

# Aplicación de tecnologías disruptivas para la digitalización del mantenimiento ferroviario

Alejandro Bustos Caballero<sup>1</sup>, Higinio Rubio Alonso<sup>2</sup>, Cristina Castejón Sisamón<sup>2</sup>, Enrique Soriano Heras<sup>2</sup>, Juan Carlos García Prada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MAQLAB, Departamento de Mecánica, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. Email:

[albustos@ind.uned.es](mailto:albustos@ind.uned.es), [jcgprada@ind.uned.es](mailto:jcgprada@ind.uned.es)

<sup>2</sup>MAQLAB, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos II de Madrid, España. Email: [hrubio@ing.uc3m.es](mailto:hrubio@ing.uc3m.es),

[castejon@ing.uc3m.es](mailto:castejon@ing.uc3m.es), [esoriano@ing.uc3m.es](mailto:esoriano@ing.uc3m.es)

## Resumen

La Industria 4.0 está revolucionando el modo en el que se abordan todos los aspectos de un producto o servicio, y el ferrocarril no es ajeno a ello. Tradicionalmente, el mantenimiento realizado en el ferrocarril se ha centrado en un enfoque preventivo, pero los paradigmas del Mantenimiento 4.0 implican una evolución hacia estrategias de mantenimiento más novedosas basadas en la monitorización de la condición y el mantenimiento predictivo. En este artículo se sientan las bases para el desarrollo de un gemelo digital del bogie de un tren de Alta Velocidad que facilite la adopción estas nuevas metodologías. Para ello, se propone un gemelo digital de bogie compuesto por tres modelos: un modelo geométrico generado por ordenador, un modelo de elementos finitos y un modelo multicuerpo. Los tres modelos proporcionan la información inicial para el comportamiento dinámico del sistema que deberá ser completado con información del sistema real en operación.

**Palabras clave:** Industria 4.0; Gemelo Digital; Universal Mechanism; Mantenimiento 4.0, bogie

## Abstract

Industry 4.0 is revolutionising how all aspects of a product or service are addressed, and the railway industry is no stranger to this. Traditionally, maintenance in railways has focused on a preventive approach, but Maintenance 4.0 paradigms imply an evolution towards newer maintenance strategies based on condition monitoring and predictive maintenance. This article lays the foundations for the development of a digital twin of a High-Speed train bogie to facilitate the adoption of these new methodologies. To this end, a digital twin of the bogie is proposed, consisting of three models: a computer generated geometric model, a finite elements model and a multibody model. The three models provide the initial information for the dynamic behaviour of the system that must be completed with information from the real system in operation.

**Keywords:** Industry 4.0; Digital Twin; Universal Mechanism; Maintenance 4.0, bogie

## 1. Introducción

La Industria 4.0 supone la cuarta revolución industrial, la cual se caracteriza por la digitalización de los procesos a través de la introducción del “Internet de las cosas” (IoT, Internet of Things). Esta nueva revolución no afecta sólo a los métodos de diseños de nuevos productos, sino también al modo en el que se organizan las empresas y su relación con la sociedad [1]. Además del IoT, en esta revolución se engloban tecnologías tan

diversas como la fabricación aditiva, el “big data”, la criptología, la inteligencia artificial, la realidad aumentada o el Gemelo Digital (DT, Digital Twin), entre otras muchas.

Estas novedosas tecnologías se pueden aplicar también al mantenimiento, digitalizando la forma en que se realiza el mantenimiento predictivo [2] y dando lugar al Mantenimiento 4.0. Evidentemente, la implantación del Mantenimiento 4.0 requiere la instalación y

configuración de todos los elementos necesarios para la digitalización: sistemas de monitorización, bases de datos informatizadas y conectadas, infraestructura de telecomunicaciones, ciberseguridad, etc.

En la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de estrategias para la implantación del Mantenimiento 4.0, orientadas principalmente a la parte organizativa del mismo. Autores como van Staden y Bouste [3] analizan cuál es la mejor estrategia para predecir el deterioro de sistemas: utilizar sensores internos o externos al sistema. A través del análisis de diversos parámetros (costes, fiabilidad, etc.) se establecen las ventajas e inconvenientes de ambos sistemas. Navas et al. [4] establecen todos los aspectos (desde un punto de vista empresarial) que debería cubrir la implantación del Mantenimiento 4.0 y cómo se deberían implicar todos los departamentos de la empresa en este nuevo paradigma. Por otra parte, Sahal et al. [5] examinan las fortalezas y debilidades de los sistemas de almacenamiento de datos, desde el punto de vista de la Industria 4.0.

Dada la novedad de las tecnologías aquí comentadas, la disponibilidad de ejemplos aplicados a productos industriales o sistemas concretos no es muy abundante. Saidu et al. [6] exponen la implementación de un Sistema de Mantenimiento Predictivo 4.0 en una planta desaladora, utilizando los datos obtenidos de los diferentes sensores para mejorar el diseño de la planta. Tecnologías como la realidad aumentada y la fabricación aditiva se han aplicado con éxito al mantenimiento de aeronaves [7], lo que ha permitido el diseño y la fabricación de piezas de avión optimizadas que, posteriormente, se han instalado en sistemas críticos de la aeronave. La realidad aumentada también se ha demostrado muy útil durante las operaciones de construcción, mantenimiento e inspección de tuberías en buques y plataformas marinas [8].

La ingeniería inversa no es propiamente una tecnología perteneciente a la Industria 4.0, pero su utilización en conjunto con la fabricación aditiva permite solucionar problemas de disponibilidad de recambios en el mantenimiento. Por ejemplo, gracias a la ingeniería inversa, Deutsche Bahn ha comenzado la fabricación aditiva, en metal, de piezas pesadas, para paliar la falta de recambios para las locomotoras más antiguas [9].

Continuando con el ferrocarril, algunos investigadores se han adentrado en la implantación en este sector del Mantenimiento 4.0. Kans et al. [2] analizan la situación del sistema ferroviario sueco y cómo este nuevo paradigma puede ayudar a mejorarlo. El trabajo se centra fundamentalmente en la gestión del tráfico ferroviario y los efectos organizativos. También se han propuesto sistemas basados en lógica difusa (fuzzy) para realizar el mantenimiento predictivo de los carriles, la catenaria y los pantógrafos [10]. Por otro

lado, Lederman et al. [11] proponen la utilización de señales recogidas en múltiples trenes para la monitorización del estado de la vía.

Sin embargo, se podría decir que la propuesta más seria de implementación del Mantenimiento 4.0 en el ferrocarril viene de Japón. East Japan Railway ha implementado este paradigma en los últimos años [12] con una estrategia basada en cuatro pilares: mantenimiento basado en la condición, gestión de activos, apoyo de la Inteligencia Artificial al trabajo e integración de las bases de datos. En este trabajo se detalla el caso de los automotores E235, que prestan servicios similares a “Cercanías” y son capaces de monitorizar tanto sus propios sistemas como la vía y la catenaria.

Según Grieves y Vickers [13], el Gemelo Digital “*es un conjunto de información virtual que describe el sistema físico real y que debería ser capaz de representar su estado, condición de funcionamiento o posición en tiempo real*”. Esta tecnología es utilizada ampliamente en el diseño de productos, la gestión del ciclo de vida, la logística y el mantenimiento, en sectores como el aeronáutico, la automoción, el energético, la construcción, la fabricación o la ingeniería naval [14]. Sin embargo, los ejemplos de aplicación al ferrocarril son escasos y principalmente orientados a la infraestructura (vía, señalización, catenaria, etc.) y a la gestión del tráfico [15].

En este trabajo se presenta una metodología general para la implantación del Mantenimiento 4.0 en un tren de alta velocidad concebido y construido antes del nacimiento de la Industria 4.0. Uno de los pilares de la metodología propuesta es el Gemelo Digital, aspecto en el que se focalizará el trabajo, mostrando cómo esta tecnología puede ayudar a en el proceso de diagnosis del estado del tren.

## 2. Flujo de información

Un aspecto importante en la implementación del Mantenimiento 4.0 (y de la Industria 4.0 en general) es cómo se realiza el flujo de información entre los diferentes componentes del sistema. En el caso que nos atañe en este trabajo, se propone un sistema basado en cuatro pilares o bloques fundamentales:

- Sistema físico.
- Gemelo Digital.
- Infraestructura TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación)
- Y diagnóstico, que puede ser a corto o a largo plazo.

El flujo de información entre estos pilares se muestra en la Figura 1, donde las flechas en trazo continuo ilustran la transmisión directa de información y las

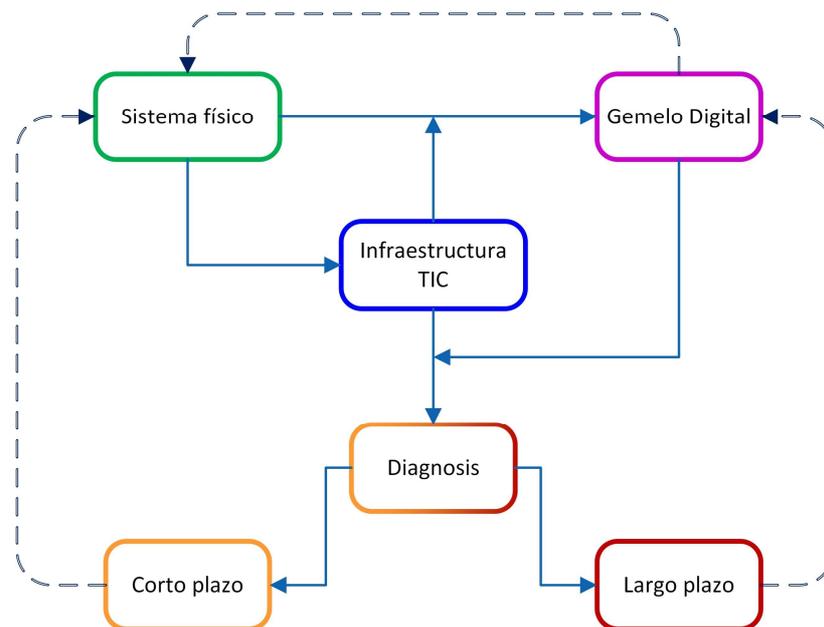


Figura 1. Diagrama de flujo de información para implementación del Mantenimiento 4.0.

flechas con trazo discontinuo ilustran realimentaciones de información.

El bloque “Sistema físico” contiene toda la información relativa al sistema real al cual se le aplica es Mantenimiento 4.0. Esta información comprende tanto las características del sistema o máquina (dimensiones, masas, materiales, sistemas de transmisión, de unión, etc.), como del sistema de monitorización instalado (cantidad y tipos de sensores, características de éstos, adquisición de datos...).

En el bloque “Gemelo Digital” se recoge toda la información virtual necesaria para representar de la manera más fidedigna posible el comportamiento real del sistema físico.

El bloque “Infraestructura TIC” engloba todos los medios hardware y software necesarios para realizar la transmisión, recepción y almacenamiento de los datos recogidos por los sensores instalados en el sistema físico.

El último pilar, el bloque “Diagnóstico”, comprende todas las técnicas de procesamiento de la señal necesarias para determinar la condición del sistema físico, se apliquen éstas a corto o largo plazo.

El flujo de información entre los bloques es como sigue: las características físicas del sistema físico se utilizan para generar el Gemelo Digital, mientras que los datos de los sensores se envían a la Infraestructura TIC. Los datos medidos también se utilizan para actualizar el DT en tiempo real. Posteriormente, se combinan las medidas reales con datos del DT para

diagnosticar el estado del sistema. Este diagnóstico se puede hacer a corto plazo, permitiendo detectar fallos inminentes y enviar la información a la máquina casi en tiempo real; o se puede realizar a más largo plazo, estudiando la evolución del sistema y actualizando planes de mantenimiento, rediseñando partes del sistema, etc.

### 3. Sistema físico

Conocer al detalle el sistema físico y en qué ambientes opera es un requisito fundamental para poder realizar un correcto mantenimiento, pues ayuda a comprender las causas que originan los fallos del sistema mecánico y a encontrar la mejor solución a los mismos.

En este trabajo, el sistema físico estudiado es un tren de alta velocidad. Más concretamente, el bogie remolcado de uno de sus coches. El tren estudiado está formado por dos cabezas motrices y ocho coches. Las cabezas motrices se sitúan en los extremos del tren y cada una de ellas se apoyada en dos bogies motores. Los ocho coches están articulados y descansan sobre 9 bogies remolcados, 7 de ellos tipo Jacobs. La velocidad máxima homologada del tren son 300 km/h. En la Figura 2 se muestra el esquema del tren estudiado y se señala con un círculo rojo el bogie objeto de estudio.

Aunque el tipo de tren estudiado ha circulado por casi todas las líneas de alta velocidad españolas, habitualmente realiza los servicios de transporte de pasajeros a Sevilla y Alicante desde Madrid. Ambas líneas están construidas sobre balasto, con traviesas de hormigón, separadas 60 cm entre sí.

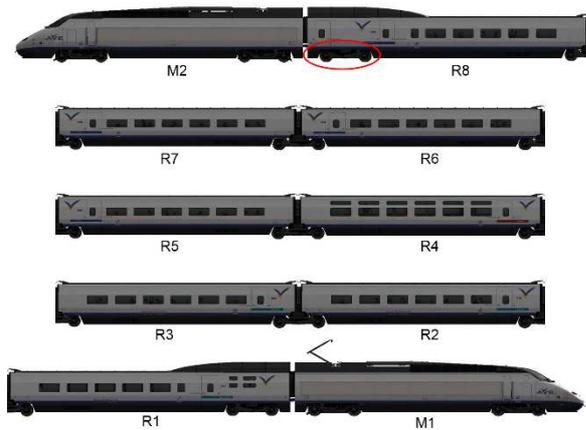


Figura 2. Esquema del tren de alta velocidad estudiado.

En el momento de tomar los datos del sistema (un tren de alta velocidad en este trabajo), es preferible que éste se encuentre en las condiciones más homogéneas posibles. Por este motivo se decide analizar registros de vibración tomados en tramos de 100-150 km de longitud (de ambas líneas). En el tramo seleccionado de la línea Madrid-Sevilla, el tren viaja a 270 km/h. En la línea Madrid-Alicante, el tren se desplaza a 300 km/h.

#### 4. Gemelo Digital

El Gemelo Digital propuesto se desarrolla a partir de los datos del sistema físico del sistema ferroviario con el objetivo de caracterizarlo y desarrollar mejoras, si es necesario. Este Gemelo Digital consta de tres modelos: un modelo CAD 3D, un modelo de elementos finitos (FEM) y un modelo multicuerpo.

El detallado modelo CAD 3D se compone a partir de la información técnica facilitada por el fabricante. Utilizando el software de PTC CREO Parametric, se modela el bastidor del bogie, el eje montado, las cajas de grasa, las suspensiones primaria y secundaria, el sistema de frenado y las uniones caja-bogie, tal y como se observa en la Figura 3. De este modo, se puede estudiar la interacción entre las más de 780 piezas que componen el sistema “bogie” y, además, puede servir de base para el desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual o Realidad Aumentada para el mantenimiento.

El modelo de elementos finitos (FEM) se desarrolla utilizando el software ANSYS, a partir del modelo CAD 3D creado con CREO Parametric. Determinados componentes clave del bogie del modelo CAD 3D se importan a ANSYS para realizar análisis modales y, así, obtener las frecuencias naturales de los mismos, ya sean como componentes individuales o como combinación de varios (ver Figuras 4 y 5).



Figura 3. Modelo CAD 3D del bogie desarrollado en CREO Parametric.

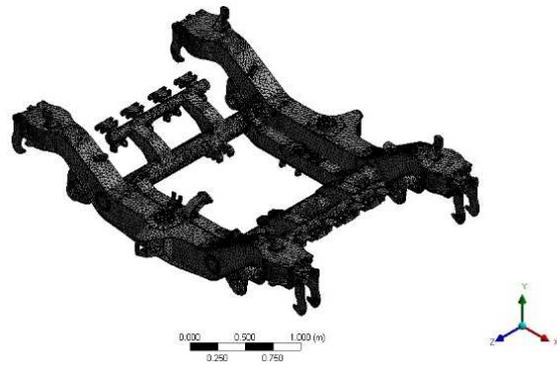


Figura 4. Modelo FEM del bastidor del bogie, en ANSYS.

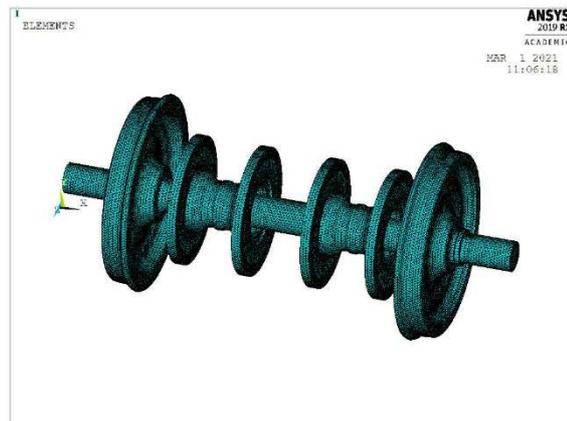


Figura 5. Modelo FEM de un eje montado, en ANSYS.

Para la implementación del modelo multicuerpo se utiliza el software Universal Mechanism, el cual tiene herramientas especialmente diseñadas para la simulación dinámica de vehículos ferroviarios. A partir de los datos obtenidos del modelo desarrollado en CREO Parametric, se ensambla un modelo multicuerpo de conjunto ferroviario, prestando especial atención a las propiedades inerciales de los cuerpos y la relación física entre ellos. Gracias a este modelo multicuerpo, es posible comprender mejor el comportamiento del

bogie real ante diferentes condiciones operativas de circulación. En la Figura 6 se muestra este modelo.

Además, es interesante conocer otras frecuencias de fallo que no proporcionan los modelos anteriores y que se calcularán de manera teórica, como las frecuencias de fallo de los rodamientos [16], ecuaciones (1) a (4), y la frecuencia de paso por la traviesa, ecuación (5).

$$BPF1 = \frac{N}{2} F_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (1)$$

$$BPF0 = \frac{N}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (2)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} F_r \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \beta\right) \quad (3)$$

$$FTF = \frac{F_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (4)$$

$$SPF = \frac{v}{\lambda} \quad (5)$$

Donde  $N$  es el número de elementos rodantes del rodamiento,  $F_r$  es la frecuencia de giro de la rueda,  $d$  es el diámetro de los elementos rodantes,  $D$  es el diámetro medio del rodamiento,  $\beta$  es el ángulo de contacto,  $\lambda$  representa la distancia entre las traviesas y  $v$  es la velocidad de circulación del tren.

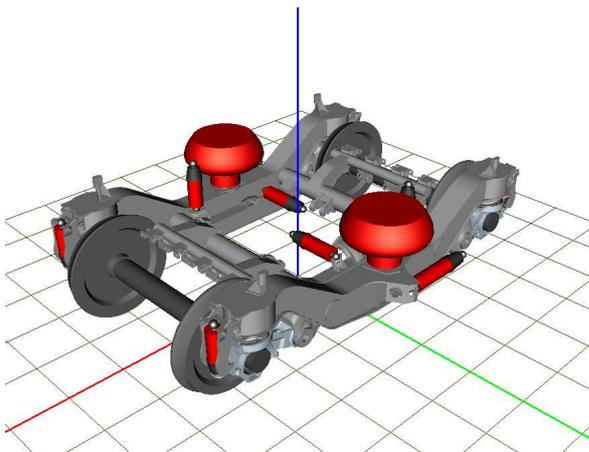


Figura 6. Modelo multicuerpo del bogie estudiado, implementado en Universal Mechanism.

## 5. Infraestructura TIC

La adquisición de las señales de vibración se realiza a través de un equipo de medida de vibraciones instalado a bordo del tren. Este sistema consiste en 6 acelerómetros uniaxiales, un tacómetro, dos unidades IMx-R, un router 3G y todo el instrumental eléctrico de conexión necesario para el funcionamiento del sistema.

Los acelerómetros se encuentran agrupados de tres en tres a ambos lados de uno de los ejes remolcados del tren y orientados según las tres direcciones del espacio: longitudinal, lateral y vertical. Se posicionan en las tapas de las cajas de grasa con el objetivo de captar adecuadamente las vibraciones de los rodamientos, del eje montado e, incluso, la interacción con la vía. El

sensor de velocidad se sitúa en una de las tapas de la caja de grasa, embebido en ella.

Los equipos IMx-R los proporciona la corporación SKF y son los responsables de llevar a cabo el acondicionamiento de la señal y el registro de las vibraciones. Posteriormente, las señales de vibración se envían a través del router 3G de manera inalámbrica hasta una base de datos remota, en la cual se almacenan definitivamente las señales de vibración. En las Tablas 1 y 2 se recogen las características de los acelerómetros y los parámetros utilizados para la adquisición de las señales vibratorias.

Tabla 1. Características de los acelerómetros

Parámetro	Valor
Sensibilidad ( $\pm 20\%$ )	10,2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Rango de aceleración	$\pm 490$ m/s <sup>2</sup>
Rango de frecuencia ( $\pm 3$ dB)	0,52 Hz to 8 kHz
Frecuencia de resonancia	25 kHz
Linealidad de la amplitud	$\pm 1\%$
Sensibilidad transversal	$\leq 7\%$

Tabla 2. Parámetros de la adquisición de señales

Parámetro	Valor
Frecuencia de muestreo	5120 Hz
Tiempo de medida	3,2 s
Rango de velocidad para la adquisición de datos	75-2000 rpm (13-347 km/h)

## 6. Diagnóstico

Para el diagnóstico del sistema se utilizan diferentes técnicas de procesamiento de la señal, dependiendo de si debe hacerse a corto o largo plazo. Para el corto plazo se emplean parámetros estadísticos de las señales vibratorias, como el valor RMS, la varianza o la curtosis; y técnicas frecuenciales como la densidad de potencia espectral y el espectro de la envolvente. Para el diagnóstico a largo plazo se emplean técnicas en el dominio tiempo-frecuencia que requieren mayores tiempos de cálculo y también pueden manejar mayores cantidades de información, como Empirical Mode Decomposition (EMD) [17], Enhanced Graphical Representation of State Configurations (EGRSC) y Enhanced Chromogram of Bands of Frequency (ECBF) [18].

## 7. Resultados

En la Tabla 3 se muestran las frecuencias calculadas teóricamente, utilizando las ecuaciones (1) a (5), considerando que el diámetro de la rueda se encuentra entre el nominal y el límite de desgaste. Las frecuencias características de la vía se han obtenido de la literatura científica [19–21].

Atendiendo a las frecuencias de la Tabla 3, se aprecia que las frecuencias de paso por la traviesa y de defecto

en los elementos rodantes del rodamiento (BSF) se encuentran muy próximas, lo cual puede llevar a una interpretación errónea de los datos de las señales de vibración. También se observa la proximidad (y posible coincidencia) de las frecuencias de fallo en pista exterior (BPFO) e interior (BPFI) con resonancias propias de la vía.

Tabla 3. Frecuencias características del tren y de la vía, a 270 km/h y 300 km/h, considerando ruedas nuevas y desgastadas.

Fenómeno	Frecuencia (Hz) a 270 km/h	Frecuencia (Hz) a 300 km/h
Frecuencia de giro (Fr)	25,95-28,09	28,83 – 31,21
BPFI	329,14 – 356,24	365,71 – 395,83
BPFO	267,69 – 289,74	297,44 – 321,93
BSF	122,84 – 132,96	136,49 – 147,73
FTF	11,65 – 12,61	12,95 – 14,01
Corrugación rueda	1.500 – 3.500	
Rebote bogie	~2.5-3	
Paso por la traviesa (SPF)	125	138,89
Resonancia carril/traviesa -balasto	40 – 300	
Resonancia carril-placa de asiento	200 – 600	
Resonancia del carril entre apoyos	~1.000	

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de una señal de vibración registrada en el tren de alta velocidad, a 270 km/h. También se ha representado el espectro de frecuencia de esta señal y, en la tercera gráfica, se han marcado las componentes que no corresponden con armónicos de la frecuencia de giro del eje en un espectro normalizado.

En el espectro de la señal anterior se aprecian tres zonas principales de actividad entre 0 Hz y 350 Hz, entre 500 Hz y 1.000 Hz, y entre 1.500 Hz y 2.560 Hz. Las dos componentes de mayor amplitud se encuentran a 124,1 Hz y a 270 Hz, lo que corresponde a 4,73 y 10,3 veces la frecuencia de giro del eje, respectivamente. La primera componente se sitúa a una frecuencia muy próxima al BSF y al paso de la traviesa y se estima que podría corresponder a este último fenómeno. La segunda componente significativa está muy próxima a la frecuencia BPFO del rodamiento.

En la zona entre 500 Hz y 1.000 Hz se aprecian multitud de componentes, casi todas ellas armónicos de la frecuencia de giro del eje. Sin embargo, algunas componentes (marcadas en rojo) se encuentran a

frecuencias 23,4 y 24,4 veces la frecuencia de giro del eje.

En la zona de alta frecuencia, a partir de 1.500 Hz, aparecen componentes frecuenciales que se corresponden con fenómenos de corrugación de la rueda y defectos de onda muy corta (3-6 cm) en los carriles [22].

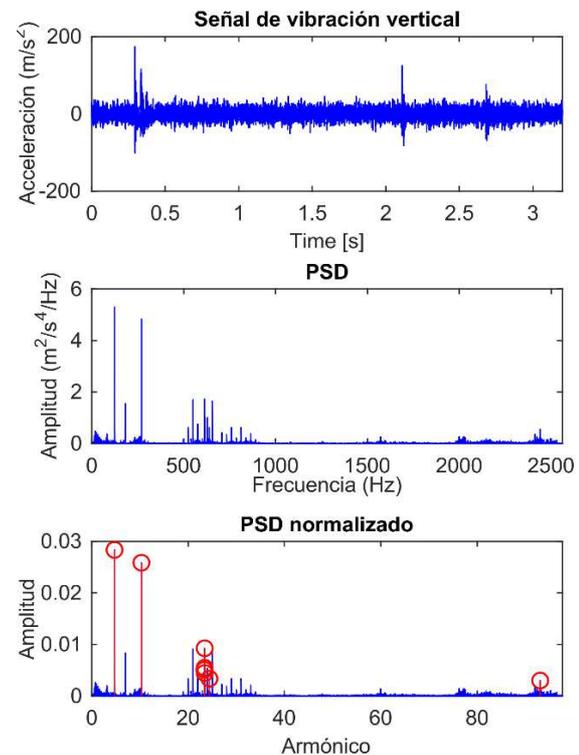


Figura 7. Señal temporal, espectro de la PSD y diagrama de las componentes no armónicas de una señal de vibración vertical registrada a 270 km/h.

En relación con los modelos de elementos finitos del DT, se han utilizado elementos tipo Tet10 y SOLID187, con un tamaño de malla adecuado para reproducir correctamente las geometrías. Los modelos de elementos finitos permitieron calcular las frecuencias naturales y los modos de vibración de los diferentes componentes del bogie. En el caso del bastidor, en el primer modo de vibración, éste se deforma tal y como se observa en la Figura 8. Este primer modo natural de vibración aparece a 27 Hz.

El primer modo de vibración del eje montado (compuesto por el eje, las ruedas y los discos de freno) se ilustra en la Figura 9. Como se puede observar en la Figura 9, su representación se corresponde con un modo de flexión, siendo la frecuencia de oscilación de 76,8 Hz. Esta frecuencia se acerca mucho a la frecuencia del tercer armónico de giro del eje cuando el tren viaja a 270 km/h, ello hace que esta componente frecuencial cobre gran protagonismo en el espectro.

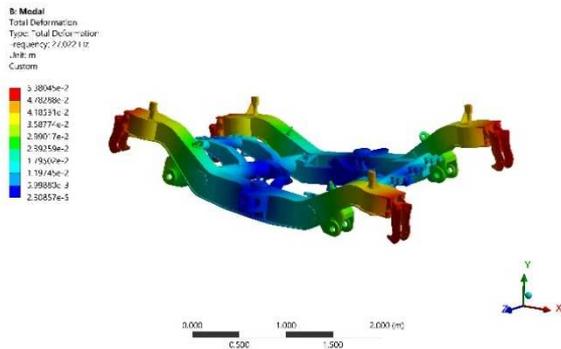


Figura 8. Primer modo de vibración del bastidor del bogie estudiado.

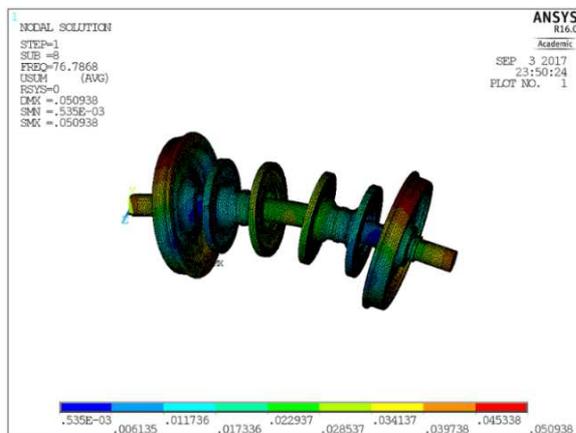


Figura 9. Primer modo de vibración del eje montado.

El modelo multicuerpo permitió analizar la estabilidad del vehículo ferroviario y también su comportamiento en diversas condiciones: introduciendo irregularidades en la vía y/o en el propio bogie.

El estudio de la estabilidad busca determinar cuál es la velocidad crítica a partir de la cual el bogie comienza una oscilación conocida como movimiento de lazo [23]. Para ello, se introduce una irregularidad controlada en la vía y se observa el desplazamiento lateral de los ejes del bogie. Por debajo de la velocidad crítica, el vehículo se centrará en la vía. Por encima de la velocidad crítica, permanecerá oscilando entre los dos carriles. La Figura 10 muestra el plano de fase obtenido en Universal Mechanism para este estudio a una velocidad de 300 km/h. Se observa cómo, tras la irregularidad inicial, el sistema oscila hasta regresar al punto estable (0,0). Por tanto, se puede concluir que el modelo es estable a esa velocidad, como cabría esperar puesto que el tren está homologado para circular a 300 km/h.

Para hallar la velocidad crítica se repite el experimento, aumentando la velocidad en cada caso, hasta alcanzar aquella en la cual la trayectoria del plano de fase no retorne al sumidero localizado en (0,0). El retrato de

fase de la Figura 11 muestra que la velocidad crítica se sitúa aproximadamente en 363 km/h. A esta velocidad se aprecia que la trayectoria del retrato de fase finaliza en el sumidero. A partir de 364 km/h se observa un fenómeno de ciclo límite en torno al punto (0,0), lo cual indica que el sistema permanece oscilando.

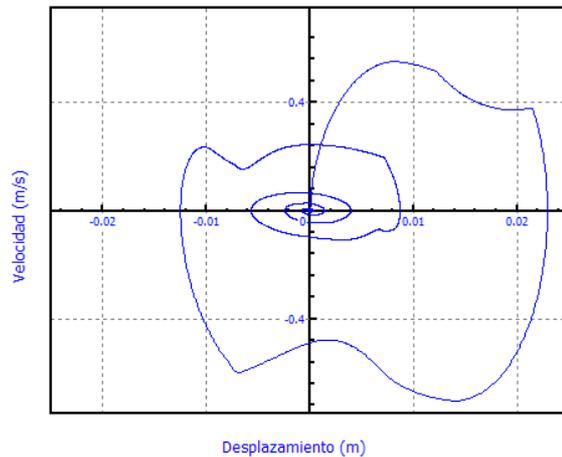


Figura 10. Plano de fase del bogie estudiado a 300 km/h.

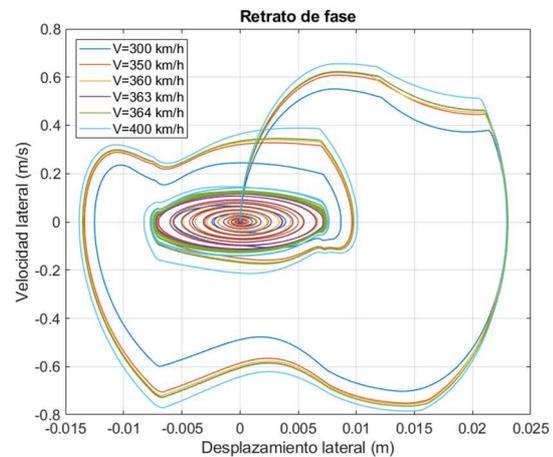


Figura 11. Retrato de fase del bogie estudiado, variando la velocidad.

Así mismo, en el modelo multicuerpo se pueden simular irregularidades en la vía y en las ruedas, tratando de representar las condiciones reales de circulación del tren. Para ello, se introducen irregularidades en las dos ruedas del eje delantero del bogie, irregularidades de tipo armónico, con amplitud de 0,01 mm y un total de 100 ondas; y, en la vía, se combinan defectos de onda muy corta (longitud de onda de 0,04 m y amplitud de 0,05 mm) e irregularidades generadas según las indicaciones del European Rail Research Institute (ERRI) [24].

Estas irregularidades se crean a partir de las ecuaciones (6) a (8), que definen los espectros de frecuencia para las irregularidades horizontales de la vía, la mitad de la suma de las irregularidades verticales y la mitad de la diferencia de las irregularidades verticales, respectivamente. Los valores de los parámetros empleados se listan en la Tabla 4

$$\Phi(\Omega) = \frac{a_h \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0 \quad (6)$$

$$\Phi(\Omega) = \frac{a_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0 \quad (7)$$

$$\Phi(\Omega) = \frac{1}{b_A^2} \cdot \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Omega_s^2} \cdot \frac{a_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0 \quad (8)$$

Tabla 4. Valores de los parámetros para la generación del espectro de frecuencias de acuerdo con [24].

Parámetro	Valor
$a_h$	0,6125e-6 cm <sup>2</sup> ·rad/m
$a_v$	1,08e-6 cm <sup>2</sup> ·rad/m
$\Omega_c$	0,8246 rad/m
$\Omega_R$	0,0206 rad/m
$\Omega_s$	0,4380 rad/m
$b_A$	0,75 rad/m

Una vez establecidos los parámetros de las irregularidades (Tabla 4), se realiza una simulación de circulación del bogie bajo carga de 15 t/eje a una velocidad de 300 km/h y se registran las aceleraciones calculadas por el software Universal Mechanism en el extremo izquierdo del eje delantero, en dirección vertical. Este punto de toma de señal se elige porque corresponde con la ubicación de los acelerómetros en el tren real. Los datos de la simulación se comparan, en términos frecuenciales, con la señal de aceleración tomada en el tren, a la misma velocidad de 300 km/h. La Figura 12 ilustra los espectros de potencia de ambas señales, con la señal simulada en la parte superior y la señal real en la parte inferior.

Comparando ambos espectros, se aprecia que las componentes de la señal simulada, evidentemente, son más puras, con mucho menos ruido que el espectro de la señal real, lo cual redundará también en que las amplitudes de las componentes principales del espectro son considerablemente mayores. Estas diferencias se pueden minimizar ajustando el modelo convenientemente y teniendo siempre presentes las limitaciones del mismo.

El análisis cualitativo de los espectros de la Figura 12 es mucho más interesante pues, si se presta atención a las zonas activas de los espectros, se puede observar que coinciden, en ambos casos se distinguen tres zonas activas: 0 Hz - 200 Hz, 800 Hz - 1.100 Hz y 1.900 Hz - 2.200 Hz. Seleccionando uno u otro tipo de defecto, en el modelo multicuerpo, se puede estudiar qué zonas del espectro estimula cada tipo de defecto y, extrapolando a las señales reales, determinar de manera

cualitativa el posible origen físico de las componentes del espectro. De este modo, es posible avanzar en la detección de la condición del estado del sistema mecánico. En concreto, las regiones de frecuencia superior a 800 Hz se accionan al introducir el defecto de onda muy corta en la vía.

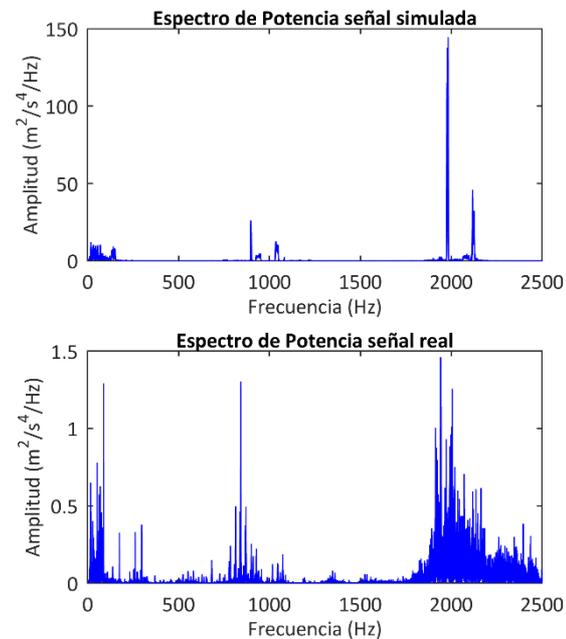


Figura 12. Comparativa de los espectros de frecuencia de la señal simulada y la señal real.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se presenta una metodología general para la implantación del Mantenimiento 4.0 en un tren de alta velocidad, concebido y construido antes del nacimiento de la Industria 4.0. El núcleo de la metodología propuesta es el flujo de información entre los cuatro pilares que la componen: Sistema físico, Gemelo Digital, Infraestructura TIC y Diagnóstico, describiendo las características de cada uno de los pilares y cómo deben relacionarse entre sí.

En el artículo, se han descrito las características básicas del Sistema físico (con todos sus componentes), de la Infraestructura TIC (incluyendo los sensores utilizados y su colocación) y de la diagnosis, que puede ser a corto o largo plazo, en función de las técnicas de tratamiento de la señal utilizadas.

También se ha propuesto un DT del bogie del tren de alta velocidad, el cual consiste en tres modelos interrelacionados entre sí: un modelo 3D CAD (desarrollado en CREO Parametric), un modelo de elementos finitos (en ANSYS) y un modelo multicuerpo (en Universal Mechanism). A partir de estos modelos se pudieron determinar las frecuencias

características del sistema físico real susceptibles de aparecer en el espectro de potencia de las señales vibratorias registradas. Además, esta metodología, aplicada convenientemente, permite estudiar diferentes situaciones de funcionamiento del tren real. Incluso, su aplicación a diferentes tipos de bogies ferroviarios nos permitiría modelar el DT e integrar los ensayos en operación, en banco de bogies para la digitalización del Mantenimiento Predictivo 4.0.

La combinación de los datos obtenidos del DT y las señales vibratorias registradas por los sensores en el tren, cuando éste se encuentra en circulación, permite avanzar en el diagnóstico de la condición del sistema ferroviario. Tras el análisis de algunos de estos datos, se han identificado componentes frecuenciales significativas que se corresponden con fenómenos como el paso por las traviesas, defectos en la vía o el acoplamiento de armónicos de la frecuencia de giro del eje con ciertas frecuencias naturales.

Por último, se ha observado que el modelo multicuerpo representa adecuadamente el comportamiento del tren real y se ha determinado la velocidad crítica del bogie, concluyendo que ésta se encuentra alejada, bastante por encima, de la velocidad de operación del tren.

## 9. Agradecimientos

Esta publicación es parte de los Proyectos de I+D+I MC4.0 PID2020-116984RB-C21 y RMS4.0 PID2020-116984RB-C22, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Los autores también quieren agradecer la financiación otorgada por la UNED a través del proyecto 2022-ETSII-UNED-09.

## 10. Referencias

- [1] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, M. Hoffmann. "Industry 4.0". *Business & Information Systems Engineering*. vol. 6, n.º 4. pp. 239-242. ago. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [2] M. Kans, D. Galar, A. Thaduri. "Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry", en *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, K. T. Koskinen, H. Kortelainen, J. Aaltonen, T. Uusitalo, K. Komonen, J. Mathew, y J. Laitinen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 317-331. doi: 10.1007/978-3-319-27064-7\_30.
- [3] H. E. van Staden, R. N. Boute. "The effect of multi-sensor data on condition-based maintenance policies". *European Journal of Operational Research*. vol. 290, n.º 2. pp. 585-600. abr. 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.08.035.
- [4] M. A. Navas, C. Sancho, J. Carpio. "Disruptive Maintenance Engineering 4.0". *International Journal of Quality & Reliability Management*. vol. 37, n.º 6/7. pp. 853-871. jul. 2020, doi: 10.1108/IJQRM-09-2019-0304.
- [5] R. Sahal, J. G. Breslin, M. I. Ali. "Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case". *Journal of Manufacturing Systems*. vol. 54. pp. 138-151. ene. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.11.004.
- [6] C. Saidy, S. P. Valappil, R. M. Matthews, A. Bayoumi. "Development of a Predictive Maintenance 4.0 Platform: Enhancing Product Design and Manufacturing", en *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*, vol. 166, A. Ball, L. Gelman, y B. K. N. Rao, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1039-1049. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2\_86.
- [7] A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, C. Bil. "Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing". *Journal of Computational Design and Engineering*. vol. 6, n.º 4. pp. 516-526. oct. 2019, doi: 10.1016/j.jcde.2019.02.001.
- [8] W.-H. Lee, K.-H. Lee, J.-M. Lee, B.-W. Nam. "Registration method for maintenance-work support based on augmented-reality-model generation from drawing data". *Journal of Computational Design and Engineering*. vol. 7, n.º 6. pp. 775-787. dic. 2020, doi: 10.1093/jcde/qwaa056.
- [9] M. Zasiadko. "Deutsche Bahn produces heavy spare parts on 3D printer | RailTech.com", *RailTech.com | Online News for the Railway Industry*, 16 de julio de 2019. <https://www.railtech.com/digitalisation/2019/07/16/deutsche-bahn-produces-heavy-spare-parts-on-3d-printer/> (accedido 24 de mayo de 2021).
- [10] M. Karakose, O. Yaman. "Complex Fuzzy System Based Predictive Maintenance Approach in Railways". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 16, n.º 9. pp. 6023-6032. sep. 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2973231.
- [11] G. Lederman, S. Chen, J. H. Garrett, J. Kovačević, H. Y. Noh, J. Bielak. "A data fusion approach for track monitoring from multiple in-service trains". *Mechanical Systems and Signal Processing*. vol. 95. pp. 363-379. oct. 2017, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.03.023.
- [12] M. Takikawa. "Innovation in Railway Maintenance utilizing Information and Communication Technology (Smart Maintenance Initiative)". *Japan Railway & Transport Review*. n.º 67. p. 14. 2016.
- [13] M. Grieves, J. Vickers. "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", en *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, y A. Alves,

- Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- [14] I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga. "Digital Twin for maintenance: A literature review". *Computers in Industry*. vol. 123. p. 103316. dic. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103316.
- [15] "In-Depth Focus: Digital Twins", *Global Railway Review*, vol. 27, n.º 02, p. 19, abril de 2021.
- [16] A. Palmgren, B. Ruley. Ball and roller bearing engineering, Third Edition. Philadelphia, Pa.: SKF Industries Inc, 1959.
- [17] N. E. Huang *et al.* "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis". *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. vol. 454. pp. 903-995. 1998.
- [18] A. Bustos, H. Rubio, C. Castejon, J. C. Garcia-Prada. "Enhancement of chromatographic spectral technique applied to a high-speed train". *Structural Control and Health Monitoring*. vol. 28, n.º 12. p. e2842. sep. 2021, doi: 10.1002/stc.2842.
- [19] D. P. Connolly, G. Kouroussis, O. Laghrouche, C. L. Ho, M. C. Forde. "Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects". *Construction and Building Materials*. vol. 92. pp. 64-81. sep. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042.
- [20] A. Zougari, J. Martínez, S. Cardona. "Numerical models of railway tracks for obtaining frequency response Comparison with analytical results and experimental measurements". *Journal of Vibroengineering*. vol. 18, n.º 2. p. 11. 2016.
- [21] D. Thompson. Railway Noise and Vibration, First Edition. Oxford, UK: Elsevier, 2009. doi: 10.1016/B978-0-08-045147-3.X0023-0.
- [22] M. Melis Maynar. Apuntes de introducción a la dinámica vertical de la vía y a las señales digitales en ferrocarriles: con 151 programas en Matlab, Simulink, Visual C++, Visual Basic y Excel. Toledo: Escuela de Ingenieros de Caminos, 2008.
- [23] Wickens, A. H. Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics, vol. 6. Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger B.V., 2003.
- [24] "ERRI B176/DT 290: B176/3 Benchmark Problem, Results and Assessment.", European Rail Research Institute, Technical Report, 1993.