



RICARDO INSA FRANCO | PABLO SALVADOR ZURIAGA  
IGNACIO VILLALBA SANCHIS | PABLO MARTÍNEZ FERNÁNDEZ  
CARLA GARCÍA ROMÁN | JUAN DIEGO PINEDA JARAMILLO  
RAFAEL SÁNCHEZ ALANDÍ

# MONITORIZACIÓN, MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL FERROCARRIL



---

# **MONITORIZACIÓN, MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL FERROCARRIL**

---

Ricardo Insa Franco    Pablo Salvador Zuriaga  
Ignacio Villalba Sanchís    Pablo Martínez Fernández  
Carla García Román    Juan Diego Pineda Jaramillo  
Rafael Sánchez Alandí

2016

EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Colección *UPV Scientia*; serie *Ingeniería Civil*

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados mediante el sistema *doble ciego*, siguiendo el procedimiento que se recoge en:

<http://www.upv.es/entidades/AEUPV/info/891747normalc.html>

Primera edición, 2016 (versión impresa)

Primera edición, 2016 (versión electrónica)

© Ricardo Insa Franco  
Pablo Salvador Zuriaga  
Ignacio Villalba Sanchís  
Pablo Martínez Fernández  
Carla García Román  
Juan Diego Pineda Jaramillo  
Rafael Sánchez Alandí

© Editorial Universitat Politècnica de València

*distribución:* Telf.: 963 877 012 / [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 6288\_01\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-464-7 (versión impresa)

ISBN: 978-84-9048-465-4 (versión electrónica)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edición@editorial.upv.es.

## PRÓLOGO

La reducción del consumo de energía del tren y de las emisiones asociadas, tanto de gases de efecto invernadero como de otros contaminantes de efecto local, es una cuestión prioritaria para el ferrocarril. No sólo porque la energía supone una parte importante de sus costes operativos, sino además porque en su menor consumo y más bajas emisiones encuentra el ferrocarril una de las más importantes justificaciones de su propia existencia y de las inversiones que se realizan en él, así como de las actuaciones que desde los diversos ámbitos regulatorios se orientan a trasvasar al tren tráficos desde otros modos de transporte menos amigables con el medio ambiente. Existe un consenso general sobre las ventajas energéticas del tren en comparación con el uso del vehículo privado o del camión, e incluso en comparación con otros modos colectivos de transporte de viajeros. Las razones de esta superioridad del ferrocarril no están basadas, como se opina generalmente, por el menor rozamiento entre rueda y carril (ventaja que queda anulada por la enorme proporción entre la tara y la carga de los vehículos ferroviarios) sino que en su mayor parte se derivan del tamaño del tren, generalmente mayor que el de los vehículos de otros modos de transporte; y en la posibilidad de utilizar energía eléctrica, en lugar de motores térmicos, con mayor rendimiento y sobre todo con el potencial de reducir emisiones. Sean cuales fueren las razones de esta ventaja competitiva, parece evidente la superioridad del tren en la mayor parte de los casos (por las razones apuntadas, hay poca probabilidad de que sea eficiente un tren pequeño que utilice tracción diésel).

Siendo esta posición de superioridad una enorme ventaja, tiene el inconveniente que no estimula al ferrocarril en la mejora de su eficiencia energética. Y mientras, otros modos de transporte menos eficientes, se ven obligados a mejorar su posición en esta materia, por lo que se puede observar que en los últimos años la ventaja del tren se va reduciendo en comparación con otros modos de transporte. Existe además la amenaza de que cuando otros modos adopten la tracción eléctrica reduzcan aún más sus desventajas frente al tren, por lo que resulta evidente la necesidad de seguir trabajando para la mejora de la posición competitiva del ferrocarril en la materia. La separación entre la operación de los servicios y la gestión de la infraestructura tampoco ayuda en esta materia a hacer grandes progresos (en este campo, como en tantas otros, la separación ha acarreado enormes perjuicios para el ferrocarril sin que hasta la fecha se hayan tenido noticias concretas de la concreción de las ventajas que justificaron la separación). La interacción entre infraestructura y vehículo, entre la explotación técnica y la comercial, son tan fuertes que se observa que en todos casos en que se ha producido tal separación, las mejoras de eficiencia energética son más lentas, mientras que en los entornos que se mantienen integrados los avances son rápidos y evidentes. El ferrocarril necesita profundizar en las investigaciones sobre la eficiencia energética, y en este campo los estudios más útiles son los que se realizan combinando la teoría con la experimentación y la realidad; y los que toman en cuenta al ferrocarril como un sistema, considerando cada una de sus partes y subsistemas integrantes. En esta línea se han centrado parte de los trabajos de Ricardo Insa, Pablo Salvador y de los equipos redactores de los diversos capítulos este libro, siempre aportando una visión comprensiva del conjunto (el trabajo fin de carrera de Pablo Salvador en 2008 es uno de los más completos realizados en Europa con este enfoque integral). A los amplios conocimientos

y estudios teóricos han sumado los resultados de una campaña de experimentación que ha incluido (y esto es novedoso y como tal especial motivo de agradecimiento) un vehículo diésel. En tracción diésel los estudios son más limitados, y en general los modelos disponibles predicen mal el consumo real de los trenes diésel.

También merece destacarse la importancia que en este trabajo se otorga a la medición de los consumos. La falta de mediciones reales tiene una doble consecuencia: con frecuencia se imputan los costes de los consumos a tanto alzado o por reparto de los resultados conjuntos, lo que no estimula en absoluto la reducción de los mismos; y por otra parte la falta de datos reales impide calibrar los modelos y comprobar su adecuación a la realidad.

Muy meritorio e interesante resulta el análisis de la resistencia al avance en las curvas. La literatura disponible (y que es utilizada en los cálculos del consumo de los tiempos de viaje) es antigua, poco evolucionada y muy simplificadora, lo cual en la mayor parte de los casos no distorsiona mucho la realidad por cuanto esta parte de la resistencia al avance suele ser pequeña tanto en valores absolutos como relativos, pero puede no ser absoluto despreciable en servicios de metros o tranvías con curvas muy cerradas. Por ello, esta aportación resulta del máximo interés teórico y de notable utilidad práctica en tales entornos.

En suma, este libro resulta una aportación de la máxima utilidad, tanto para la reflexión teórica como para la difusión de datos reales que puedan apoyar otros estudios futuros.

Alberto García Álvarez

# ÍNDICE

Introducción .....	3
1. Importancia del ahorro energético y la eficiencia energética .....	3
2. El ahorro energético en la explotación ferroviaria .....	6
2.1. <i>Clasificación de estrategias para el ahorro energético</i> .....	6
2.2. <i>Algunos ejemplos</i> .....	8
2.3. <i>Algunos Proyectos de Investigación sobre eficiencia energética</i> .....	14
2.4. <i>Motivación y objetivos</i> .....	14
3. Organización del libro .....	15
Referencias .....	17
BLOQUE I. LA MONITORIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	19
Capítulo 1. Monitorización del consumo en trenes diésel.....	21
1. Introducción .....	21
2. Descripción de los dispositivos y procedimiento de medición.....	22
2.1. <i>Medición del combustible</i> .....	22
2.2. <i>Medición de la posición y velocidad</i> .....	23
2.3. <i>Monitorización de las revoluciones del motor</i> .....	25
2.4. <i>Registro de datos</i> .....	28
3. Descripción de la prueba y resultados .....	29
4. Conclusiones .....	31
Referencias .....	33
Capítulo 2. monitorización del consumo en trenes eléctricos de corriente continua.....	35
1. Introducción .....	35
2. Objetivo y descripción de las pruebas.....	36

3. Resultados .....	38
3.1. Consumos globales .....	38
3.2. Consumos de equipos auxiliares .....	45
3.3. Energía disipada en las resistencias de frenado .....	48
Referencias .....	51
BLOQUE II. LA MODELIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO .....	53
Capítulo 3. Modelización del consumo energético en tranvías y otros vehículos ferroviarios ligeros con curvas cerradas .....	55
1. Introducción .....	56
2. Descripción del modelo .....	57
3. Calibración y validación .....	62
4. Aplicación del modelo .....	63
5. Resultados .....	64
6. Conclusiones .....	67
Referencias .....	69
Capítulo 4. Modelización del consumo energético mediante redes neuronales en trenes diésel .....	71
1. Introducción .....	71
2. Metodología .....	72
2.1. Recogida y procesado de datos .....	72
2.2. Desarrollo de la red neuronal .....	73
3. Resultados .....	76
4. Conclusiones .....	79
Referencias .....	81



Capítulo 5. Modelización del consumo energético mediante redes neuronales en trenes eléctricos .....	83
1. Introducción .....	83
2. Metodología .....	84
2.1. <i>Recogida y procesado de datos</i> .....	84
2.2. <i>Desarrollo y entrenamiento de la red neuronal</i> .....	85
3. Resultados .....	88
3.1. <i>Consumo global</i> .....	88
3.2. <i>Consumo en auxiliares</i> .....	89
3.3. <i>Energía disipada en las resistencias de frenado</i> .....	91
3.4. <i>Red neuronal</i> .....	93
4. Conclusiones .....	95
Referencias .....	97
BLOQUE III. SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO .....	99
Capítulo 6. El empleo de simuladores como herramienta para el ahorro energético .....	101
1. Introducción .....	101
2. El uso de la simulación en DB (Alemania) .....	102
3. Sistema de aprendizaje para los maquinistas del operador ferroviario ŽSSK CARGO (Eslovaquia) .....	103
4. La experiencia del uso de simuladores en el ave Madrid-Sevilla (España) .....	105
5. Consideraciones finales sobre el empleo de simuladores para la conducción económica .....	107
Referencias .....	108
Capítulo 7. Optimización energética entre dos estaciones por métodos empíricos. Aplicación a trenes eléctricos de corriente continua .....	109
1. Introducción .....	109

2. Descripción del caso de estudio .....	109
2.1. Trayecto.....	109
2.2. Servicio.....	110
2.3. Material móvil .....	111
3. Proceso de desarrollo del modelo.....	112
3.1. Toma de datos.....	112
3.2. Obtención de la marcha del tren.....	112
3.3. Confección del modelo .....	113
3.4. Validación del modelo .....	115
3.5. Obtención de la marcha de tiempo mínimo .....	115
3.6. Obtención de la marcha de consumo mínimo .....	116
4. Análisis de los resultados.....	117
5. Conclusiones .....	119
Referencias .....	121
Capítulo 8. Simulación del consumo de combustible en diferentes escenarios de explotación.....	123
1. Introducción .....	123
2. Confección del modelo de consumo.....	124
2.1. Descripción del funcionamiento de la serie 592.200 .....	124
3. Confección del modelo dinámico.....	128
3.1. Descripción del modelo .....	128
3.2. Funcionamiento del modelo.....	130
4. Validación del modelo.....	131
5. Identificación de los escenarios de aplicación del modelo .....	133

---

5.1. Antecedentes de la línea 310 Aranjuez-Cuenca-Valencia.....	133
5.2. Descripción de los escenarios de simulación .....	134
6. Resultados .....	135
7. Conclusiones .....	138
Referencias .....	139
Capítulo 9. Optimización del consumo energético en la conducción de trenes metropolitanos en la ciudad de Valencia.....	141
1. Introducción .....	141
2. Descripción de la aplicación.....	141
2.1. Líneas de estudio .....	141
2.2. Material rodante.....	141
3. Elaboración del modelo.....	142
3.1. Restricciones del vehículo y del trazado.....	142
3.2. Dinámica del vehículo .....	142
3.3. Comportamiento del motor .....	144
3.4. Cálculo del consumo energético.....	145
4. Calibración y validación de resultados.....	145
5. Optimización del consumo energético .....	146
Referencias .....	148



## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer a Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (FGV) por su apoyo durante el desarrollo de este estudio y, muy especialmente, su ayuda en la instalación de los equipos en sus trenes y su colaboración durante la campaña de recogida de datos en la red de metro de Valencia.

Del mismo modo, los autores quieren agradecer a Renfe Operadora su colaboración en el proyecto y, particularmente, su asistencia durante el montaje de los equipos de medición en sus trenes y su permiso para llevar a cabo las mediciones durante los servicios de Media Distancia Valencia-Alcoy y Valencia-Cuenca.

Los resultados que aquí se muestran forman parte del Proyecto *Estrategias para el diseño y la explotación energéticamente eficiente de infraestructuras ferroviarias y tranviarias*, financiando por el Ministerio de Economía y Competitividad (ref. TRA2011-26602).



## INTRODUCCIÓN

---

Ricardo Insa Franco, Pablo Salvador Zuriaga

### 1. IMPORTANCIA DEL AHORRO ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El consumo de energía se ha incrementado incesantemente en las últimas décadas, si bien en los últimos años se ha producido un estancamiento e incluso una ligera disminución, debido a la actual crisis económica. A pesar de esto, el sector de los transportes es el que más energía sigue consumiendo en la actualidad. Esto plantea dos problemas: el primero de tipo económico, ya que un aumento en el consumo supone un aumento de costes. El segundo es de tipo medioambiental. Hoy en día, al igual que en el siglo pasado, las fuentes de energía se basan fundamentalmente en el carbón y el petróleo, esto es especialmente relevante en el sector de los transportes, donde un 75% de la energía es de origen fósil (Fig. 0-1). Ello implica que el consumo de energía está directamente relacionado con las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Este último problema entra en conflicto con la política de desarrollo sostenible. El término desarrollo sostenible se utilizó por primera vez en 1987 en el informe Bruntland y, desde entonces, ha ido ganando cada vez más apoyo por parte de los diferentes grupos sociales, incluidos los gobiernos. Hoy en día es un principio ampliamente aceptado por los países desarrollados, pero todavía existe un gran contraste entre la supuesta concienciación de los ciudadanos y el uso real de la energía. Las actuales fuentes de energía, fundamentalmente basadas en fuentes no renovables, pueden ser contradictorias con el principio de desarrollo sostenible. Para resolver esto, se puede trabajar en dos direcciones. La primera es aumentar el porcentaje de energías renovables. La segunda, con la que está relacionada este trabajo, es reducir el consumo de energía o, como mínimo, hacer un uso más eficiente de la misma.

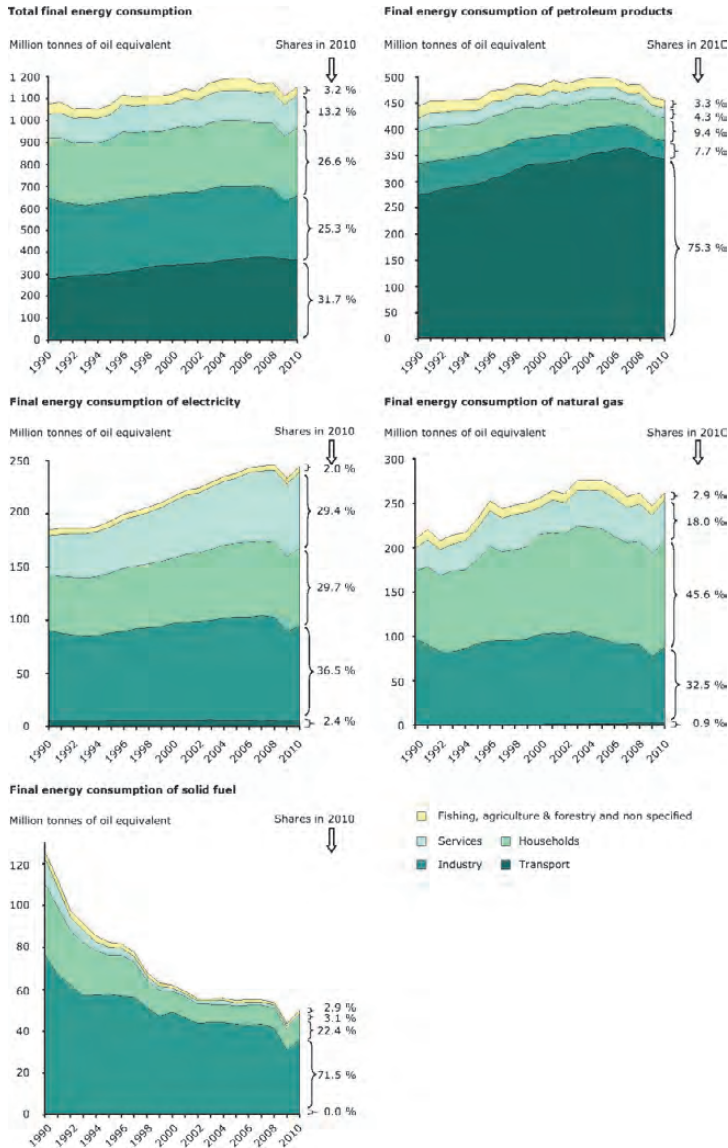


Fig. 0-1. Consumo energético por sectores. Fuente: Agencia Europea Medioambiental

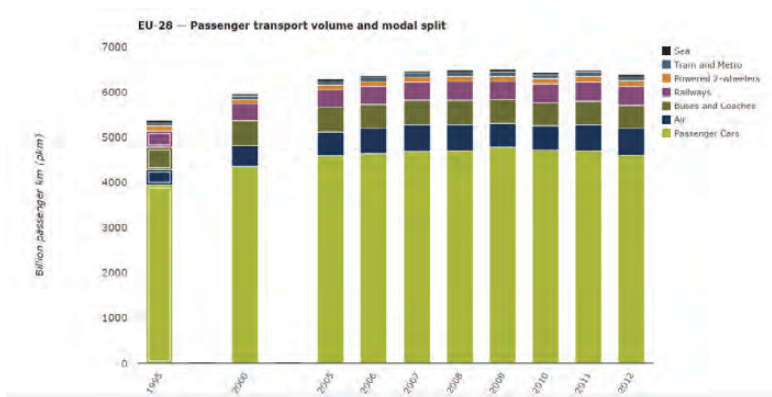
En el campo de la eficiencia energética, el modo ferroviario muestra buenos resultados, ya que es uno de los medios de transporte más eficientes que existen hoy en día. El uso de la electricidad para alimentar los trenes, el bajo rozamiento de la rodadura, la posibilidad de



transportar un gran número de viajeros o grandes volúmenes de mercancías (en relación al transporte por carretera) y la posibilidad de recuperar parte de la energía utilizada, hace de los ferrocarriles un modo de transporte afín al medioambiente. Sin embargo, en los últimos años, el resto de modos de transporte también han ido avanzando en el campo de la eficiencia energética por lo que si los ferrocarriles desean continuar con la ventaja medioambiental que tradicionalmente les ha caracterizado, deben seguir investigando y desarrollando nuevas ideas para aumentar del mismo modo su eficiencia energética.

Por otra parte, existen otras razones para ahorrar energía. La más importante es la necesidad de aumentar la competitividad del ferrocarril con otros modos. En 2012, y según los datos que se recogen en las Fig. 0-2 y Fig. 0-3, el 84,2% de los viajeros-km se registró en la carretera, mientras que por ferrocarril fueron el 8,0%. Para las mercancías, los porcentajes son del 46,3% para la carretera y del 11,1% para el ferrocarril [0.1]. Estos datos muestran que un gran porcentaje de la demanda actual del transporte puede ser transferida de la carretera al ferrocarril. Para conseguir esto es imprescindible ofrecer al público un buen servicio a un precio razonable. Para ello es necesario reducir costes de explotación, y resulta evidente que una de las formas más directas de reducir los costes de explotación es reducir el consumo de energía, que puede llegar a suponer entre el 7,5% y el 30% de los costes totales de explotación, siendo ésta una cifra claramente significativa.

Además, si se transfiera parte de la demanda de transporte de la carretera al ferrocarril, las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema de transportes en su conjunto disminuirían. Dado que el ferrocarril tiene un consumo de energía por pasajero-km transportado o tonelada-km transportada menor que la carretera, cada pasajero o tonelada que se pasa de la carretera al ferrocarril se traduce en una reducción del consumo de energía y, por las razones expuestas anteriormente, una reducción del consumo de energía se traduce en una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.



**Fig. 0-2. Evolución del reparto modal del tráfico de viajeros 1995-2012- Fuente: Agencia Europea Medioambiental**

**Para seguir leyendo haga click aquí**