 2.2.a Acceso desde la testa:



**Fig. 4.** A)- S-Scan desde el extremo superpuesto con la máscara del eje en una región libre de fallas. B)- S-Scan en una zona con defectos, claramente se identifican las 4 ranuras de la Fig 2D. C)- Mapeo de defectos en función de la profundidad y del giro del eje.

Esta modalidad propone evaluar los asientos del eje, accediendo desde el extremo más cercano. El array se posiciona en la punta próxima al asiento "A" mediante un soporte especialmente diseñado para operar desde ambas caras del eje. El porta-transductor mantiene orientado radialmente el array, evita su contacto directo con el eje, y distribuye el acoplante de manera laminar (Fig. 2B). La posición radial del conjunto de elementos usados para generar el haz (apertura activa) se posiciona de forma electrónica y con precisión, de manera tal, que las deflexiones del haz, no interfieran con el taladro de centrado. Luego se generan las leyes focales necesarias para barrer angularmente (S-Scan) con el haz de ultrasonido toda la región de interés (Fig. 3B). La imagen S-Scan es superpuesta junto con el plano de diseño del eje (*máscara*) para facilitar la interpretación de la información y ubicar rápidamente las indicaciones de las irregularidades.

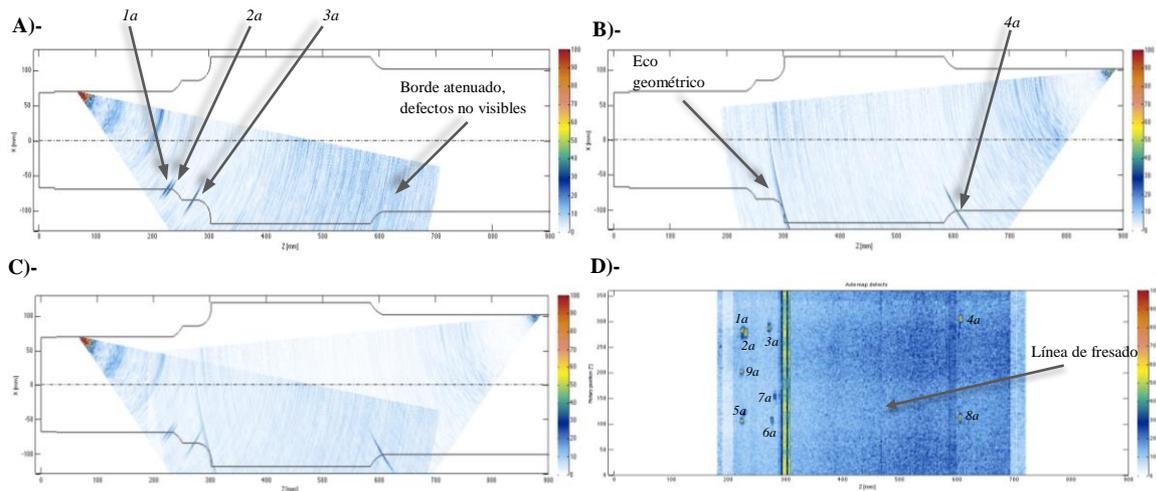
En una posición libre de defectos, la imagen S-Scan solo contiene la reflexión en el borde del asiento (Figs. 3B y 4A). Los ecos geométricos se pueden anticipar considerando la trayectoria sónica dentro de la geometría explorada. No obstante, cuando el plano del array es perpendicular al de alguna entalla, se producen reflexiones que se visualizan directamente en la imagen (Fig. 4B).

El volumen de interés se evalúa rotando el eje, manteniendo el array en posición fija y capturando imágenes cada 1.5°. El conjunto de S-Scans se utiliza para realizar una representación en función de la componente axial y circunferencial de los ecos del haz ultrasónico. El mapeo facilita la lectura de la inspección, pudiéndose determinar sobre la imagen la extensión y orientación de los defectos (Fig. 4C).

Esta modalidad de inspección resulta bastante efectiva por la posición del array y abre la posibilidad de evaluar el eje mientras está montado en el tren, con un mínimo desarme de piezas. Sin embargo, la estrategia no puede generalizarse ya que es muy dependiente de las terminaciones de los ejes; sería necesario disponer de soportes específicos para el array según la geometría de cada pieza.

## 2.2.b Acceso desde la superficie lateral del eje:

La variante está pensada para verificar el par montado durante una rutina de mantenimiento integral, pues se requiere de acceso a ambos lados de las ruedas (Fig. 3C). La estrategia consiste en posicionar el array a los laterales del asiento, ayudado de un soporte que se adapta a los diferentes radios de curvatura del eje y garantiza un acople continuo con la pieza (Fig. 2C).



**Fig. 5.** A)- Barrido S-Scan desde un lateral cercano al extremo A. B)- Barrido efectuado por detrás del asiento de la rueda. C)- Composición espacial de las imágenes A y B. D)- A partir de las imágenes compuestas de forma coherente, se realiza el mapeo de defectos resultante de la inspección lateral.

La imagen angular que se obtiene desde la izquierda del asiento, presenta baja sensibilidad para las regiones más distantes. Por ejemplo, al situar el array sobre el mismo plano que contienen los defectos de la Fig. 2D, las tres primeras entallas pueden ser distinguidas con facilidad, mientras que la ranura más alejada no puede ser evaluada (Fig. 5A). La atenuación y divergencia que sufre el pulso ultrasónico de alta frecuencia (5 MHz), en un recorrido superior a 700 mm, disminuye la sensibilidad y las probabilidades de detección. Por otro lado, la apertura activa de 32 elementos no es la suficiente para focalizar toda la energía acústica en una región muy alejada del array. Por tanto, este inconveniente se solventa al situar el array a la derecha del asiento de la rueda (Fig. 5B).

Desde la nueva posición, se destacan los bordes del componente, incluso logra identificarse la zona de frezado que se realizada sobre el asiento para el encastre de la rueda. Aunque, del mismo modo que en caso anterior, las ranuras más distantes del transductor no pueden ser detectadas.

Las dos exploraciones sobre la misma región ofrecen una diversidad espacial, suficiente para verificar las zonas no cubiertas y/o ocultas por “sombra acústica” desde uno u otro lado. Por tanto, empleando técnicas de composición no lineal [10] se genera una imagen con toda la información y con mayor probabilidades de detección (Fig. 5C).

La inspección completa del asiento se realiza capturando imágenes S-Scans cada 1.5°, desde ambos laterales. Posteriormente, todas las imágenes se combinan coherentemente para construir un mapeo de defectos (Fig. 5D). También este procedimiento se puede extender para verificar la zona central del eje.

Esta alternativa, si bien requiere de dos giros del eje para cubrir un mismo volumen, es independiente del tipo de terminación que tengan los ejes en sus extremos. Por tanto, la mecánica para manipular el array y garantizar el acoplamiento se reduce considerablemente, mientras que las posiciones del transductor se deberán determinar en función del eje a ensayar.

### 3. Conclusiones

En el presente trabajo se han comentado los aspectos básicos del diseño de un sistema de inspección de ejes basado en PAUT, donde se han contemplado dos posibles escenarios: *ensayo con el eje montado* en el tren, y *verificación del par montado* dentro de una rutina de mantenimiento. Ambos casos fueron validados sobre una bancada experimental, con resultados muy satisfactorios, que demuestran las ventajas cualitativas y cuantitativas que ofrece la tecnología PAUT con respecto a las técnicas convencionales en la inspección de ejes. Por otra parte, como el sistema de PA es flexible en su configuración, las estrategias propuestas se pueden adaptar rápidamente según la geometría del eje, y satisfacer los requisitos que puedan fijar las normativas vigentes.

El tiempo de la rutina de inspección completo es mínimo, 8 minutos accediendo desde los laterales del eje (peor de los dos casos presentados). El mapeo de la inspección, que se representa con elevada resolución y precisión, permite discriminar las reflexiones geométricas de los defectos, que tienen una profundidad media de 1mm.

Los ensayos son totalmente repetitivos, libres de cualquier subjetividad. Toda la información se puede almacenar para llevar una trazabilidad de los ensayos, ya sea en un puesto local o remoto, incluso el mapeo de defectos puede ser evaluado automáticamente. Por tanto, la propuesta se puede aplicar con regularidad durante la vida útil del eje, resultando muy rentable para el operador ferroviario ya que la interrupción del servicio es despreciable.

La elaboración de este sistema prototipo, está en concordancia con las actuales tendencias tecnológicas y exigencias del mercado ferroviario internacional. Se espera que esta iniciativa sirva para impulsar el desarrollo tecnológico e incentivar la investigación en un área prácticamente olvidada durante los últimos años en Argentina. Las recientes e importantes inversiones en infraestructura y material rodante necesitarán de sistemas modernos de evaluación que garanticen el funcionamiento, calidad y seguridad operatoria de las formaciones.

### Referencias

- [1]. V. Jemec, J. Grum (2009), "Automation of procedures and controls of railway materials at condition based maintenance". Proc. 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. Ljubljana, Slovenia. pp.: 91-107.
- [2]. Comisión Nacional de Regulación del Transporte - CNRT (1998), Boletín Técnico N° MR-2-98.
- [3]. Comisión Nacional de Regulación del Transporte - CNRT, "Revisión ultrasónica". Disponible en <http://www.cnrt.gob.ar/content/normativa/ferroviaria/ultrasonido>. Accedido: Septiembre 2014.
- [4]. C. Peng, L. Wang, X. Gao, Z. Wang, Q. Zhao, Y. Zhang, J. Peng, K. Yang. "High-Power Locomotive Solid Axle Defect on-line Detection Technique". 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, Sudáfrica. 16 al 20 de Abril 2012.
- [5]. J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez. "Railway wheel flat detection and measurement by ultrasound", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 19(1), pp. 975-984 (2011).
- [6]. F. Schubert, B. Koehler, O. Sacharov. "Ultrasonic Testing of Rails With Vertical Cracks, Numerical Modeling and Experimental Results". NDTnet, vol.3 (6) (1998).
- [7]. U. Zerbst, S. Beretta, G. Köhler, A. Lawton, et al. (2013), "Safe life and damage tolerance aspects of railway axles - A review", Engineering Fracture Mechanics. Vol. 98, pp. 214-271.
- [8]. G.R. 12W". Disponible en: <http://www2.cnrt.gob.ar/nefa/Plano%209-01-53.jpg>. Accedido: Abril 2014.
- [9]. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination, ARTICLE 23 "Ultrasonic Standards - standard practice for ultrasonic examination of heavy steel forgings" SA-388/SA-388M (ASME, 2010).
- [10]. M. Parrilla, P. Nevado, A. Ibáñez, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch (2008), "Ultrasonic Imaging of solid railway wheels". IEEE Ultrasonics Symposium, Beijing, China, pp.: 414 - 417.