

# Análisis del consumo de energía de los trenes de mercancías

## *Analysis of energy consumption of freight trains*

M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares\*

*Área de investigación, formación y colaboración científica, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, 28012, España*

---

### Resumen

En esta ponencia se presenta una herramienta para la conversión de volúmenes de demanda de mercancías en unidades de oferta, ofreciendo otros resultados adicionales como los consumos de energía y los costes de explotación asociados. Se muestra un caso-ejemplo realizado con la herramienta, en el que para una carga anual de diferentes productos, se calcula el número de vagones y trenes necesarios y se estudia también la sensibilidad a diversos parámetros de la infraestructura y de la tracción del tren.

Palabras clave: trenes de mercancías, consumo, costes

### Abstract

*This paper presents a tool for converting volumes of demand for goods in units of supply, offering other outcomes such as energy consumption and associated operating costs. It shows a case example made with the tool, in which for an annual load of different products, it is estimated the number of wagons and trains necessary and also it considers the sensitivity to various parameters of the infrastructure and traction.*

*Keywords: freight trains, energy consumption, costs*

---

## 1. Herramienta PlanCargoRail

Para la planificación de la red ferroviaria, sus equipamientos y capacidades resulta necesario conocer cualitativa y cuantitativamente el tráfico que va a soportar. En el caso particular del transporte de mercancías, es preciso conocer las cantidades de productos a transportar y sus orígenes-destinos, datos que pueden ser determinados mediante análisis de mercado con técnicas convencionales. Se presenta la dificultad de que lo relevante para la producción, los costes y el dimensionamiento de la red no son los volúmenes y naturaleza de las mercancías, sino el número y tipo de los vagones y trenes en que se agrupan las mercancías y sus características. El fin de la herramienta desarrollada es convertir el volumen de la demanda de mercancías en unidades de oferta (vagones, trenes cargados y trenes vacíos) adecuadas para atenderla.

A partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), la herramienta PlanCargoRail permite obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes. Adicionalmente, se puede obtener el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

\*Email autor de contacto: pilarmartin@ffe.es

La herramienta permite modificar el valor de algunos parámetros como el peso por eje, aprovechamiento de los vagones, número máximo de vagones por lote, locomotoras que traccionan (número y tipo), longitud máxima del tren, etc. Por ello, se puede medir la sensibilidad del grado de utilización de la infraestructura, del coste y del consumo de energía a cada una de estas variables.

Los datos de costes empleados han sido tomados de (Rallo, 2008). Los consumos se obtienen mediante el simulador de consumos ALPI2810 en su versión 9, desarrollado por el Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, conforme a la Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias (FFE e IDAE, 2010).

Los algoritmos de cálculo están programados en “Visual Basic” para Excel y el interfaz de usuario está desarrollado en Excel, lo que facilita la entrada de datos al usuario familiarizado con dicha aplicación y la hace compatible con el resto de herramientas del paquete “Office”.

## 2. Proceso de cálculo

Una vez el usuario ha introducido los datos de la mercancía a transportar, condiciones de la infraestructura, características de la tracción y otros factores, se pueden iniciar los cálculos.

Lo primero es agrupar la carga en vagones, siendo este procedimiento diferente para el transporte intermodal de contenedores, para el de automóviles y para el resto de cargas. En el caso del transporte intermodal hay que realizar un paso previo, el de la conversión de la carga en contenedores.

Se puede escoger el tipo de vagón, ofreciéndose para cada subgrupo de mercancías un catálogo de vagones y entre ellos, uno recomendado.

Una vez se conoce el número de vagones para ambos sentidos y la carga unitaria del vagón, se calculan las limitaciones de carga del tren, teniendo en cuenta las características de la línea, la tracción y las restricciones de la operación.

Conocido el número de vagones que puede llevar cada tren cargado y cada tren vacío se calcula el número de trenes así como sus características.

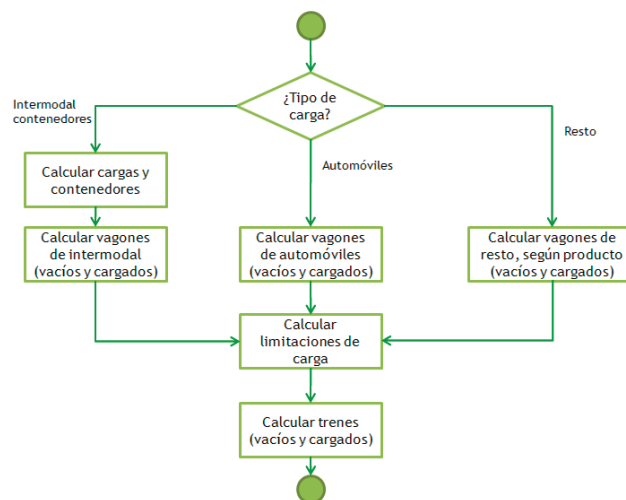


Fig. 1. Procedimiento de cálculo del número de trenes

### 2.1. Conversión de volúmenes de transporte en vagones

Para cada uno de los subgrupos de producto se tienen en cuenta los requerimientos del tipo de vagones que se necesitan para su transporte. Es decir, se considera la tara y carga máxima del vagón, el volumen que puede transportar y su longitud.

En muchos subgrupos de mercancías será preciso considerar además un “coeficiente de aprovechamiento” del vagón, ya que por ser piezas de tamaño discreto (no continuo) o por las peculiaridades de la forma del vagón, resulta imposible conseguir el 100% de la carga teórica.

En el caso de transporte de automóviles es preciso determinar cuántos vehículos caben por vagón, para lo cual se tienen en cuenta dos limitaciones, la longitud y la masa de los vehículos, siendo siempre la más restrictiva (en este tipo de transporte) la longitud.

Se asume la hipótesis, contrastada por la experiencia y la realidad actual, de que (en el tráfico de vagón completo) cada vagón cargado en una determinada relación de tráfico comporta el recorrido de ese mismo vagón vacío en la dirección opuesta. Es decir, sintéticamente, cada vagón cargado origina un vagón vacío. Ello no ocurre así en el tráfico intermodal, para el que se suponen los mismos movimientos de vagones (plataformas) en ambos sentidos.

### Transporte intermodal de contenedores

En el caso de transporte intermodal de contenedores puede definirse la carga a transportar de cuatro formas distintas:

- Toneladas del sentido más cargado.
- Toneladas y contenedores vacíos del sentido más cargado.
- Toneladas de ambos sentidos
- Toneladas y contenedores vacíos de ambos sentidos.

A partir de los datos definidos por el usuario hay que llegar a determinar las toneladas transportadas en ambos sentidos y el número de contenedores cargados y de contenedores vacíos para cada uno de los sentidos.

El número de contenedores se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de densidad y la carga máxima de los mismos.

### *2.2. Cálculo de las limitaciones de carga del tren*

Una vez se han calculado los vagones necesarios para transportar la carga, hay que agruparlos para la formación de trenes, atendiendo a ciertas limitaciones.

Las limitaciones de carga se calculan, tanto para el tren en el sentido más cargado como para el sentido menos cargado, conforme se detalla a continuación.

Las limitaciones que se tienen en cuenta son: la rampa máxima, el esfuerzo admisible en los enganches, la velocidad mínima exigida en rampa, la longitud máxima del tren y el número máximo de vagones por lote.

### Carga remolcada limitada por la rampa máxima

Una vez se conoce la rampa característica máxima de la línea, las cargas máximas se determinan consultando una tabla publicada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias en la que figura la carga máxima de las distintas locomotoras en función de la rampa característica.

Esta tabla tiene en cuenta la carga máxima arrancable en régimen máximo y por adherencia; la carga máxima remolcable en régimen continuo, unihorario y limitada por adherencia en la marcha (Estrada, 2010).

### Carga remolcada limitada por el esfuerzo admisible por los enganches

Cada vez es más frecuente el acoplamiento de locomotoras para remolcar trenes de mayor masa con el mismo consumo de capacidad de infraestructura (de surcos) y con mayor productividad del personal de conducción. Dos locomotoras acopladas en cabeza de tren posibilitan el remolque de casi el doble de carga. En estas

circunstancias tan solo la capacidad máxima del esfuerzo en el gancho limita el número de locomotoras que pueden ir en cabeza, ya que podría llegarse a la rotura del gancho del primer vagón por superar el esfuerzo de tracción al que sería sometido.

#### Carga remolcada limitada por la velocidad mínima en rampa

En los trenes de mercancías es necesario tener en cuenta la velocidad mínima en función de la tracción y de la carga. La influencia de la carga en el tiempo de recorrido es notable, especialmente en el caso de la tracción diésel. El incremento del tiempo de recorrido incide directamente en el uso de la capacidad de línea, especialmente en los casos de vía única. Por ello el administrador de infraestructuras puede establecer una velocidad mínima de circulación en rampa.

#### Carga remolcada limitada por la longitud máxima del tren

En la mayor parte de las líneas ferroviarias existe una limitación de longitud derivada de la capacidad de estacionamiento de las vía de apartado en las que los trenes de mercancías deben situarse para facilitar el cruce y adelantamiento con otros trenes que circulan por la línea o entre ellos mismos. Esta limitación también existe en líneas dotadas de vía doble por los adelantamientos, establecimiento de vías únicas temporales por trabajos o estacionamiento de trenes averiados.

Normalmente es el gestor de la infraestructura el que establece la limitación de la longitud, indicándola en la Declaración sobre la red.

#### Carga remolcada limitada por el número máximo de vagones por lote

El cliente puede establecer el número máximo de vagones a transportar en cada tren, por ejemplo por las características de los apartaderos de carga o descarga, y dicha limitación se debe considerar a la hora de efectuar el transporte.

### *2.3. Cálculo del número de trenes*

Conocido el número de vagones a transportar y los vagones por tren, según las limitaciones anteriormente calculadas, se determina el número de trenes para el sentido más cargado.

A partir del número de trenes cargados se determina el número de trenes vacíos teniendo en cuenta el “factor logístico” (trenes vacíos/trenes cargado) definido por el usuario, que indica cuántos trenes vacíos hay por cada tren cargado.

## **3. Caso de ejemplo de utilización de la herramienta**

A continuación se desarrolla un caso de ejemplo en el que se muestra la agrupación de la carga anual en vagones y trenes cargados y vacíos considerando las limitaciones de carga y variándose algunos parámetros del tren y la infraestructura. Para los mismos casos se realiza un análisis de sensibilidad del consumo de energía y costes.

### *3.1. Parámetros de la simulación*

A continuación se detallan los productos, líneas y material motor y remolcado que se han empleado para realizar las simulaciones.

#### Productos

Se han empleado dos productos de mercancías, los automóviles como representativos de mercancías “ligeras”, de baja densidad de carga, y siderúrgicos planos, como muestra de productos “densos”.

En el caso de los automóviles se ha supuesto una carga anual de 5.000.000 vehículos y para los siderúrgicos de 5.000.000 toneladas.

### Líneas

Para realizar las simulaciones se han empleado dos líneas, una representativa de los trazados montañosos, León-Gijón, y otra de perfil más llano, Valladolid-León.

La línea León-Gijón tiene una longitud de 171,6 km y la rampa característica máxima es en el sentido León-Gijón de 23 milésimas y en el opuesto de 22 milésimas.

La línea Valladolid-León tiene una longitud de 171,2 km y la rampa características máxima es en el sentido Valladolid-León de 12 milésimas y en el contrario 10 milésimas.

Se ha supuesto que los trenes cargados circulan de Gijón hasta León y desde Valladolid a León y los vacíos lo hacen en el sentido opuesto.

### Material

Para traccionar los trenes simulados se han empleado la locomotora diésel serie 333.300 y la eléctrica serie 250, ambas utilizadas habitualmente en el transporte de mercancías en España.

La locomotora eléctrica 250 no dispone de freno regenerativo, pero como se ha querido tener en cuenta el efecto de esta tecnología, se han realizado simulaciones suponiendo su existencia.

En la tabla se muestran las características principales de las máquinas empleadas y las cargas que pueden remolcar en rampa, conforme a (Adif, 2010).

Tabla 1. Características de las locomotoras empleadas para la simulación

		<b>333.300 Diésel</b>	<b>250 Eléctrica</b>
Fabricante		Vossloh	MTM-CAF
Rodaje		Co'Co'	C'C'
Tara	<i>t</i>	120	124
Longitud	<i>m</i>	22,330	20,000
Potencia	<i>kw</i>	2.237	4.600
Carga remolcable en rampa de 0 mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 5 mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 10 mm/m	<i>t</i>	1.950	2.090
Carga remolcable en rampa de 15 mm/m	<i>t</i>	1.410	1.530
Carga remolcable en rampa de 20 mm/m	<i>t</i>	1.100	1.190
Carga remolcable en rampa de 25 mm/m	<i>t</i>	880	970

Para el transporte de automóviles se han empleado las plataformas de dos pisos MA 5 y para el transporte de siderúrgicos planos los vagones portabobinas con toldo deslizante JJ92.

Tabla 2. Características de los vagones empleados para la simulación

		MA5 Porta automóviles 2 pisos	JJ92 Portabobinas toldos deslizantes
Ejes		4	4
Carga máxima (t)	t	22	65
Tara media(t)	t	28	25
Peso por eje (t)	t	12	23
Longitud entre topes (m)	m	27	12
Longitud interior caja (m)	m	52	11
Altura máxima interior (m)	m	4	3
Anchura máxima interior (m)	m	3	3
Velocidad máxima (km/h)	km/h	100	120

### Unidades

Las emisiones se han medido en kilogramos de dióxido de carbono por tonelada neta kilómetro y los costes de explotación en céntimos de euro por tonelada neta kilómetro. En todos los casos se tienen en cuenta los recorridos en vacío, ya que como hipótesis se ha establecido que todo tren cargado genera un tren vacío con un número de vagones inferior o igual que viene determinado por el coeficiente de vacíos. A este coeficiente se le ha dado el valor de 0,8 en transporte de automóviles y 1 para los siderúrgicos planos.

Los costes de explotación contemplan los costes de alquiler o amortización y mantenimiento de las locomotoras y vagones; canon por el uso de la infraestructura; costes de operación en los que se incluyen los costes de personal y de energía.

### 3.2. Determinación de la capacidad de la infraestructura consumida

A continuación se muestran y analizan los resultados obtenidos de agrupación de carga en vagones y trenes, variando algunos parámetros del tren y de la infraestructura.

#### Simulación del transporte de automóviles

La limitación de carga en el caso de transporte de automóviles no es la masa sino la longitud de los mismos. Las limitaciones por “carga en rampa máxima”, “velocidad mínima en rampa” y “esfuerzo de los enganches” son siempre menos restrictivas que la de longitud máxima del tren. Por ello, en este caso tiene sentido analizar la sensibilidad al tipo de tracción y a la longitud del tren y no a la carga por eje.

#### *Tipo de tracción en trenes ligeros*

Se realizan los cálculos para ambas líneas, con locomotora eléctrica y diésel, como hipótesis de simulación se ha supuesto que la carga por eje es 22,5 toneladas, la longitud máxima del tren 450 metros y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 3. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Vagones cargados/año	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos/año	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados/año	28.381	28.381	28.381	28.381
Trenes vacíos/año	28.381	28.381	28.381	28.381
Vagones tren cargado	15	15	15	15
Vagones tren vacío	12	12	12	12
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/ masa tren cargado	0,2462	0,2475	0,2462	0,2475
Carga neta/(masa tren cargado + masa tren vacío)	0,1503	0,1513	0,1503	0,1513

Como puede observarse, en caso de trenes ligeros el número de vagones admisibles por tren es el mismo en ambas líneas y con los dos tipos de tracción, pues la condición restrictiva es la longitud máxima del tren.

#### *Longitud máxima del tren en trenes ligeros*

Se muestran a continuación los cálculos para longitudes máximas de tren de 450, 600 y 750 m, en ambas líneas con la locomotora eléctrica 250, considerándose como hipótesis de simulación que la carga por eje es de 22,5 t y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 4. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la longitud máxima admisible del tren

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón	León-Gijón
Longitud máxima	450	600	750	450	600	750
Vagones cargados/año	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos/año	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados/año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Trenes vacíos/año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Vagones tren cargado	15	21	27	15	21	26
Vagones tren vacío	12	16,8	21,6	12	16,8	20,8
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/ masa tren cargado	0,2462	0,2590	0,2667	0,2462	0,2590	0,2656
Carga neta/ (masa tren cargado+ masa tren vacío)	0,1503	0,1600	0,1659	0,1503	0,1600	0,1651

Puede observarse que en ambas líneas el aumento de la longitud de máxima admisible del tren supone incrementar el número de vagones que puede llevar el tren y por ello reducir el número de trenes y el uso de la capacidad de la infraestructura.

#### Simulación del transporte de siderúrgicos planos

En el transporte de mercancías “densas” las limitaciones de carga del tren son la carga máxima en rampa, la fuerza de los enganches y la carga admisible para mantener la velocidad mínima en rampa establecida. Sin



embargo, la limitación de longitud del tren es siempre la menos restrictiva. Por ello a continuación se muestran los resultados de vagones y trenes con distintos tipos de tracción y carga por eje.

*Tipo de tracción en trenes “densos”*

Se han simulado en ambas líneas trenes remolcados por la locomotora eléctrica y la diésel, como hipótesis se ha supuesto que la carga por eje es de 22,5 toneladas, la fuerza de los enganches 360 kN y la longitud máxima del tren 600 metros.

*Tabla 5. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Vagones cargados/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados/año	3.389	3.698	6.779	7.395
Trenes vacíos/año	3.389	3.698	6.779	7.395
Vagones tren cargado	24	22	12	11
Vagones tren vacío	24	22	12	11
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Rampa max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6686	0,6665	0,6330	0,6293
Carga neta/(masa tren cargado+ masa tren vacío)	0,5022	0,4998	0,4631	0,4591

Puede observarse que en ambas líneas los trenes remolcados por la máquina eléctrica pueden remolcar mayor número de vagones, esto es debido a que el factor que limita la carga del tren es la carga remolcable en rampa máxima y la máquina eléctrica puede remolcar mayor carga que la diésel. Si se comparan los resultados de ambas líneas se aprecia que los trenes de León-Gijón llevan la mitad de vagones los de Valladolid-León pues el perfil de esta última línea es mucho más favorable.

El mismo análisis se muestra a continuación en el caso de que los trenes sean remolcados por dos locomotoras.

*Tabla 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300
Vagones cargados/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados/año	2.805	2.805	6.257	6.257
Trenes vacío/año	2.805	2.805	6.257	6.257
Vagones tren cargado	29	29	13	13
Vagones tren vacío	29	29	13	13
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0.6449	0,6467	0,5807	0,5841
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0.4759	0,4779	0,4092	0,4125



Estos trenes no llevan el doble de carga que los remolcados por una única máquina debido a que están condicionados por la fuerza de los enganches.

#### *Carga por eje en trenes “densos”*

Para estudiar la influencia de la carga por eje en trenes densos se han considerado cargas por eje de 20, 22,5 y 25 t y se ha empleado la máquina eléctrica, suponiéndose que la fuerza de los enganches es de 360 kN y la longitud máxima de los trenes es 600 m

*Tabla 7. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón	León-Gijón
Carga por eje	20	22,5	25	20	22,5	25
Vagones cargados/año	96.219	81.347	70.457	96.219	81.347	74.129
Vagones vacíos/año	96.219	81.347	70.457	96.219	81.347	74.129
Trenes cargados/año	3.564	3.389	3.355	7.401	6.779	6.739
Trenes vacíos/año	3.564	3.389	3.355	7.401	6.779	6.739
Vagones tren cargado	27	24	21	13	12	11
Vagones tren vacío	27	24	21	13	12	11
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Ramapa max	Ramapa max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6348	0,6686	0,6946	0,5987	0,6330	0,6484
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0,4650	0,5022	0,5321	0,4272	0,4631	0,4797

Puede observarse que conforme se incrementa la carga por eje van siendo necesarios menos trenes al año y con un menor número de vagones y de trenes, pues cada vagón puede transportar mayor carga.

El mismo análisis se realiza con doble tracción.

*Tabla 8.. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje en doble*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León
Carga por eje	20	22,5	25
Vagones cargados/año	96.219	81.347	74.129
Vagones vacíos/año	96.219	81.347	74.129
Trenes cargados/año	3.007	2.805	2.746
Trenes vacíos/año	3.007	2.805	2.746
Vagones tren cargado	32	29	27
Vagones tren vacío	32	29	27
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6112	0,6449	0,6617
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0,4401	0,4759	0,4944

Vuelve a apreciarse que la doble tracción no supone duplicar la carga transportada por cada tren pues esta se encuentra limitada por la fuerza de los enganches.

### *3.3. Análisis de sensibilidad del coste y emisiones tráfico de mercancías a parámetros de la infraestructura y el tren*

Para mostrar la funcionalidad de la herramienta se ha desarrollado con ella un estudio complementario sobre la sensibilidad de los costes económicos y las emisiones de dióxido de carbono a la variación de parámetros

característicos de la infraestructura, como la longitud admisible de los trenes y la carga por eje; y a la variación de la tracción (diésel o eléctrica, simple o doble).

### Simulación del transporte de automóviles

Se analiza a continuación la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y a la longitud del tren.

#### *Tipo de tracción en trenes ligeros*

Como se puede observar en la siguiente figura, en el caso de la línea León-Gijón las emisiones de CO<sub>2</sub> de la máquina eléctrica con freno regenerativo son muy inferiores a las de la misma máquina sin freno regenerativo. Esta diferencia es debida a las fuertes pendientes que presenta esta línea, en las que es necesario frenar para no superar la velocidad máxima admisible y por ello se puede regenerar más energía. Sin embargo, si se realiza la misma comparación en la línea Valladolid-León las emisiones son bastante similares.

En ambas líneas las emisiones del tren remolcado por la máquina diésel aproximadamente tres veces superiores a las de la tracción eléctrica, como ya señalaba (García Álvarez, 2009). En la línea León-Gijón las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son 0,0379 kgCO<sub>2</sub>/tneta.km frente a los 0,0937 kgCO<sub>2</sub>/tneta.km del tren diésel.

En cuanto a los costes de explotación, los del tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo son algo menores que los del remolcado por la máquina sin freno regenerativo (en la línea Valladolid-León 9,906 c€/tneta.km y 9,962 c€/tneta.km respectivamente) debido al menor consumo neto de energía. Los costes del tren diésel son siempre superiores debido al mayor coste de mantenimiento de estas máquinas y de la energía, y a que la máquina diésel puede remolcar menos toneladas por lo que son necesarios más trenes para realizar el mismo transporte.

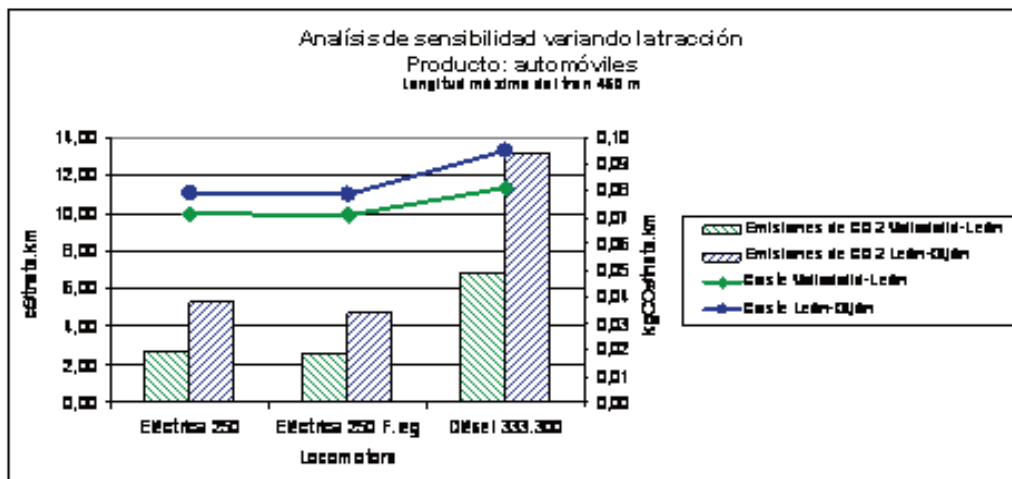


Fig. 2. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

#### *Longitud máxima del tren en trenes ligeros*

Los resultados de la simulación muestran que en ambas líneas al incrementarse la longitud del tren se produce una pequeña disminución de las emisiones. Sin embargo, el efecto de este factor se aprecia en los costes que decrecen considerablemente al incrementarse la longitud. Ello es debido a que los costes de las locomotoras, personal y canon por el uso de la infraestructura se mantienen y se dividen entre un mayor número de toneladas netas transportadas. Un incremento de la longitud del tren del 33% supone una reducción de costes del 19% en la línea Valladolid-León y del 17% en la línea León-Gijón.

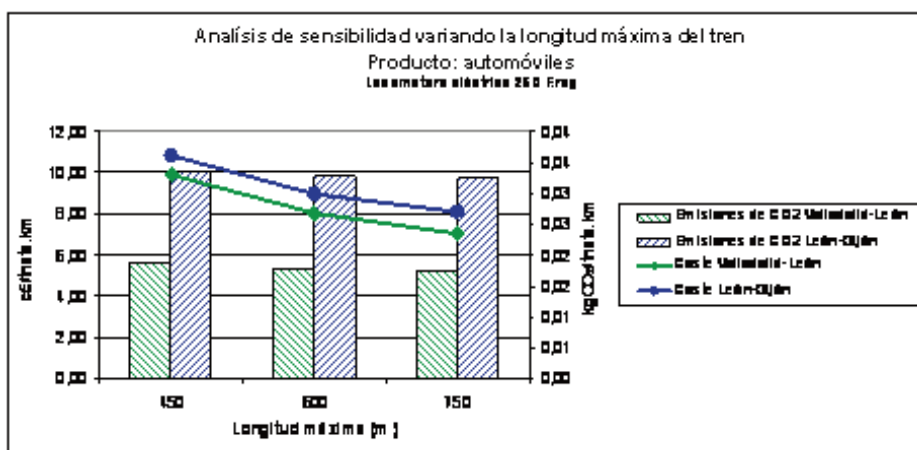


Fig. 3. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la longitud máxima admisible del tren

### Simulación del transporte de siderúrgicos planos

A continuación se estudia la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y la carga por eje.

#### Tipo de tracción en trenes densos

Las emisiones de CO2 en la línea montañosa (León-Gijón) son siempre superiores a las de la línea llana (Valladolid-León), debido al trazado más desfavorable que presenta la primera y a la necesidad de frenar en las pendientes. Por la misma razón que se expuso en el caso del transporte de automóviles, las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son inferiores a las del tren eléctrico sin freno regenerativo. Las emisiones del tren diésel son muy superiores a las del eléctrico; por ejemplo en la línea León-Gijón 0,0098 kgCO2/teta.km para el tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo y 0,0271 kgCO2/teta.km para el tren traccionado por la máquina diésel.

Los costes de explotación del tren eléctrico son siempre inferiores a los del tren diésel (2,659, 2,598 y 3,455 c€/teta.km respectivamente). Si se comparan los costes en ambas líneas se puede apreciar que son muy superiores en la línea León-Gijón (en el caso de tracción eléctrica sin freno regenerativo 1,468 c€/teta.km frente a 2,659 c€/teta.km), ello es debido a que las limitaciones de carga por rampa máxima, que son las que este caso determinar el tamaño del tren, son más restrictivas en esta línea y por lo tanto se requiere un mayor número de trenes para realizar el transporte, lo que implica mayores costes de explotación por tren.km y consecuentemente por tonelada neta.km.

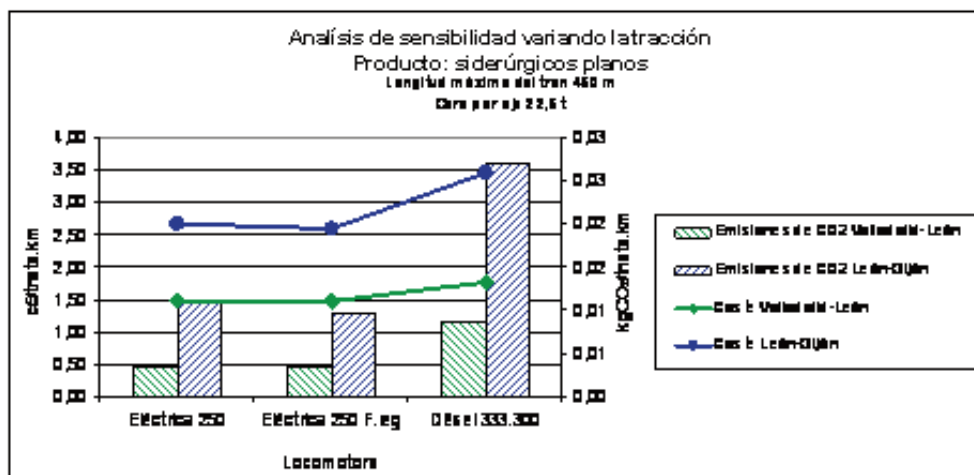


Fig. 4. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción

A continuación se ha estudiado el efecto que tiene el empleo de doble tracción, que permite remolcar mayores cargas. Los costes aumentan en mayor proporción que la carga que se puede transportar que no llega al doble pues aparece una limitación por el esfuerzo que admiten los enganches.

Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.

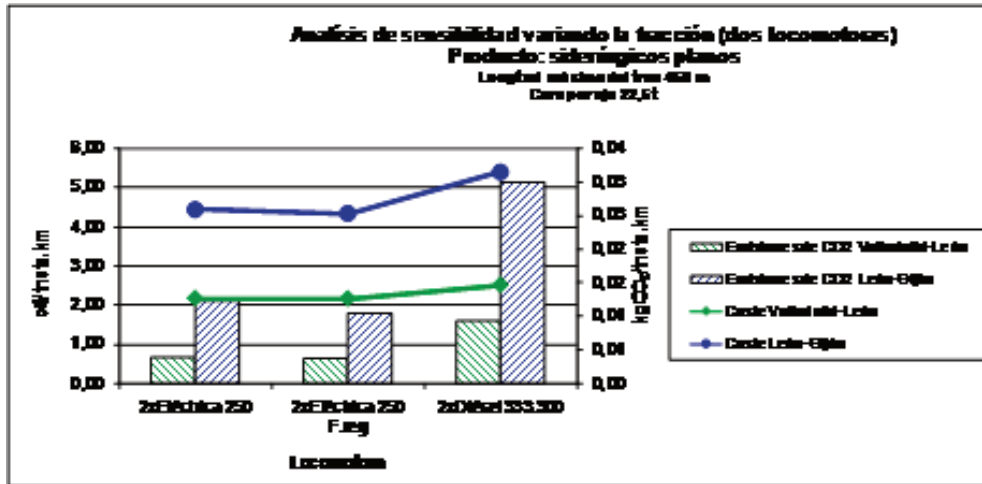


Fig. 5. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción

*Carga por eje en trenes densos*

Como se observa en la gráfica el incremento de la carga por eje admisible supone en este producto una reducción de los costes de explotación y de las emisiones, aunque esta última no es muy significativa. Un incremento del 11% de la carga por eje se traduce en una reducción de las emisiones del 7% y un 10% de los costes.

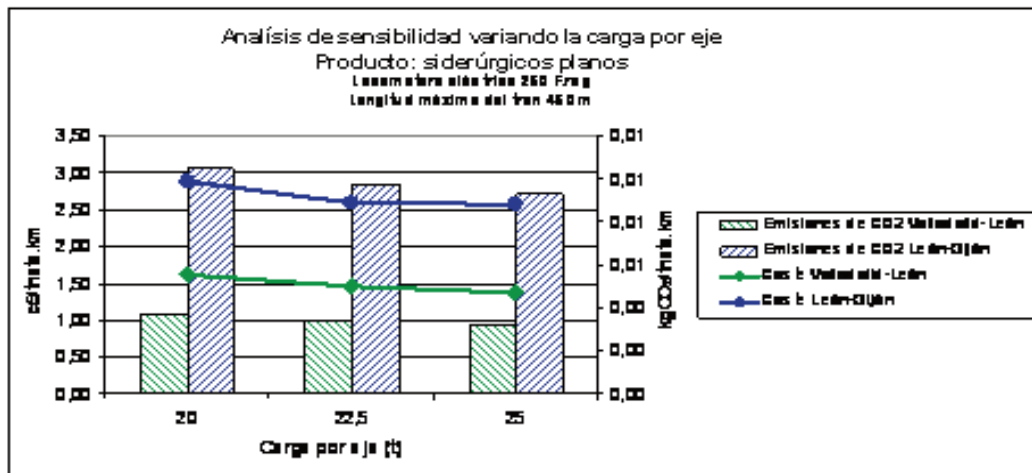


Fig. 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje

3.4. Conclusiones

1. La herramienta de simulación presentada permite a partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes.

2. Adicionalmente, PlanCargoRail obtiene el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

En cuanto al caso ejemplo mostrado, se pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La distribución de la carga en vagones depende de las características de estos y los coeficientes de densidad y aprovechamiento; la distribución de los vagones en trenes depende de numerosos factores: unos de infraestructura (rampa, electrificación, carga por eje...); otros del tren (tracción, fuerza de los enganches) y otros de la explotación (velocidad mínima en rampa). Según los casos unos u otros inducen una caracterización del tren muy diferente.

2. Los costes de explotación y las emisiones de los trenes remolcados por máquina diésel están siempre muy por encima de los de los trenes remolcados por máquinas eléctricas, por lo que su uso solo está justificado en el caso de líneas no electrificadas.

3. El incremento de la longitud admisible de los trenes, despliega sus efectos positivos para trenes de productos ligeros y vacíos y afecta principalmente a los costes de explotación, con una reducción en torno al 18% al realizarse un incremento de la longitud del 33%.

4. La doble tracción para remolcar trenes muy pesados supone un incremento de los costes y las emisiones que no llega a ser el doble de los trenes traccionados por una única locomotora. Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.

5. El incremento de la carga por eje es interesante en el caso de trenes densos pues supone una reducción de los costes y las emisiones. Un incremento del 11% de la carga por eje supone una reducción de las emisiones del 7% y de los costes del 10%.

#### **4. Agradecimientos**

La autora quiere expresar su agradecimiento a Alberto García, Vicente Rallo, Lorenzo Jaro, Ismael Borregón, Cristina Barbero, Juan Miguel Sastre y Eduardo Pilo.

#### **5. Referencias bibliográficas**

[1] ADIF (2010). Cuadro de cargas máximas. Adif, Madrid.

[2] ESTRADA GUIJARRO, J. (2010). Conceptos generales de gestión de capacidad. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios.

[3] RALLO GUINOT, V. (2008). Monografía del Observatorio del Ferrocarril. Costes del transporte de mercancías por ferrocarril. Una primera aproximación para su estudio sistemático Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

[4] FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES e IDAE (2010). Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

[5] GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril. Revista Anales de mecánica y electricidad, enero-febrero 2009.