



ANÁLISIS DEL DESGASTE DE RUEDAS EN LA TRACCIÓN FERROVIARIA

Análisis de seguimiento

Conocer el desgaste de las ruedas ferroviarias es un elemento clave para hacer predicciones precisas de la degradación y las necesidades de mantenimiento. Swiss Federal Railways (SBB) y ABB han lanzado conjuntamente una actividad de recogida y análisis de datos para conocer mejor el desgaste de las ruedas y la degradación de los juegos de ruedas de las locomotoras Re 460.

—
Andrea Cortinovis,
Lucas Schmid,
Christian Huber
ABB Traction
Turgi, Suiza

andrea.cortinovis@
ch.abb.com
lucas.schmid@
ch.abb.com
christian.huber@
ch.abb.com

Robert Birke
Corporate Research
Baden-Daettwil,
Suiza

robert.birke@
ch.abb.com

Para transportar pasajeros o carga, una locomotora debe aplicar una fuerza de tracción. Esta fuerza solo puede ejercerse si las ruedas se «agarran» al carril. En otras palabras, la fuerza de tracción que acelera el tren debe coincidir con la fuerza de adherencia entre la rueda y el carril. Si la fuerza de tracción ejercida excede del límite de adherencia en condiciones normales, esta adherencia se pierde, las ruedas giran sin agarrar el riel y el tren no puede acelerar. Este fenómeno se conoce como resbalamiento de las ruedas. El resbalamiento de las ruedas está determinado por múltiples factores, como el peso que presiona hacia abajo en la interfaz rueda-carril, la pendiente del carril, el comportamiento del conductor de una locomotora y las condiciones ambientales (como la humedad, las condiciones meteorológicas, la contaminación de la superficie del raíl) limitando el esfuerzo de tracción que se puede utilizar.

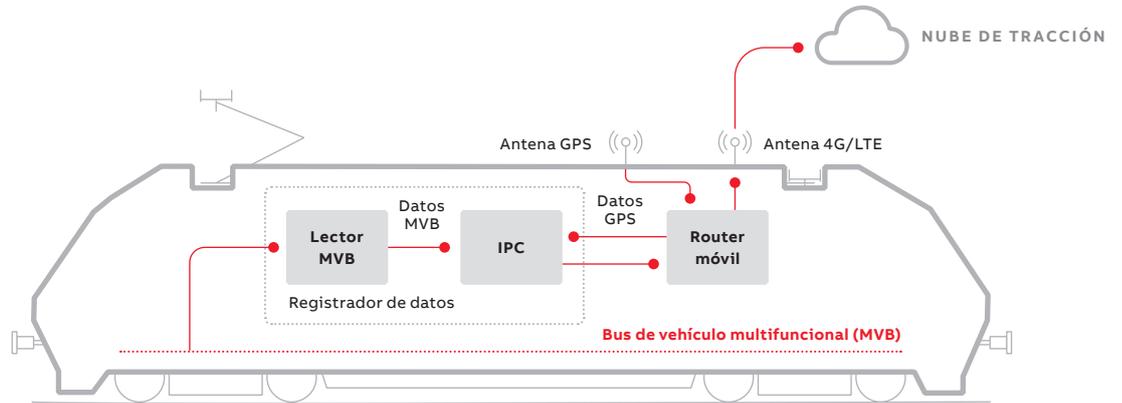
El resbalamiento de las ruedas no es solo una molestia, sino también una causa de desgaste y degradación tanto del carril como

—
El proyecto buscaba optimizar el tren de transmisión y el control de la adhesión.

de las ruedas. El desgaste y la degradación también se ven afectados por otros aspectos de la interacción entre el tren y la vía, como las oscilaciones torsionales y las fuerzas de aceleración y frenado.

Interacción entre rueda y carril

El rendimiento, la seguridad, los costes de explotación y la fiabilidad de las operaciones ferrovia-



01

— 01 Recogida de datos de la locomotora Re460.

— 02 Flujo de datos desde datos sin procesar hasta el aprovechamiento del cliente.

rias dependen en gran medida de la interacción mecánica en la interfaz entre la rueda y el carril [1]. En el artículo de referencia [2] se ofrece una descripción detallada del pronóstico y la gestión del estado. En las últimas décadas, numerosos proyectos de investigación han contribuido a

Las interacciones rueda-carril se ven significativamente influidas por las cambiantes condiciones de adherencia.

conocer las propiedades mecánicas de las ruedas y los raíles, el mantenimiento de las ruedas y los raíles, las propiedades mecánicas de los bogies (rigidez, etc.) y las propiedades de amortiguación de las almohadillas de carril.

Sin embargo, en la práctica, las interacciones rueda-carril en la superficie de contacto son muy complejas y se ven influidas significativamente por las cambiantes condiciones de adherencia, que provocan interacciones con el tren de potencia, especialmente en los ejes de

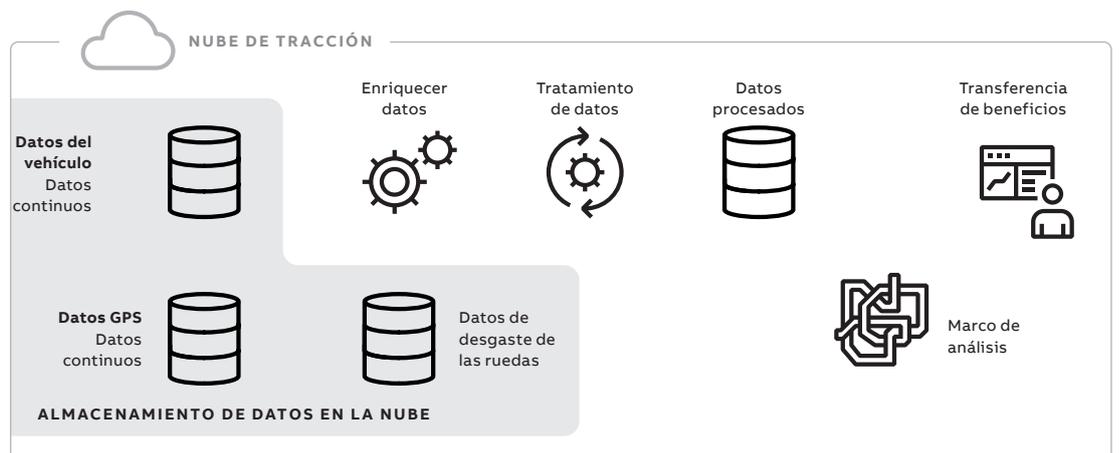
accionamiento. Es necesario conocer más en profundidad estos efectos para poder optimizar el tren de transmisión y el control de la adherencia y mejorar el sistema en general.

Alianza

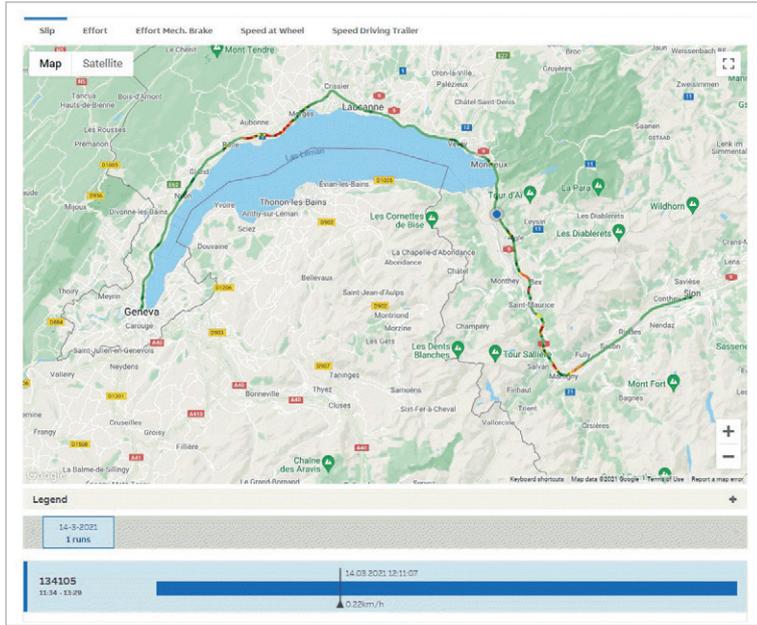
Swiss Federal Railways (SBB) y ABB colaboraron en una actividad de cocreación con digitalización para obtener un mejor conocimiento y una nueva percepción basada en datos del desgaste de las ruedas en la flota de Re 460 [3].

Las 119 locomotoras de clase Re 460 se construyeron originalmente en la década de los 90 con equipos eléctricos suministrados por ABB [4]. La flota ha sido objeto recientemente de un importante programa de remodelación, implementado conjuntamente por SBB y ABB, que ha incluido la instalación de nuevos convertidores de última generación [5].

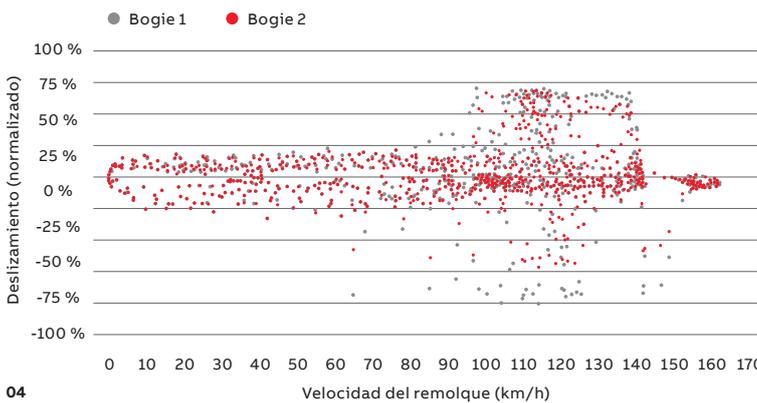
Entre los campos de investigación incluidos en esta actividad se encuentran el comportamiento del control de tracción en condiciones de adherencia difíciles, y el uso del freno de eslinga, el freno de emergencia y los areneros. En relación con la remodelación de las Re 460, se estudió con especial atención las oscilaciones torsionales de rodadura de los juegos de ruedas [6].



02



03



04

Recogida de datos

Las cinco locomotoras de clase Re 460 utilizadas en este estudio estaban equipadas con un PC industrial compatible con ferrocarriles (IPC) que leía datos del bus de vehículos multifunción (MVB) a través de un lector MVB →01.

El lector MVB está configurado para leer todas las señales relevantes del contacto rueda-carril a una frecuencia de muestreo de 20 Hz y transmitir las al IPC. Las señales captadas incluyen, por ejemplo, el esfuerzo de tracción, la presión de aire en el conducto de freno principal y los cilindros del freno, la intensidad de las oscilaciones torsionales de los ejes, la velocidad de giro de los cuatro ejes y la velocidad del vehículo.

Un segundo canal de datos capta la posición geográfica de la locomotora cada segundo. Estos datos los proporciona un router móvil, un componente instalado de serie en las locomotoras Re 460. El mismo router también proporciona un canal seguro

de transmisión de datos entre el IPC y la Traction Cloud a través de la red móvil. Esta conexión se utiliza para transmitir los datos recogidos →02.

Convertir datos en conocimiento

Después de la ingestión de datos, la Traction Cloud procesa y almacena los datos utilizando pipelines de datos. Las tareas típicas de las pipelines de datos son la fusión de fuentes de datos (por ejemplo, datos de desgaste de las ruedas offline), la agrega-

El portal web permite identificar incidentes o situaciones inusuales o especiales.

ción de datos, el cálculo de diferentes estadísticas y la realización de análisis de datos. Las ventajas para el cliente se transfieren en última instancia mediante visualizaciones, generación de informes e interfaces de datos, y sirven de base para talleres de análisis en una configuración de creación conjunta.

Un ejemplo de esta transferencia de beneficios fue el desarrollo de un portal web personalizado para visualizar los datos procesados que ofrece una visión general rápida del uso histórico de las locomotoras. Además, permite identificar incidencias o situaciones inusuales o especiales, de forma que puedan ser analizadas con mayor detalle.

Más allá de mostrar las señales más importantes en el dominio del tiempo, el portal web ofrece una selección de diferentes vistas para inspeccionar los datos. Así, pueden mostrarse dos señales en un diagrama de dispersión (como una nube de puntos) o en un histograma bidimensional como una distribución de frecuencias. El portal también puede superponer datos en un mapa geográfico, permitiendo identificar ubicaciones en las que, por ejemplo, existe un resbalamiento excesivo de las ruedas →03.

El portal web ofrece diferentes funciones de filtrado para centrarse en solo un subconjunto de datos. Por ejemplo, pueden mostrarse los datos de uno o de ambos bogies. Además, el usuario puede filtrar los datos por configuración del tren. Por ejemplo, trayectos en los que la locomotora empuja en lugar de tirar con un bogie específico delante.

Caso práctico: condiciones de adherencia difíciles

El siguiente ejemplo ilustra cómo se utiliza el portal web para comprender mejor el comportamiento de la locomotora en determinadas

—
03 Resbalamiento rueda-rail por posición GPS. Los valores de resbalamiento bajos se visualizan en verde y los altos en rojo.

condiciones. En →03, se muestra el resbalamiento rueda-carril en color en el mapa para un día lluvioso en el tramo de ruta entre Sion y Ginebra (Suiza).

—
04 Diagrama de dispersión del resbalamiento de las ruedas frente a la velocidad del vehículo en un trayecto con condiciones de adherencia difíciles.

Los datos revelan que hubo condiciones de adherencia difíciles en tramos más largos de la línea (marcados con rojo y naranja que indican condiciones más resbalosas). El usuario puede visualizar el mismo recorrido en un diagrama de dispersión, seleccionando cualquier combinación de señales. Por ejemplo, en →04, la velocidad se representa gráficamente en comparación con el resbalamiento de las ruedas. El diagrama muestra que el mayor resbalamiento de las ruedas en este trayecto se produjo principalmente a velocidades más altas. Además, los datos muestran que el bogie delantero, «Bogie 1», tiende a tener un resbalamiento de las ruedas mayor que el siguiente bogie. Este efecto puede observarse con frecuencia en condiciones de adherencia difíciles. El control de tracción optimiza la tracción total de la locomotora al inducir un mayor resbalamiento de las ruedas en el bogie principal, acondicionando así la superficie del carril para el segundo bogie.

—
05 Visualización comparativa de dos trayectos en la misma línea con condiciones de adherencia difíciles (izquierda) y condiciones secas (derecha).

—
06 La herramienta permite realizar comparaciones estadísticas del funcionamiento de las diferentes locomotoras para las que se recogieron datos.

En →05 se muestra otra comparación interesante. Aquí, la herramienta muestra dos trayectos en la misma línea ferroviaria. El gráfico

Optimizar el desgaste de las ruedas constituye un importante potencial de ahorro de costes

de la izquierda se registró en condiciones de adherencia difíciles, y el de la derecha en condiciones favorables.

Estadísticas

Además de información detallada, la herramienta también puede utilizarse para generar resúmenes rápidos. Para ello se utilizan dos tipos de estadísticas: estadísticas generales, que presentan resúmenes generales de las locomotoras, y estadísticas geográficas, que agregan datos con respecto a las coordenadas GPS.

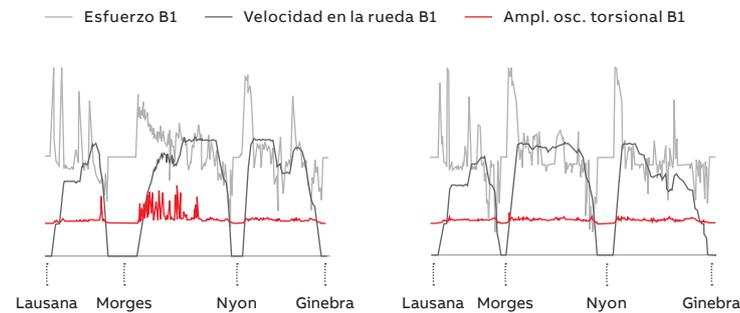
Las estadísticas generales facilitan la comparación de datos procedentes de distintas locomotoras. Ofrece la visualización de datos y eventos en diferentes escalas de tiempo, como mensualmente o anualmente. Por ejemplo, los histogramas de horas y kilómetros de funcionamiento revelan información básica sobre el uso de las diferentes locomotoras →06.

Estos datos también pueden combinarse para, por ejemplo, examinar diferentes clases de velocidad de funcionamiento.

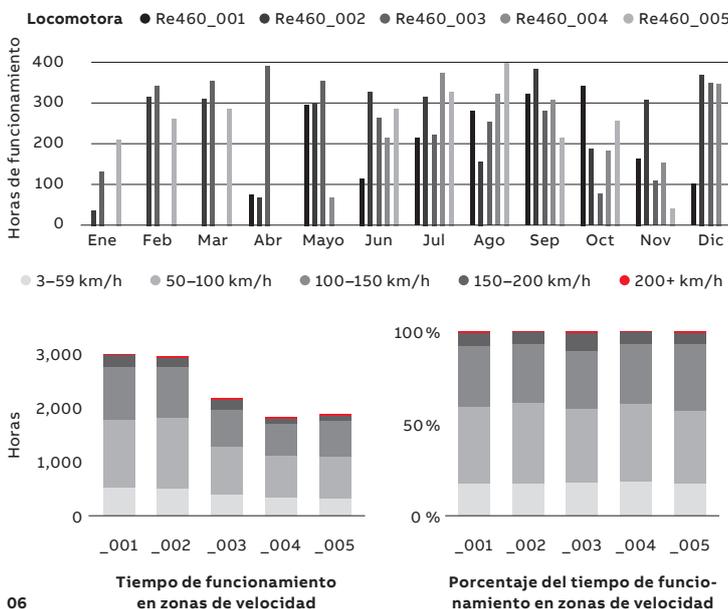
Las geoestadísticas se muestran en forma de gráficos circulares en un mapa, en los que el tamaño del gráfico indica el valor total de cualquier parámetro dado y los sectores del gráfico muestran los valores por coordenadas GPS. Esto permite interpretar los datos de la locomotora en relación con ubicaciones específicas. Puede identificar, por ejemplo, áreas en las que hay muchos areneros →07, o muchas oscilaciones torsionales. También puede obtenerse una correlación con los datos meteorológicos, por ejemplo, el resbalamiento causado por las condiciones de humedad de las vías.

Desgaste de las ruedas

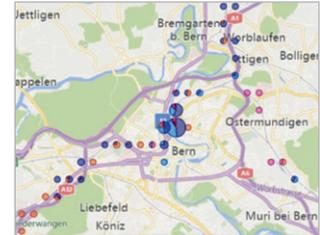
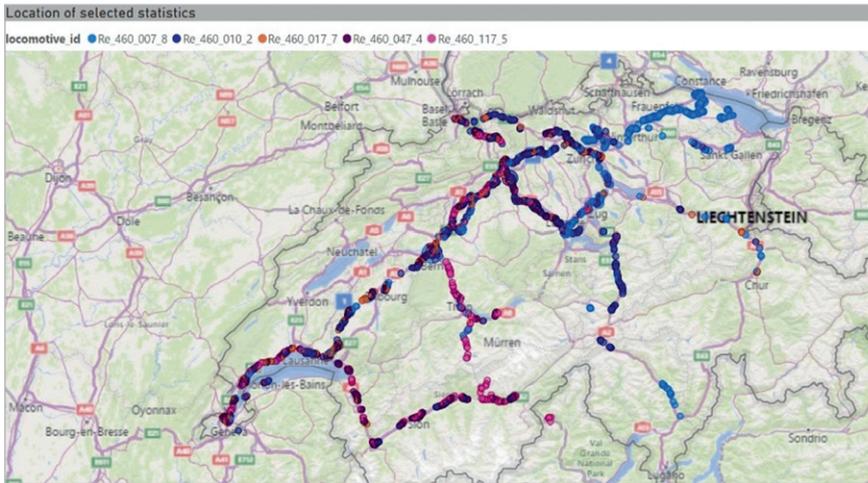
Se comprueba periódicamente el desgaste de las ruedas para determinar si es necesario sustituir o volver a perfilar un juego de ruedas. La sustitución es un proceso tedioso, pero incluso las mediciones y el ajuste del perfil de las ruedas requieren tiempo de inactividad (que incluye sacar a la locomotora del funcionamiento normal).



05



06



07

Optimizar el mantenimiento y el desgaste de las ruedas constituye así importante potencial de ahorro de costes.

El objetivo del análisis de datos relativos al desgaste de las ruedas es, por un lado, predecir el desgaste de las ruedas de forma que solo se realicen mediciones cuando sea necesario y, por

El conocimiento de numerosas interacciones físicas podría incrementarse.

otro, identificar los factores más importantes del desgaste de las ruedas e introducir así optimizaciones que prolonguen su vida útil.

En este análisis, se crea una lista de señales del tren que pueden potencialmente influir en el desgaste de las ruedas a partir de datos registrados y conocimiento previo. Estas señales se introducen en un proceso de selección de funciones para identificar las mejores entradas del modelo. Primero se eliminan las señales constantes. A continuación, el modelo se entrena con subconjuntos decrecientes de las señales restantes. Con cada pasada, se elimina la señal con la puntuación de importancia más baja. A continuación, el modelo reducido se evalúa

utilizando su coeficiente de determinación →08. El coeficiente de determinación indica qué medida de la varianza de los datos se explica por el modelo (cuanto más alto sea, mejor, siendo el máximo 1,0). Sobre la base del coeficiente de determinación, se selecciona el grupo de señales más pequeño que mejor se comporta en términos de rendimiento del modelo (5 en el caso ilustrado). Estas señales se utilizan como entradas en el modelo basado en datos.

A menudo se predice el desgaste de las ruedas utilizando modelos de regresión lineal simple basados en el kilometraje. Utilizando los datos adicionales y explorando diferentes algoritmos de aprendizaje automático, se puede construir un modelo más preciso. Para dar una idea de la precisión del modelo, →09 representa los valores medidos (eje x) frente a los valores previstos (eje y). Idealmente, todos los puntos deben estar en la diagonal, lo que implica que el valor previsto es igual al valor dado.

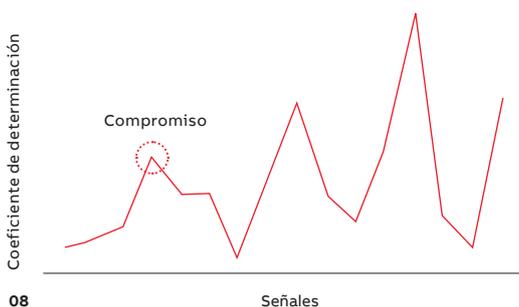
El modelo random forest (derecha) utiliza las cinco señales de →10 para mejorar el error absoluto medio en un 22,8 % en comparación con el modelo de regresión lineal simple (izquierda).

Resultados viables

Gracias a los datos recogidos y analizados en este proyecto, aumentaron el conocimiento de numerosas interacciones físicas y la transparencia de los mecanismos de desgaste de la transmisión y las ruedas.

Esto permitió realizar ajustes de software en el área de la cadena de transmisión, lo que supuso un aumento del kilometraje de los juegos de ruedas.

Además de los campos de investigación definidos inicialmente en la colaboración, se constató que los datos registrados también podían utilizarse en otras áreas de interés. Algunos ejem-



08

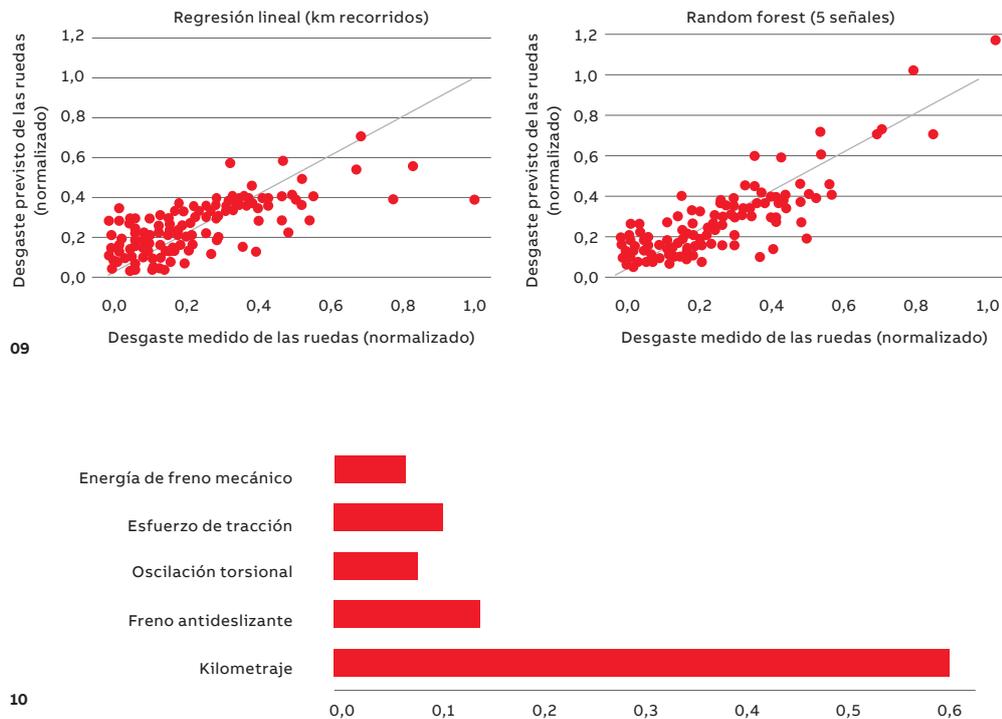
Señales

—
07 Gráficos circulares superpuestos al mapa que muestran la frecuencia de uso de areneros.

—
08 Coeficiente de determinación del número decreciente de señales.

—
09 El modelo random forest (derecha) mejora el error absoluto medio en un 22,8 %, en comparación con el modelo de regresión lineal simple (izquierda).

—
10 Las cinco señales del proceso de selección.



plos son la prueba de la resistencia a la fatiga del eje con respecto a las oscilaciones torsionales, la detección de problemas en los sensores antes de los ensayos, la comprensión de los rebotes de los pantógrafos con líneas aéreas fijas y más.

—
Además de los campos de investigación definidos inicialmente, los datos registrados también podrían utilizarse en otros ámbitos de interés.

Esto muestra cómo pueden utilizarse los datos de forma versátil para aprovechar el potencial oculto cuando los datos se facilitan de forma procesada y estructurada. El conocimiento

obtenido con este proyecto también se utilizará en futuros diseños y controles de convertidores.

Por último, no hay proyecto importante sin «lecciones aprendidas». Especialmente en las primeras fases del proyecto, se requirió mucho esfuerzo hasta que los datos pudieron reordenarse de forma fiable y estructurada en una base de datos. Los propios datos también presentaron varios retos: desde consolidar series temporales muy lentas y muy rápidas hasta problemas de calidad de los datos, por no hablar de evitar la trampa omnipresente de confundir correlación con causalidad.

El proyecto también fue un valioso ejemplo de creación conjunta, en el que el producto no fue simplemente un producto entregable, sino que ABB y el cliente establecieron conjuntamente objetivos, compartieron observaciones y dirigieron el desarrollo de principio a fin. •

Referencias

[1] R. Lewis, U. Olofsson, *Wheel-Rail Interface Handbook*, Woodhead Publishing, 2009.

[2] P. Dersin, A. Alessi, B. Lamoureux, M. Brahimi, O. Fink, "Prognostics and health management in railways", 27th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017), Portoroz, Eslovenia, 18-22 de junio de 2017.

[3] A. Cortinovis, R. Birke, L. Schmid, T. Wymann, C. Fehrenbach (2022). Radverschleiß-Buntersuchung im Co-Creation-Ansatz: Von Rohdaten zum besseren Verständnis der Radabnutzung ZEVrail, 2022, número 08 (pendiente de publicación).

[4] J. Luetscher, 3. Schlaepfer, The 'Locomotive 2000'- a new generation of high-speed, multipurpose locomotives -99 main-line locomotives with AC propulsion for Swiss Federal Railways, *ABB Review* 10/1992, pp. 25-33.

[5] T. Hungerberger, IGBT converters extend life of Re460 locomotives, *ABB Review* 1/2017, pp. 65-69.

[6] "ABB increases the energy efficiency of the 'Lok 2000' for even more sustainable operation in the future", nota de prensa de ABB Switzerland, 14 de julio de 2020. Disponible en: <https://new.abb.com/>

news/de/detai1/65238/abb-increases-the-energy-efficiency-of-the-locomotive-2000-for-an-even-more-sustainable-operation-in-the-future [consultado el 11 de abril de 2022].