

ARTÍCULOS

Estudio de la dinámica de ruedas ferroviarias mediante bancos de pruebas y análisis de vibraciones mecánicas

Study of railway wheel dynamics using test benches and mechanical vibration analysis

Gerardo Hurtado-Hurtado

ORCID: 0000-0001-7570-3606, gerardo.hurtado@uaq.mx

Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Luis Morales-Velásquez

ORCID: 0000-0003-1130-7131, luis.morales@uaq.mx

Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río (UAQ Campus SJR)

Juan Carlos Antonio Jáuregui-Correa

ORCID: 0000-0002-8961-103X, jc.jauregui@uaq.mx

Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Tania Elizabeth Sandoval Valencia

ORCID: 0000-0002-2800-4797, tania.sandoval@uaq.mx

Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Recepción: 21/12/24. Aceptación: 06/05/25. Publicación: 22/10/25.

RESUMEN

La dinámica de las ruedas ferroviarias es de suma importancia para la industria nacional, ya que constituye un aspecto del que depende la seguridad y eficiencia del transporte de productos y personas. Para estudiar y probar el desempeño de la dinámica de las ruedas ferroviarias se utilizan bancos de pruebas a escala reducida que reproducen en buena medida el comportamiento de un vehículo real. La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) desarrolla investigaciones a escala reducida para estudiar el deslizamiento y el desgaste entre la rueda y el riel utilizando datos de vibraciones mecánicas. En este artículo se presentan algunos avances del banco de pruebas y se describen algunas de las técnicas para analizar señales de vibración.

ABSTRACT

The dynamics of railway wheels are of utmost importance to the national industry, as they are an element on which the safety and efficiency of transporting goods and people depends. To study and test the performance of railway wheel dynamics, small-scale test benches are used that closely reproduce the behavior of a real vehicle. The Autonomous University of Querétaro conducts small-scale research to study slippage and wear between the wheel and the rail using mechanical vibration data. This article presents some of the advances made by the test bench and describes some of the techniques used to analyze vibration signals.

PALABRAS CLAVE

banco de pruebas, fallas en ruedas ferroviarias, dinámica ferroviaria, monitoreo de vibraciones, análisis de vibraciones

KEYWORDS

test bench, railway wheel failures, railway dynamics, vibration monitoring, vibration analysis

Introducción

Un banco de pruebas ferroviario es una instalación diseñada especialmente para reproducir las condiciones de funcionamiento de los vehículos en campo, pero dentro de un laboratorio. Esto permite un desarrollo rápido de nuevos diseños, pues ofrece una amplia gama de pruebas para lograr el máximo rendimiento, fiabilidad y disponibilidad en el menor tiempo posible. Con un banco de este tipo se puede analizar el desempeño de los componentes fabricados, como la suspensión y la tracción, en diferentes condiciones de funcionamiento. Los más utilizados son los de rodillos, pero existen otras opciones, como la presentada en este trabajo.

Cuando el tren se va moviendo sobre los rieles, ambos componentes, ruedas y rieles, están sometidos a enormes fuerzas en la huella de contacto. Las fuerzas de interacción entre la rueda y el riel definen gran parte del comportamiento dinámico de todo el tren. Estas fuerzas provocan vibraciones en todo el cuerpo del tren, las cuales se pueden examinar mediante técnicas de análisis de señales, en el dominio del tiempo y frecuencia, para encontrar fallas en las ruedas. Entre éstas, las más comunes son la fatiga y el desgaste, las cuales ya se han detectado mediante este tipo de análisis en la literatura (Eadie et al., 2008; Kabo et al., 2010; Wu et al., 2022).

Para estudiar la dinámica de las ruedas, en los laboratorios se emplean bancos de pruebas para experimentar con ellas y estudiar las fallas más comunes, donde se observan los ciclos que soportarán en condiciones de campo, es decir, se investiga su vida útil.

En este artículo se presenta un banco de pruebas a escala reducida 1:20, el cual consiste en un solo vehículo ferroviario de pruebas que corre en un circuito cerrado. Este tipo de banco tiene la ventaja de simular el movimiento real de los trenes dentro de un laboratorio en tramos rectos y curvos. En él se utilizan sensores de vibración y velocidad para monitorear la dinámica de la rueda ante diferentes situaciones, lo cual arroja resultados útiles que pueden ayudar a entender el deterioro de las ruedas. Con este banco se ha logrado analizar la dinámica de la rueda durante el frenado, con distintos coeficientes de fricción, y se planea utilizarlo en el futuro para estudiar la vida útil de las ruedas en pruebas aceleradas de fatiga y desgaste.

Una prueba acelerada es un experimento que permite simular en poco tiempo las condiciones extremas que un componente ferroviario —en este caso, las ruedas— enfrentaría durante años de uso normal. Esto se logra sometiendo las ruedas a cargas, velocidades o entornos más severos de lo habitual, como mayor presión, mayor coeficiente de fricción o ciclos repetitivos intensos. En el caso de las ruedas ferroviarias, estas pruebas nos ayudan a entender cómo funciona el desgaste de manera acelerada, es decir, más rápida.

El artículo presente se estructura de la siguiente manera: en el primer apartado se aborda el tema de la dinámica de la rueda y cómo es influida por las fuerzas con el riel. También, en esta misma sección, se explica más a fondo la importancia de los bancos de pruebas y

cómo es que algunos de ellos se han utilizado para el estudio de la dinámica y las fallas en las ruedas. En el segundo apartado se muestran las características del banco de pruebas de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). En el tercer apartado se muestran algunos resultados que ya se han obtenido con este banco de pruebas, así como algunas herramientas especiales para analizar las señales de vibración. Por último, se presentan las conclusiones de este trabajo.

Dinámica de la rueda

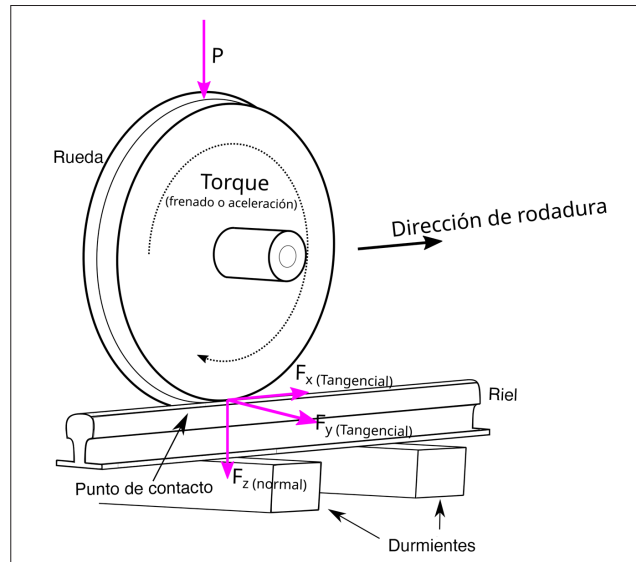
Las fuerzas entre la rueda y el riel, en la huella de contacto, son responsables de la inestabilidad, el desgaste y la fatiga de estos dos componentes. Esto se debe principalmente a que el contacto se da un área muy pequeña —la llamada *huella de contacto*— y a que las fuerzas son muy grandes —las ruedas soportan todo el peso de los vagones—, lo que da lugar a inmensas presiones dentro de los materiales —llamadas *esfuerzos*— y a fallas estructurales tanto en la rueda como en el riel (Iwnicki, 2006). De esta manera, durante el contacto el riel deforma fácilmente la rueda, aunque ésta sea de un material muy duro. Por lo tanto, entender cómo se desgastan las ruedas es clave para mejorar la seguridad del sistema ferroviario y para reducir los costos de mantenimiento.

Las fuerzas de interacción dependen de varios factores, entre ellos, la carga, la manera de frenar y acelerar, el coeficiente de fricción, así como el radio de las curvas en los rieles. En la figura 1 (p. 4) se muestra un diagrama de cómo aparecen las fuerzas de interacción con el riel. En este diagrama las fuerzas normales son perpendiculares a la superficie de contacto y corresponden principalmente al peso del vagón. Las fuerzas tangenciales son paralelas a la huella de contacto y corresponden directamente a la aceleración —tracción— y el frenado. La aceleración y el frenado de la rueda son controlados por el torque del motor.

La magnitud y dirección de las fuerzas en la superficie de la rueda están influenciadas por distintos factores, como la cantidad y el tipo de carga transportada, el coeficiente de fricción en los rieles, la velocidad del tren y el diseño de las curvas en las vías. Por ejemplo, en curvas con radios pequeños, las fuerzas aumentan debido a la mayor necesidad de tracción y al impacto lateral con el riel, lo que intensifica el desgaste y las vibraciones. Asimismo, un coeficiente de fricción bajo, como el que ocurre en condiciones de lluvia o hielo, reduce la capacidad de frenado y puede provocar deslizamientos peligrosos.

Las fuerzas de interacción en la zona de contacto hacen vibrar las ruedas y estas vibraciones se trasladan a todo el tren, lo que repercute en el confort de los pasajeros y en la integridad de los demás componentes del sistema ferroviario. Entre mayores sean las fuerzas en la huella de contacto, mayores serán las vibraciones en el tren. En conclusión, al analizar las vibraciones del tren es posible estudiar las fuerzas de interacción y la dinámica de la rueda de manera indirecta.

Figura 1
Fuerzas de interacción entre la rueda y el riel



Las fuerzas de interacción entre la rueda y el riel son tangenciales y normales, y se deben a cambios de velocidad y dirección en las ruedas y al peso del vehículo, respectivamente. Las fuerzas normales se generan principalmente por el peso del tren, mientras que las tangenciales surgen de las interacciones durante el frenado, la aceleración o los cambios de dirección.

Fuente: Hurtado-Hurtado et al. (2023).

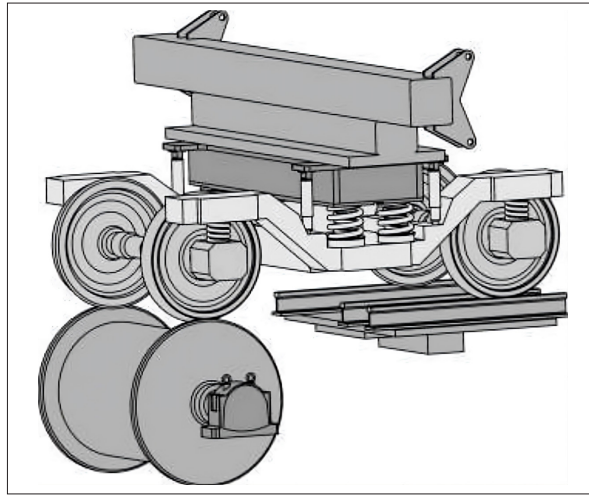
Estudio de la dinámica de las ruedas

Las vibraciones representan una valiosa fuente de información para el estudio de la dinámica de los vehículos ferroviarios y de la rueda. Mediante el uso de sensores colocados en lugares estratégicos, como las ruedas, la suspensión o en otros puntos del tren, es posible detectar fallas analizando estas señales de vibración.

Este tipo de análisis ha permitido desarrollar mejoras en el diseño de ruedas, rieles y suspensión. La introducción de materiales más resistentes al desgaste y la aplicación de técnicas avanzadas de mantenimiento predictivo han sido algunas de estas mejoras. Estos avances prolongan la vida útil de los componentes e incrementan la seguridad de los trenes, lo cual reduce los riesgos asociados a inestabilidades dinámicas o fallas en los componentes estructurales.

Fallas como la fatiga y el desgaste en las ruedas son problemas graves y difíciles de evitar. Desde los orígenes del sistema ferroviario se ha tratado de reducir estas dos fallas para optimizar costos de mantenimiento y uso del transporte de carga. El desgaste de las ruedas es muy común, ya que giran libremente sobre los rieles y tienden a deslizarse cuando hay

Figura 2
Bogie



Bogie montado sobre un banco de rodillos (*roller rig*) para investigar su dinámica. Con este diseño incluso se puede simular el comportamiento en las curvas girando los rodillos del riel en cierto ángulo.

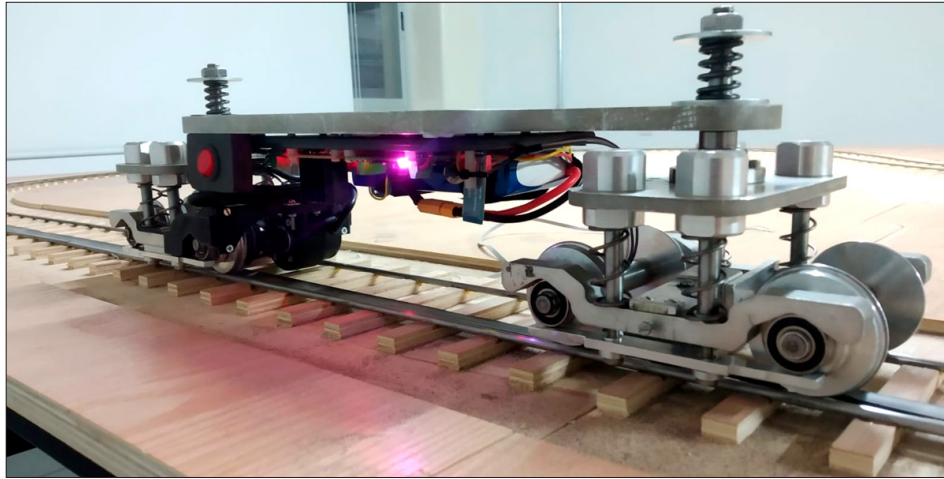
Fuente: Jung et al. (2016).

cambios bruscos de velocidad y dirección. El coeficiente de fricción de las ruedas con el riel es cercano a 0.3 en rieles limpios, pero puede aumentar hasta el doble en climas secos y arenosos, lo cual aumenta también el desgaste y la fatiga (Bruno et al., 2018).

Los ensayos de desgaste y fatiga se llevan a cabo regularmente utilizando bancos de pruebas de discos gemelos (*twin-discs*), donde un disco representa la rueda y el otro el riel (Gallardo-Hernández y Lewis, 2008). Estos ensayos son muy útiles, pues revelan las propiedades mecánicas que es necesario conocer para predecir el desgaste y la fatiga en ruedas y rieles ferroviarios, además de que se pueden contar los ciclos de vida antes del inicio de las fallas y hasta la pérdida total.

En laboratorios y talleres de mantenimiento ferroviario existen bancos de pruebas en tamaño real —conocidos en inglés como *roller rigs*— con los que se hacen diferentes ensayos para detectar anomalías en componentes de la suspensión y de las ruedas. Ambas están sostenidas por una estructura en los vagones, independiente, que se encuentra debajo de ellos, llamada *bogie*. Normalmente, un vagón está montado sobre dos bogies —uno en cada extremo— y cada bogie tiene dos pares de ruedas. En un banco de pruebas de rodillos, las ruedas de los bogies se montan sobre discos de gran diámetro que simulan los rieles (Jung et al., 2016) (figura 2). Los sensores que se utilizan en estos bancos son de vibración y de fuerza, y con ellos se puede saber si los componentes mecánicos requieren un ajuste o necesitan ser reemplazados.

Figura 3
Vehículo sobre los rieles del banco de pruebas



Fuente: Hurtado-Hurtado et al. (2023).

También existen bancos de rodillos a escala reducida, con los cuales se obtienen prácticamente los mismos resultados, pero con algunas ventajas sobre los de tamaño real en cuanto a costo y flexibilidad. Además, permiten realizar experimentos y pruebas de manera rápida y con mayor frecuencia, lo que facilita los ciclos de carga y ajuste en el diseño experimental, al contar con un entorno de pruebas más versátil y adaptable a diferentes necesidades y condiciones experimentales.

Los bancos de rodillos reducidos se utilizan para diferentes propósitos. Para estudiar la estabilidad de un vehículo a diferentes velocidades y cargas externas se hacen mediciones de las aceleraciones y los desplazamientos laterales de las ruedas utilizando sensores especializados, como los sensores de vibración (llamados acelerómetros) y el transformador diferencial de variación lineal (LVDT) (Yoshino et al., 2015). Para medir las fuerzas de contacto entre la rueda y el riel, ciertos modelos de bancos de rodillos utilizan sensores de fuerza directamente en el disco del riel o desde la suspensión (Naeimi et al., 2014).

En un banco de pruebas de rodillos, el vehículo o el bogie no se mueve, y sólo se monitorean las vibraciones y fuerzas mientras unos discos en contacto con las ruedas las hacen girar. Además, los bancos de rodillos se utilizan muy poco para evaluar la tribología de las ruedas y los rieles (Arias-Cuevas et al., 2011), ya que para este propósito son más comunes los ensayos con discos gemelos. Por otro lado, el banco de pruebas mostrado en este artículo es un vehículo a escala que corre sobre una vía ferroviaria cerrada dentro de un laboratorio, lo cual es similar a la operación normal de un tren real, pero en un laboratorio.

Banco de pruebas

El banco de pruebas donde se realizan los experimentos del sistema ferroviario consiste en un vehículo a escala reducida 1:20 que corre sobre un circuito cerrado horizontal, en forma de β . Este banco se encuentra instalado en el Laboratorio de Dinámica y Vibraciones de la UAQ. El proyecto del tren a escala parte de la necesidad de llevar a cabo trabajos de investigación relacionados con el sistema férreo y de una colaboración con el Instituto Federal de Investigación y Ensayos sobre Materiales (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM), ubicado en Berlín, Alemania.

Vehículo ferroviario a escala

El vehículo ferroviario de pruebas es un solo vagón soportado por dos bogies, donde el bogie trasero proporciona el torque y la tracción, gracias a un motor conectado a la rueda. El vehículo fue diseñado a una escala reducida de 1:20, cuyas dimensiones son $12 \times 50.6 \times 10$ cm (ancho $\times$ largo $\times$ alto), y tiene una masa de 4.4 kg. El cuerpo del vehículo está montado sobre los bogies por una suspensión rígida de ocho resortes. En la parte media se encuentran los circuitos de control motriz y de los sensores, así como el almacenamiento de datos. En la figura 3 (p. 6) se presenta el vehículo montado sobre los rieles del banco de pruebas. Hurtado-Hurtado y colaboradores (2023) ofrecen detalles más técnicos sobre el funcionamiento de este vehículo ferroviario.

Sistema de adquisición de datos

El sistema de monitoreo y control del vehículo incluye una tarjeta de control FPGA (*field programmable gate array*), sensores y un motor. El FPGA es un componente electrónico, parecido a una computadora, que se programa para recibir órdenes y ejecutar instrucciones. Dentro del FPGA se hacen cálculos matemáticos complejos y se controla el flujo de información de los sensores para su almacenamiento en una memoria. En este caso, la FPGA recibe instrucciones y configuraciones desde una aplicación de intercambio de datos (*bluetooth*) en el celular, para controlar la velocidad del vehículo y enviar otros comandos, como el almacenamiento de datos en una tarjeta micro SD, similar a la de una cámara. Estos dispositivos se encuentran en la caja de control, en la parte media del vehículo de pruebas, que de igual forma contiene los sensores para el monitoreo de las vibraciones del vehículo.

También es importante medir la velocidad de la rueda para calcular su deslizamiento sobre el riel. Para ello se utiliza un dispositivo llamado *codificador (encoder) rotatorio incremental*, el cual está conectado directamente en la rueda. La velocidad lineal del vehículo de pruebas es medida por otro dispositivo llamado *sensor óptico infrarrojo*. En la figura 4 (p. 8) se muestra cómo están interconectados los componentes electrónicos de control y monitoreo en el sistema de adquisición.

Figura 4
Diagrama de interconexión

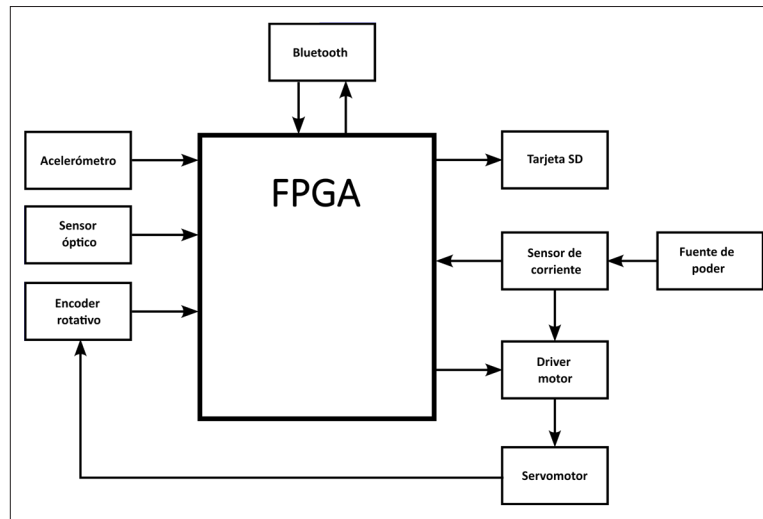


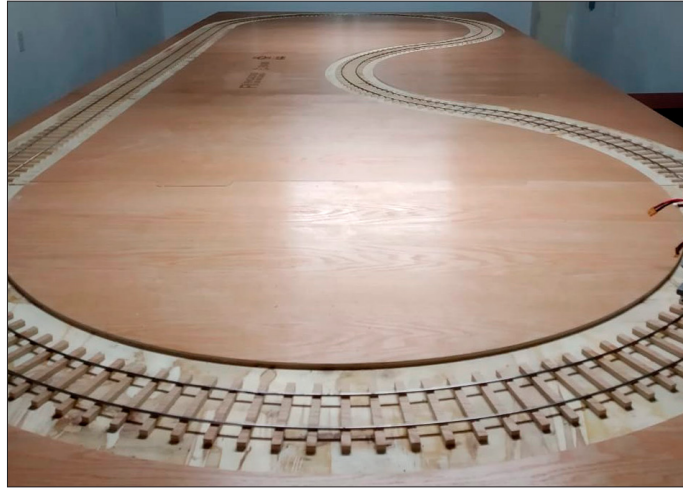
Diagrama de interconexión de los principales módulos del control y adquisición de datos del vehículo. La tarjeta FPGA recibe instrucciones desde el módulo de intercambio de datos (*bluetooth*) para realizar todas sus tareas. Las flechas hacia la FPGA indican la dirección del flujo de información desde los sensores, mientras que las que salen de ella son señales de control y datos.

Fuente: Hurtado-Hurtado et al. (2023).

Los detalles más técnicos de este sistema se mencionan a continuación:

- Dentro del FPGA está programado un microcontrolador embebido en arquitectura RISC de 16 bits, diseñado para ejecutar instrucciones simples en un ciclo de reloj, el cual optimiza la velocidad y la eficiencia energética. El set de instrucciones es propio de este sistema. Estos son las principales características técnicas del FPGA:
 - Memoria interna de 1 kB (caché de datos) y 1 kB (caché de instrucciones).
 - Memoria externa de 1 MB para datos y 128 kB para instrucciones. Almacenan programas y variables fuera del *chip* principal. La tarjeta FPGA también tiene memoria Flash de 16 MB, donde guarda el programa base (*firmware*), configuraciones de la FPGA y datos del usuario de forma no volátil.
 - La tarjeta de control contiene periféricos y unidades especializadas, como una unidad de punto flotante (FPU) de 32 bits, para una mayor precisión en las operaciones, y acceso directo a memoria (DMA).
- Los sensores que se utilizan en el sistema tienen las siguientes características técnicas:
 - El acelerómetro es de tipo MEMS y mide aceleraciones en tres ejes en unidades de g (9.81 m/s^2). Este acelerómetro es un modelo LSM6DS3, que llega a detectar

Figura 5
Vista panorámica de la mesa del banco de pruebas



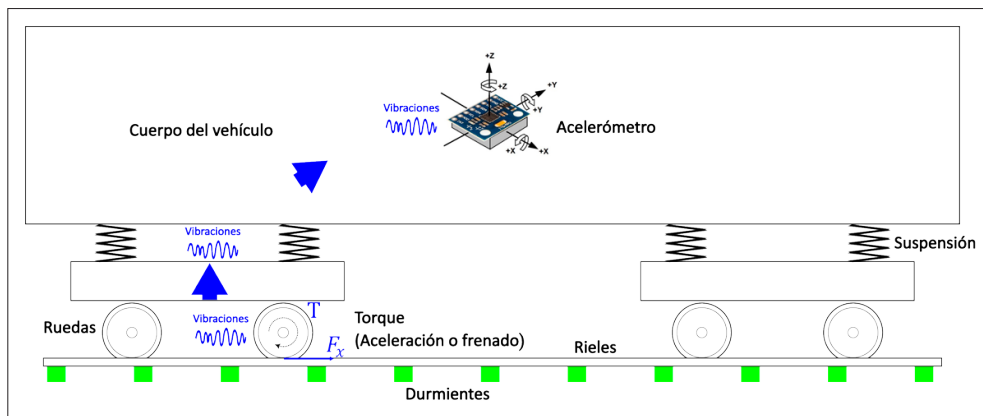
La vía es un circuito cerrado con forma de β .

Fuente: elaboración propia.

hasta $\pm 4 g$ en las tres direcciones. En este mismo chip está integrado el giroscopio, que mide también en los tres ejes, con una sensibilidad de ± 143 $^{\circ}/s$ en cada dirección.

- El sensor infrarrojo es un modelo TCRT5000, sensible a las variaciones blanco/negro, por lo que resulta muy útil para utilizarse como sensor de velocidad lineal.
- El codificador (*encoder*) rotativo es un modelo DC5-24V 600, con una resolución de 600 pulsos por revolución y dos canales para identificar el sentido de giro.
- El sensor de corriente es del tipo Hall, modelo ACS712. La máxima amplitud de corriente que se puede medir es hasta 20 A.
- Los detalles técnicos de los demás componentes son los siguientes:
 - El módulo de intercambio de datos (*bluetooth*) para enviar las instrucciones de manera inalámbrica es un modelo HC-05 y utiliza el protocolo UART RS232.
 - La batería para alimentar el sistema es una LiPo de 4000 mAh, de cuatro celdas (14.8 V).
 - El servomotor para mover el vehículo es un modelo Pololu 37D con motorreductor, motor de corriente continua (DC) 12 V, 5.5 A y 12 W de potencia. La motorreducción de 19:1 le da la capacidad de generar un torque de 8.5 kg-cm, a una velocidad de 530 RPM.
 - El motor es controlado por un puente H modelo L298N, con capacidad de 2 A y 30 V.

Figura 6
Origen de las vibraciones al frenar o acelerar



Las fuerzas tangenciales (fricción durante el frenado) viajan de las ruedas hacia el cuerpo del vehículo en forma de vibraciones y son capturadas por el acelerómetro y el giroscopio. La trayectoria de las vibraciones está representada por las flechas azules.

Fuente: elaboración propia.

Vía

La vía de pruebas se encuentra sobre una mesa construida con cuatro hojas de triplay, posicionadas sobre una estructura de acero con niveladores en el suelo. Los durmientes de la vía están maquinados en la superficie de la hoja de triplay, como se puede ver en la figura 5 (p. 9). Los rieles son barras de acero redondas con un diámetro de 5 mm y están pegados sobre los durmientes con resina epóxica. Las dimensiones de la mesa son $2.36 \times 5.68 \times 0.92$ m (ancho $\times$ largo $\times$ alto).

Análisis de las señales de vibración

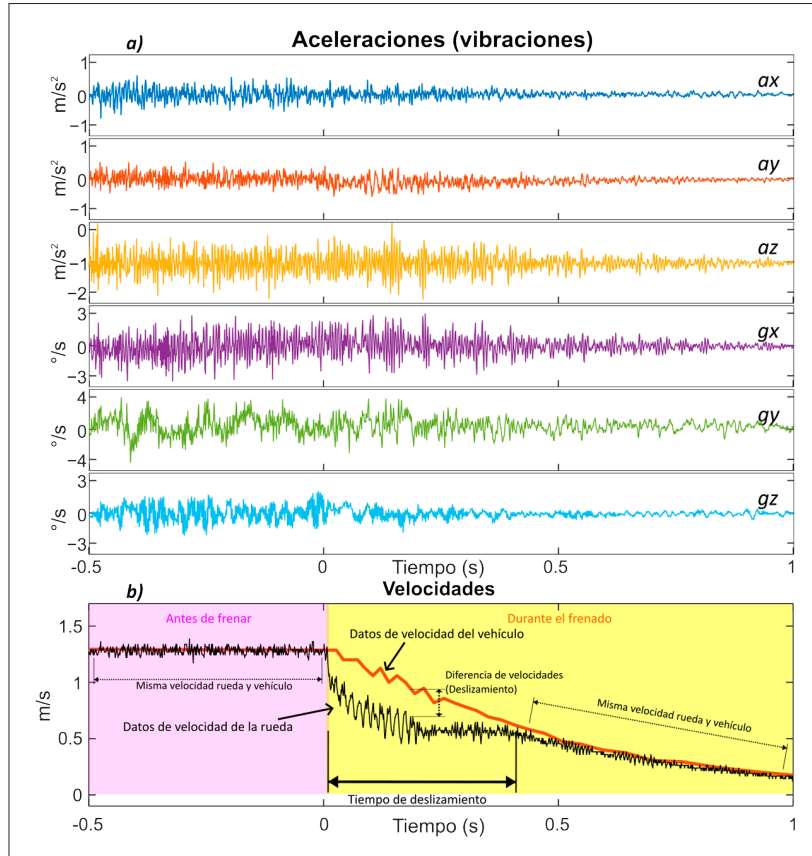
Señales de vibración

Las señales de vibración contienen información sobre los movimientos dinámicos y oscilatorios de las ruedas. Estas señales se caracterizan por parámetros como la frecuencia y la amplitud, que reflejan el comportamiento de este sistema bajo distintas circunstancias. Las fallas, como desequilibrios, desalineaciones, desgaste o grietas, alteran las propiedades físicas de todo el tren-sistema y generan patrones únicos en las señales de vibración.

Las señales que se presentan a continuación provienen de experimentos de frenado y deslizamiento en las ruedas. Las vibraciones del cuerpo del vehículo se ven afectadas por las fuerzas tangenciales y normales que se generan en las superficies de contacto con el riel

Figura 7

Señales capturadas por los sensores del banco de pruebas



a) Señales del acelerómetro y el giroscopio; b) Señales de velocidad de la rueda (línea negra) y del vehículo (línea roja). En estas gráficas, el tiempo $t = 0$ s indica el momento en que el vehículo frena.

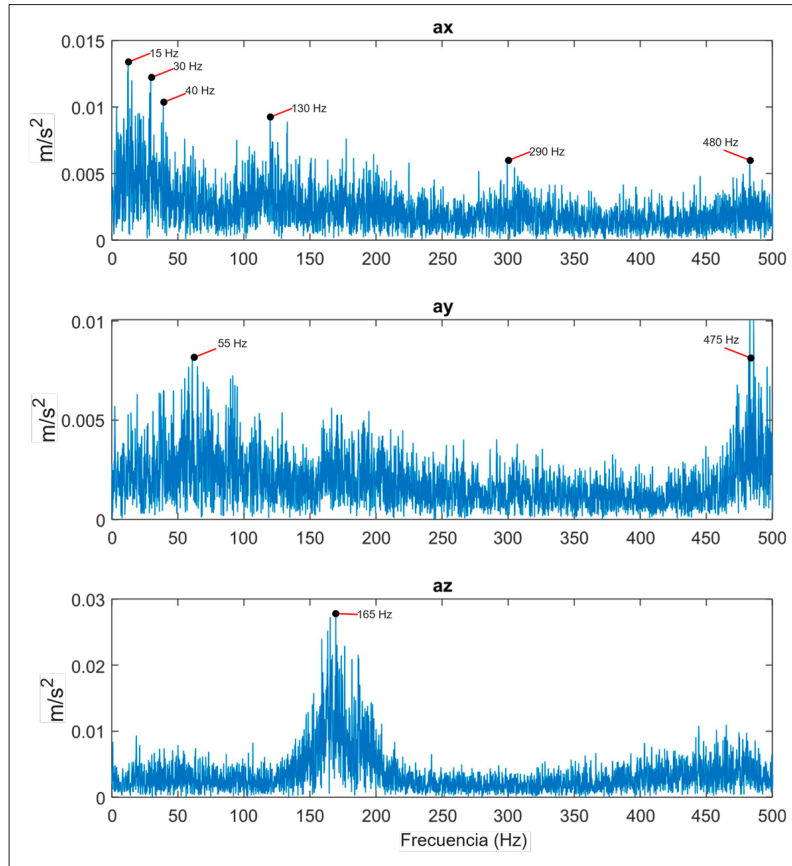
Fuente: Hurtado Hurtado (2023).

al momento de frenar o acelerar. El monitoreo de las oscilaciones en el cuerpo del vehículo hace posible el estudio de estas fuerzas a través del análisis de vibraciones (figura 6, p. 10). Incluso es posible detectar los cambios en el coeficiente de fricción a través de las vibraciones, lo cual ya se ha reportado en estos experimentos (Hurtado Hurtado, 2023).

El banco de pruebas tiene ocho señales de salida con las que se puede estudiar la dinámica de la rueda y del vehículo. Estas señales, mostradas en el gráfico de la figura 7, son:

- a_x aceleración longitudinal
- a_y aceleración lateral
- a_z aceleración vertical
- g_x giro en el longitudinal

Figura 8
Frecuencias obtenidas con FFT en las diferentes direcciones del vehículo de pruebas



Fuente: elaboración propia.

g_y giro en el lateral

g_z giro en el vertical

Velocidad de la rueda

Velocidad del vehículo

Las aceleraciones y los giros muestran cómo vibra el vehículo en diferentes situaciones. Aquí se ven algunas perturbaciones de los rieles —los puntos donde se une un riel con el otro— y también cuando la rueda frena o acelera. En la lectura del codificador rotativo (*encoder*) se pueden ver las oscilaciones de la rueda al frenar, y estas mismas oscilaciones se encuentran en las aceleraciones.

En la figura 7 (p. 11) se puede ver el deslizamiento de la rueda sobre el riel, si se compara la señal de velocidad del vehículo con la velocidad de la rueda. Este deslizamiento depende de factores como el coeficiente de fricción en las ruedas, la velocidad máxima antes

de frenar y la manera de frenar. Las frecuencias que aparecen en la señal de velocidad de la rueda son las mismas que se observan en las vibraciones del vehículo, por lo cual se entendió que es posible monitorear las fuerzas de la rueda analizando la dinámica del vehículo.

Análisis de señales

Las señales de vibración se analizaron con técnicas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Las técnicas estadísticas y de análisis de señales en tiempo y frecuencia son herramientas poderosas para detectar patrones de fallas en las ruedas a partir de vibraciones. Cada técnica tiene su propósito y puede aportar información complementaria sobre las dinámicas de este sistema. A continuación se describen algunas de las técnicas más habituales que se han aplicado a las señales de vibración para encontrar patrones en la dinámica de la rueda, las cuales se pueden utilizar para detectar si las ruedas tienen alguna falla.

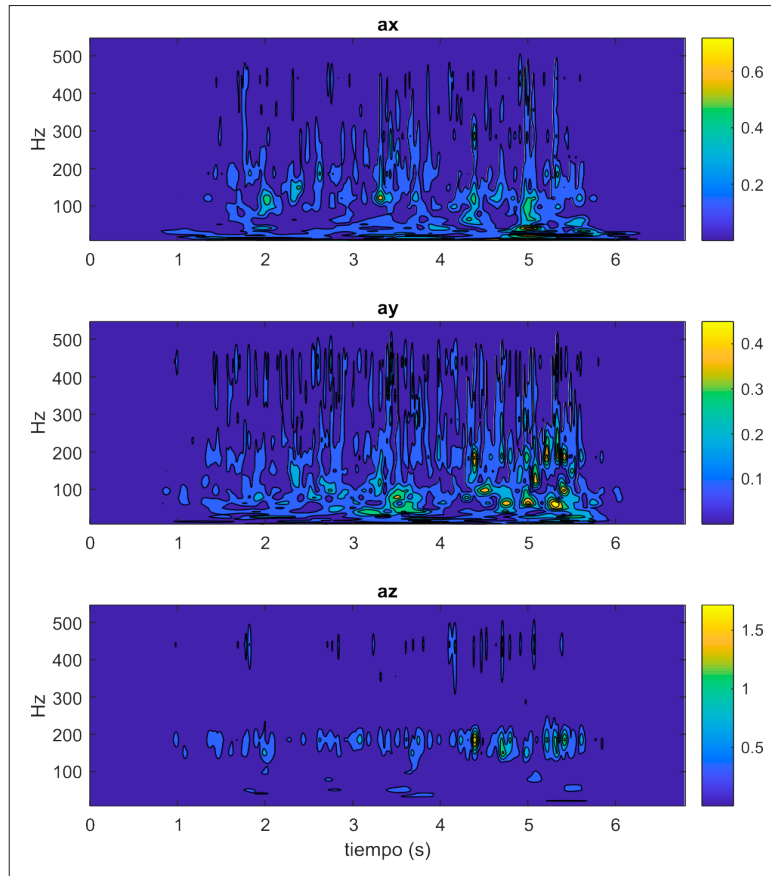
Técnicas estadísticas. En el análisis estadístico de señales de vibración se han utilizado técnicas como RMS (valor cuadrático medio), factor de cresta y curtosis, pues permiten identificar patrones asociados a fallas en las ruedas. El RMS mide la energía total de la señal, lo que ayuda a monitorear condiciones generales de los fenómenos y detecta incrementos en la vibración relacionados con desgaste, desalineaciones o desequilibrios. El factor cresta, definido como la relación entre el valor pico de la señal y su RMS, es útil para identificar eventos transitorios o impactos localizados, como grietas en las ruedas e incluso problemas en los rieles. Por su parte, la curtosis mide el grado de *pico* en la distribución de amplitudes y es especialmente valiosa para detectar señales no estacionarias o vibraciones impulsivas asociadas a defectos emergentes, como fisuras en la superficie o deformaciones localizadas.

En general, estas técnicas identifican comportamientos generales y eventos específicos, lo cual ayuda a clasificar las ruedas como normales o con defectos.

Técnicas en el dominio de la frecuencia. El análisis de señales de vibración mediante transformadas, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Wavelet Continua (CWT), es fundamental para detectar fallas en muchos sistemas dinámicos. La FFT separa la señal en sus componentes de frecuencia, lo que permite identificar patrones periódicos asociados a desequilibrios, desalineaciones o resonancias, que suelen manifestarse como picos en frecuencias específicas. La FFT es particularmente útil cuando se requiere analizar señales estacionarias, es decir, donde las frecuencias principales no cambian con el tiempo.

En la figura 8 (p. 12) se muestra un ejemplo de las componentes de frecuencia obtenidas al analizar las señales del acelerómetro. En un espectrograma como éste, el eje horizontal muestra las frecuencias y el eje vertical las amplitudes de estas frecuencias. En los espectrogramas de la figura 8 se puede ver que las frecuencias principales en la aceleración a_x son 15, 30, 40,

Figura 9
Análisis de tiempo y frecuencia con la CWT



Las frecuencias obtenidas mediante el análisis tiempo-frecuencia con la CWT en diferentes direcciones del vehículo de pruebas.

Fuente: elaboración propia.

130, 290 y 480 Hz, mientras que en a_y son 55 y 475, y en a_z 165 Hz. Los cambios en las amplitudes o la aparición de nuevas frecuencias suelen indicar defectos, como desequilibrios, desalineaciones o irregularidades periódicas en las ruedas.

La CWT, una técnica tiempo-frecuencia, también proporciona una visión detallada de cómo las frecuencias de la señal, distribuidas a lo largo del tiempo, permiten saber el instante en que ocurren ciertas frecuencias. Asimismo, esta técnica permite analizar señales no estacionarias, es decir, con variaciones abruptas, como las que se obtienen de la dinámica ferroviaria. Esto es especialmente relevante para detectar eventos transitorios, como impactos con los rieles o irregularidades que empiezan a aparecer en las ruedas, lo cual proporciona información para caracterizar defectos emergentes.

En la figura 9 (p. 14) se muestra el resultado del análisis con la CWT de las señales de vibración obtenidas con el acelerómetro. En esta imagen, el eje horizontal representa el tiempo, el cual indica cómo evolucionan las vibraciones en momentos específicos, mientras que el eje vertical muestra la frecuencia, es decir, cuántas veces por segundo ocurre un evento vibratorio. Los colores en esta imagen representan la magnitud de las frecuencias: los cálidos (rojo y amarillo) indican mayor energía, mientras que los fríos (azul y verde) representan menor energía; también se pueden comparar con la banda de colores del lado derecho de cada gráfica.

Al comparar las figuras 8 y 9 (pp. 12 y 14) se puede ver que aparecen las mismas frecuencias pero se hacen más intensas durante el frenado.

En el caso de las vibraciones de las ruedas ferroviarias, estas técnicas en el dominio de las frecuencias permiten identificar fallas, como el desgaste irregular y grietas en la superficie de las ruedas, al analizar las vibraciones generadas en el vehículo durante la interacción entre la rueda y el riel, lo cual facilita la detección temprana de fallas y el mantenimiento predictivo.

Conclusiones

En el presente trabajo se describió un banco de pruebas para el estudio de la dinámica de las ruedas ferroviarias, además de las características del banco, como el sistema de control y los sensores. Se mostraron también las señales de salida que se han obtenido en experimentos de recorrido en el circuito y durante el frenado, y las técnicas más comunes para analizar las señales y encontrar anomalías en las ruedas. Todo esto es muy importante, ya que las señales de vibración actúan como una *huella digital* del estado del sistema, lo que facilita el mantenimiento predictivo y mejora la confiabilidad operativa de los trenes.

Se valora la posibilidad de utilizar estas señales de vibración en proyectos en los que se incluyen algoritmos de inteligencia artificial para estudiar el comportamiento de las ruedas, no sólo durante el frenado y la aceleración, sino también cuando se mueven en las curvas.

Referencias

- Arias-Cuevas, O., Z. Li, Z. y R. Lewis, R. (2011). A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel-rail contact. *Wear*, 271(1-2), 14-24, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.050>
- Bruno, L., Horvat, M. y Raffaele, L. (2018). Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177, 340-365. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610518301442>
- Eadie, D. T., Elvidge, D., Oldknow, K., Stock, R., Pointner, P., Kalousek, J. y Klauser, P. (2008). The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear*, 265(9-10), 1222-1230. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.029>
- Gallardo-Hernández, E. A. y Lewis, R. (2008). Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear*, 265(9-10), 1309-1316. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.020>
- Hurtado Hurtado, G. H. (2023). *Respuesta dinámica de los vehículos ferroviarios derivada del coeficiente de fricción rueda-riel*. [Tesis de doctorado, UAQ]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/8953>
- Hurtado-Hurtado, G., Morales-Velázquez, L., Otremba, F. y Jáuregui-Correa, J. C. (2023). Railcar dynamic response during braking maneuvers based on frequency analysis. *Applied Sciences*, 13(7), 4132. <https://doi.org/10.3390/app13074132>
- Iwnicki, S. (ed.) (2006). *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press. <http://www.iqytechnicalcollege.com/Handbook%20of%20Railway%20Vehicle%20Dynamics.pdf>
- Jung, H., Munker, T., Kampmann, G., Rave, K., Fritzen, C.-P. y Nelles, O. (2016, July). A novel full-scale roller rig test bench for SHM concepts of railway vehicles [ponencia]. Presentada en el XIII European Workshop On Structural Health Monitoring, 5 al 8 de julio, Bilbao (pp. 5-8). https://www.ndt.net/events/EWSHM2016/app/content/Paper/331_Jung.pdf
- Kabo, E., Ekberg, A., Torstensson, P. T. y Verneresson, T. (2010). Rolling contact fatigue prediction for rails and comparisons with test rig results. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(4), 303-317. <https://doi.org/10.1243/09544097JRR343>
- Naeimi, M., Li, Z. y Dollevoet, R. (2014). Scaling strategy of a new experimental rig for wheel-rail contact. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8(12), 19901787-19971794. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:6bb36d62-07ed-49f5-9176-c9c5d8e2dfa1>
- Wu, Y., Wang, J., Liu, M., Jin, X., Hu, X., Xiao, X. y Wen, Z. (2022). Polygonal wear mechanism of high-speed wheels based on full-size wheel-rail roller test rig. *Wear*, 494, 204234. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204234>
- Yoshino, H., Hosoya, T., Yabuno, H., Lin, S. y Suda, Y. (2015). Theoretical and experimental analyses on stabilization of hunting motion by utilizing the traction motor as a passive gyroscopic damper. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(4), 395-401. <https://doi.org/10.1177/0954409715569860>