





# Estudios de explotación de vehículos ferroviarios

---

Leonel Francisco Castañeda Heredia  
Bogdan Żółtowski



Castañeda Heredia, Leonel Francisco

Estudio de explotación de vehículos ferroviarios / Leonel Francisco Castañeda Heredia, Bogdan Żółtowski. -- Medellín : Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2009.

300 p. : il. ; 24 cm. -- (Colección académica)

Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-720-050-8

1. Ferrocarriles 2. Ferrocarriles - Diseño y construcción 3. Ferrocarriles - Aparatos de seguridad 4. Ferrocarriles - Aspectos económicos 5. Transporte ferroviario I. Żółtowski, Bogdan II. Tít. III. Serie.

625.1 cd 21 ed.

A1240459

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

## Estudios de explotación de vehículos ferroviarios

Primera edición: noviembre de 2009

© Leonel Francisco Castañeda Heredia

© Bogdan Żółtowski

© Fondo Editorial Universidad EAFIT

Cra. 49 No. 7 sur - 50. Tel. 261 95 23

[www.eafit.edu.co/fondoeditorial](http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial)

Correo electrónico: [fonedit@eafit.edu.co](mailto:fonedit@eafit.edu.co)

ISBN: 978-958-720-050-8

Diseño de colección: Miguel Suárez

Editado en Medellín, Colombia

*A la memoria de nuestros maestros*



## Resumen

---

La explotación racional de vehículos ferroviarios, manejada como una actividad productiva en una empresa, es una fuente de ahorro de materias primas, energía e inversión de capital y una estrategia básica que permite obtener utilidades. Por lo tanto, existe la necesidad de buscar nuevos métodos para mejorar la efectividad de explotación de los vehículos ferroviarios.

La problemática presentada en este libro se centra en los conocimientos relacionados con la investigación del área de la tecnología de explotación de algunos conjuntos mecánicos de vehículos ferroviarios, necesaria para una organización racional, y para la administración y la estrategia de explotación. El lugar que ocupa esta problemática en las ciencias de explotación de máquinas es coherente con las concepciones establecidas por las diferentes disciplinas de dicha explotación; entre éstas se encuentran la confiabilidad, la tribología, el diagnóstico técnico, la seguridad y la teoría de explotación.

La teoría de explotación técnica de equipos es la ciencia que tiene como objeto de investigación el aprovechamiento óptimo de los equipos. La disciplina de explotación de equipos, al lado del diseño, la construcción y la fabricación, es la tercera en orden de importancia de las ramas de los saberes técnicos. Dicha teoría se apoya en la generalización de muchas disciplinas específicas: la teoría de la práctica, denominada *praxeología*, la teoría de los sistemas, la cibernética, y, por supuesto, las ciencias tecnológicas y de la construcción, en particular de la teoría de máquinas.

Los procesos de envejecimiento y desgaste son, a la vez, el origen y la causa de la generación de diferentes procesos y de señales de diagnóstico que son utilizados cada vez más para el control de los sistemas de explotación de vehículos. El deterioro inexorable de los vehículos ferroviarios exige la introducción de acciones de servicio que les devuelvan su potencial de utilización. Gran parte del libro se dedica al análisis de este problema, indicando las acciones y procedimientos necesarios para una práctica correcta del aprovechamiento de los vehículos ferroviarios.

Este libro está dirigido a operadores de vehículos ferroviarios, estudiantes de institutos mecánicos y de carreras de ingeniería, ingenieros mecánicos, jóvenes investigadores y en general a personas con gran experiencia en el sector de los servicios técnicos.

Varios de los conceptos mencionados anteriormente han sido explicados en diferentes trabajos de destacados investigadores; expresa la opinión y el conocimiento de los autores, quienes agradecen los aportes de las empresas ferroviarias que han permitido aplicar algunas pruebas en la búsqueda de optimizar procesos y procedimientos.

Los investigadores manifiestan sus agradecimientos a las siguientes entidades por su financiación.



# Tabla de contenido

---

Prólogo .....	11
Introducción .....	13
1. Explotación de vehículos ferroviarios .....	17
1.1 Elementos de la teoría de la explotación.....	17
1.2 Disciplinas de explotación .....	23
1.3 Operación, servicio y dirección de la explotación .....	39
1.4 Economía de materiales en el sistema de explotación .....	43
1.5 Costos de explotación .....	48
1.6 Sistemas informáticos de explotación .....	53
1.7 Protección del medio ambiente durante la explotación .....	57
2. Elementos del diagnóstico técnico.....	61
2.1 Los objetivos del diagnóstico técnico.....	61
2.2 El lugar del diagnóstico en la vida de la máquina .....	70
2.3 El modelado del diagnóstico.....	75
2.4 La conclusión del diagnóstico.....	84
2.5 El sistema de diagnóstico de explotación.....	94
2.6 La función que maneja el diagnóstico .....	99
2.7 Las tareas del diagnóstico en la explotación .....	101
3. Estudio de la dinámica del vagón .....	105
3.1 Estudio de la dinámica.....	105
3.2 Modelado de la dinámica de objetos .....	109
3.3 Elaboración del modelo dinámico.....	118
3.4 Identificación de los fenómenos físicos del vagón .....	121
3.5 Modelado de la dinámica del vagón.....	125
3.6 Modelos dinámicos virtuales.....	129

3.7 Estructuración de la seguridad de marcha .....	144
3.8 Pruebas de confort de marcha.....	151
4. Protocolo para los estudios de explotación.....	163
4.1 Plan de prueba de los estudios de explotación .....	163
4.2 Propiedades de estado y síntomas de diagnóstico .....	168
4.3 Adquisición de datos .....	181
4.4 Procesamiento de la información.....	184
4.5 Selección de la información de diagnóstico .....	191
4.6 Conclusión del diagnóstico .....	209
4.7 Pronóstico del siguiente término de estudio .....	213
5. Pruebas de vehículos ferroviarios.....	221
5.1 Evaluación del estado de la vía .....	221
5.2 Evaluación de la seguridad y del confort de marcha.....	235
5.3 Evaluación del estado técnico.....	242
5.4 Toma de decisiones de explotación.....	253
5.5 Estructura del sistema de diagnóstico.....	259
5.6 Sistema de mantenimiento de trenes .....	265
Conclusiones.....	271
Anexo 1. Pruebas de vehículos ferroviarios.....	277
1.1 Introducción .....	277
1.2 Equipos de medición para perfiles del sistema rueda-riel.....	277
1.3 Equipos de medición para parámetros geométricos de la vía ferroviaria.....	279
1.4 Equipos de lubricación para el sistema rueda-riel.....	281
1.5 Sistemas informáticos de diagnóstico.....	283
Bibliografía.....	289

## Prólogo

---

Los retos en la mejora de la operación de los sistemas técnicos críticos se han convertido, en los últimos tiempos, en los principales problemas técnicos y económicos de la explotación de los vehículos ferroviarios. El rápido desarrollo de la técnica ferroviaria ha producido un incremento inesperado de efectos negativos no previstos, y, debido a su masificación y uso intensivo, empiezan a amenazar el medio ambiente, a las personas y los componentes del sistema ferroviario.

El aumento continuo de estos riesgos se origina, en gran medida, por las tendencias modernas de la técnica y la tecnología tales como el aumento de la efectividad de los procesos tecnológicos por medio del incremento de la velocidad de explotación, la optimización de las dimensiones y pesos del vehículo ferroviario y las construcciones demasiado flexibles, que incrementan las acciones dinámicas, muchas veces innecesarias, desde el punto de vista del proceso de utilización.

Estas tendencias asociadas con el uso masificado de medios técnicos, generan riesgos a la salud y la vida humanas, disminuyen el rendimiento del trabajo y el de las acciones de operación, bajan la confiabilidad y la durabilidad del sistema técnico y contribuyen a la destrucción del medio ambiente, trayendo como resultado una reducción significativa de los indicadores básicos de progreso.

Todos estos efectos negativos podrán ser contrarrestados únicamente a través del uso práctico de los avances en las nuevas disciplinas del saber y de las técnicas informáticas modernas desde la etapa de la construcción, fabricación y explotación de los sistemas técnicos.

La estructuración y evaluación de la calidad de los vehículos ferroviarios están relacionadas con los métodos de diagnóstico técnico, en razón a la necesidad de mantener un nivel adecuado de sus propiedades útiles en condiciones definidas de explotación. Las propiedades que representan fielmente el estado de los vehículos (conjunto y elemento), deben ser definidas en la etapa de su construcción y verificadas durante su fabricación y explotación (véase sección 2.2).

Es importante resaltar que para la evaluación y el mantenimiento de las propiedades útiles es necesario aprovechar lo siguiente:

- El diagnóstico técnico. Esto significa, durante la construcción del diagnóstico, la evaluación de la calidad de los productos, el diagnóstico de explotación, la implementación de métodos y medios de diagnóstico técnico, y la asistencia de estudios de diagnóstico con técnica computacional.
- Los estudios de confiabilidad en la etapa anterior y posterior de la concepción y producción, como también durante la fabricación, utilizando el banco de pruebas, el modelado determinativo y estocástico de los factores de excitación, y la asistencia computacional para pruebas de confiabilidad.
- La metodología para la estructuración de la calidad por medio de los sistemas de control de calidad de la empresa, que considera los criterios de calidad de las normas.
- Las pruebas tecnológicas de servicio y reparación de los vehículos, la estructuración de la intensidad del envejecimiento y el desgaste de las partes de los vehículos, la estructuración de la susceptibilidad al diagnóstico y la evaluación efectiva de los vehículos ferroviarios.

Las temáticas anteriores constituyen el área de interés de un amplio grupo de personas que se ocupan de la explotación de los sistemas técnicos y que propenden por el desarrollo de métodos y metodologías para la estructuración y mantenimiento de la capacidad de utilización de los vehículos ferroviarios.

*Leonel Francisco Castañeda Heredia*  
*Bogdan Żółtowski*

*La máquina necesita al hombre  
para solucionar los problemas de explotación  
más de lo que pensamos*

## Introducción

---

Los fabricantes de los medios de transporte ferroviario invierten grandes sumas de dinero en la construcción de vehículos de pasajeros rápidos, seguros, cómodos y efectivos, lo que hace que los trenes sean cada vez más complejos. Desde las etapas de diseño, construcción y fabricación, los vehículos generan numerosos problemas que más adelante se convierten en retos complejos para su explotación racional.

Los sistemas de transporte ferroviario son definidos en la ingeniería mecánica como “sistemas críticos en operación”; esto significa que un fallo en su funcionamiento puede ocasionar consecuencias fatales –lesiones o muertes de personas–, grandes pérdidas financieras y graves peligros al medio ambiente.

Para asegurar la durabilidad, confiabilidad y disponibilidad de la interfaz vía-vehículo y disminuir el nivel de las amenazas que influyen sobre la seguridad del funcionamiento del sistema de transporte ferroviario, es necesaria la implementación de herramientas de diagnóstico técnico que permitan mantener el potencial de utilidad de los medios de transporte ferroviario por medio del monitoreo continuo de su estado técnico, y proporcionen los planes de pruebas que se deben aplicar para cumplir con las exigencias establecidas en el campo de las normativas de seguridad y confort de marcha.

Esta problemática, presentada en este libro, expone los fundamentos para el desarrollo y explotación de un sistema informático de diagnóstico de criterios múltiples para la evaluación de la seguridad y el confort en los vehículos ferroviarios, asumiendo la señal del diagnóstico (la señal que contiene la información necesaria para evaluar el estado técnico del

sistema técnico) como la base para la descripción y el estudio del cambio del estado dinámico del sistema de transporte ferroviario, y, por consiguiente, la evaluación de los aspectos de seguridad y confort de marcha y el cambio del estado técnico de la interfaz vía-vehículo.

Para lograr estas metas y poder resolver los problemas reales de la explotación de vehículos ferroviarios, es necesario dar solución a los siguientes problemas:

- La aplicación práctica de los protocolos de prueba de la norma UIC - 518 (International Union of Railways) para condiciones reales de explotación, debido a que la norma actual establece exigencias únicamente para sistemas ferroviarios nuevos.
- La elaboración de pruebas e implementación de los criterios de seguridad y confort de marcha del sistema ferroviario seleccionado.
- El estudio y la elaboración de un conjunto de métodos para la evaluación del estado técnico de la interfaz vía-vehículo.

El cumplimiento de estos requisitos permitirá a las empresas que trabajan en la explotación de vehículos ferroviarios, la prestación de asistencia en los procesos de mejoramiento de las acciones preventivas programadas para el mantenimiento de la interfaz vía-vehículo. Utilizando métodos de diagnóstico técnico, y con las experiencias que se adquieran en el futuro en esta exploración, este trabajo debe conducir a las empresas ferroviarias a la introducción de un sistema dinámico de explotación de sus vehículos.

Las tareas mencionadas quedaron agrupadas según el tipo de problema. Las pruebas de seguridad y confort de marcha de trenes y los estudios de cambio de estado técnico de la interfaz vía-vehículo son las líneas de investigación que se plantean para mejorar la explotación de los sistemas ferroviarios. Por esta razón, gran parte del libro se centra en la presentación de los métodos y el conjunto de procedimientos de diagnóstico técnico que permitan vigilar, evaluar y mejorar la utilización de los vehículos ferroviarios.

Los problemas principales planteados se relacionan con el estado actual de los sistemas de explotación de los sistemas ferroviarios; por esta razón, se describen las acciones existentes de mantenimiento de los vehículos de pasajeros y la “vía permanente” (la vía ferroviaria o comercial), con las cuales se logran medir y vigilar los parámetros geométricos de la interfaz vía-vehículo que garantizan el buen funcionamiento del sistema

ferroviario y muestran los fallos que influyen sobre la disponibilidad de servicio establecida por la empresa.

Esta información sobre el estado técnico de los vehículos y las vías es la base para desarrollar los métodos y procedimientos de diagnóstico técnico que conduzcan a la evaluación de los aspectos de la seguridad y el confort de marcha de los vehículos de pasajeros, según la normativa internacional existente, y lleven a conclusiones acerca del estado técnico de la interacción rueda-riel que permitan a los operadores del sistema ferroviario tomar decisiones correctas de explotación.

Durante el desarrollo de las diferentes actividades de investigación se utilizaron equipos de adquisición y procesamiento de datos de última tecnología, se elaboraron planes de prueba para la adquisición y procesamiento de señales de diagnóstico y evaluación de estado, se aplicaron y verificaron, de forma práctica, métodos de diagnóstico tales como un procedimiento para la selección de puntos de medición de señales de vibración, un método para el cálculo del valor límite del síntoma, y otros métodos para encontrar el siguiente término de diagnóstico, entre otros.

En el análisis estadístico de los datos obtenidos en las diferentes pruebas de campo, se desarrollaron algoritmos de diagnóstico técnico novedosos con las mejores herramientas computacionales disponibles para este tipo de problemas ingenieriles: MATLAB®, Excel® y Statgraphic®. Funciones matemáticas como la correlación, la regresión, y los modelos de distribución estadística fueron implementadas en la etapa de conclusión del diagnóstico. Para la detección y localización de fallos se utilizaron procedimientos matemáticos nuevos como el protocolo de las componentes principales de observación, PCA (Principal Component Analysis) y el método de descomposición en valores singulares, SVD (Singular Value Decomposition).

En las pruebas de explotación se establecieron modelos de causa y efecto entre los parámetros geométricos de la vía y las ruedas con los “estimadores” (inglés *estimator*) de vibración. Los estudios confirman la utilidad de los procesos vibratorios en la representación del estado dinámico de los trenes, y, lo más importante, que la intensidad y la forma de las vibraciones tienen una gran influencia en la seguridad y el confort de marcha de los vagones del tren. Los logros alcanzados en los estudios de explotación de los vehículos ferroviarios sentaron las bases para la elaboración e implementación de un sistema informático de diagnósticos,

diseñado teniendo en cuenta los procedimientos de evaluación de estado, seguridad y confort de marcha de los trenes y los métodos modernos de diagnóstico técnico.

Los procedimientos elaborados para la estructuración de la seguridad y el confort de marcha, la evaluación del estado técnico de los vehículos ferroviarios, constituyen el punto de partida para el desarrollo de una estrategia de explotación dinámica de trenes en los sistemas ferroviarios.