

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad

Estimating the energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO₂) in freight trains and variability analysis

Ignacio González Franco

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

Resumen

En este artículo se caracterizan y se comparan el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que se producen en el transporte de mercancías por tren.

En la estimación del consumo de energía de los modos de transporte suelen emplearse valores medios genéricos; pero así como los valores medios pueden, con muchas limitaciones, ser útiles en camiones o aviones, en el ferrocarril no lo son, debido a la enorme variabilidad de estos consumos. La variabilidad del consumo en el ferrocarril obedece a que los trenes son diferentes entre sí en cuanto al tamaño y tipos de tracción (eléctrica o diesel). Además, las líneas ferroviarias también presentan importantes diferencias, debido a la existencia de distinta severidad en los perfiles, el número de paradas y las velocidades.

Este estudio, demostrará la variabilidad mencionada, indicará que variables provocan esta variación y dará un orden de magnitud al consumo y emisiones generado por los diferentes trenes de mercancías.

Palabras clave: Emisiones de CO₂, carga neta, petroquímico, porta-automovil, perfil de línea

Abstract

This paper characterizes and compares energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO₂) produced in the transport of freight by rail. Average generic values are often used in estimating the energy consumption of transport modes, but while average values can, with many limitations, be useful in trucks or aircraft, this is not the case on the railway, due to the enormous variability in this consumption. The variability of fuel consumption on the railway is due to the fact that trains are different from each other in size and types of traction (electric or diesel). Furthermore, railways also have important differences, due to the differing severity in profiles, the number of stops and speeds.

This study will demonstrate the variability mentioned, also will indicate which factors cause a variation in energy consumption and emissions of the different freight trains, which are the parameters that have a higher incidence and their order of magnitude.

Keywords: Emissions of CO₂, net tons; bulk petrochemicals, cars, profile

1. Introducción

En el sector de transporte de mercancías por ferrocarril se produce un consumo de energía especialmente intensivo y sobretodo muy variable, es decir dependiendo de la carga que se transporta, el tipo de tracción utilizado, el número de trayectos que se realizan en vacío y el perfil de línea, se producen consumo y emisiones de CO₂ de diferente magnitud.

En este artículo se caracterizan y se comparan el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) que se producen en el transporte de mercancías por tren. En la estimación del consumo de energía de los modos de transporte suelen emplearse valores medios genéricos; pero así como los valores medios pueden, con muchas limitaciones, ser útiles en camiones o aviones, en el ferrocarril no lo son, debido a la enorme variabilidad de estos consumos. La variabilidad del consumo en el ferrocarril obedece a que los trenes son diferentes entre sí en cuanto al tamaño y tipos de tracción (eléctrica o diesel) (García Álvarez, 2011b). Además, las líneas ferroviarias también presentan importantes diferencias, debido a la existencia de distinta severidad en los perfiles, el número de paradas y las velocidades.

En otros medios de transporte, esta variabilidad es muy baja, los consumos y emisiones se mantienen en un rango pequeño, como es el caso del transporte por carretera, en el que el consumo no varía demasiado de unos tipos de camiones a otros y no les afecta excesivamente la carga que es transportada.

Debida a estas razones, se considera que es importante indicar qué factores provocan esta variación, cuáles son los parámetros que tienen una mayor incidencia y el orden de magnitud de los mismos, para poder demostrar la existencia de una gran variabilidad.

El conocimiento de un orden de magnitud del consumo de energía, para cada tipo de producto y de tracción, permitirá mejorar la eficiencia del transporte de mercancía, generará un beneficio social y medioambiental y además aportará una herramienta que influirá en la toma de decisiones del operador, permitiendo una reducción en sus costes de explotación.

2. Metodología empleada e hipótesis de cálculo

La energía consumida por los vehículos puede descomponerse en cuatro puntos de control (García Álvarez, 2011b)

- Energía “útil”. Es la consumida por el movimiento de los trenes, más la energía consumida para los servicios auxiliares, medida en llantas del vehículo.

- Energía “final” que entra al tren. Es el resultado de sumar la energía “útil”, con la energía que se pierde en los procesos de transformación que se producen dentro de la locomotora (cadena de tracción, generación de la energía embarcada...).

- Energía suministrada al sistema ferroviario. Es diferente a la anterior en casos en los que se requiere un transporte o almacenamiento previo a la entrada de la energía en el vehículo.

- Energía “primaria”. Es el resultado de sumar a la energía del punto anterior, la que se pierde en los procesos de extracción, transporte, generación y de conversión que se producen desde fuentes primarias de energía hasta el punto de entrega al sistema ferroviario (pérdidas de extracción, refino, transporte, generación de electricidad...).

Debe señalarse que el consumo de energía “útil” se puede producir en varias fases o etapas del ciclo de uso de los vehículos. Entre ellas, la más importante es aquella en la que el vehículo se está moviendo para realizar el transporte “crucero”.

2.1. Modelo de cálculo del consumo energético

El cálculo de la energía consumida por un vehículo para su movimiento puede hacerse:

- Por integración de las fuerzas que en cada instante actúan sobre él, modelos “de arriba a abajo”
- Por el balance de energía en un recorrido, modelo “de abajo a arriba”

El primer enfoque es más preciso y resulta más útil para diseño de conducción económica, o el dimensionamiento del sistema eléctrico (en general de cualquier proceso que requiera conocer los consumos

instantáneos) pero no facilita información sobre la desagregación del consumo por cada una de las causas que lo producen, que es precisamente la ventaja de segundo procedimiento, y la razón por la que se emplea este procedimiento de balance de energía en este estudio.

En el segundo enfoque para calcular el total de la energía suministrada al vehículo, se estudia un “recorrido circular” con el vehículo en el origen y en el final parado (con velocidad inicial y final igual a cero). De esta manera, la energía potencial en el conjunto del recorrido no varía (es tanta la altura que ha ganado el vehículo como la que ha perdido), ni tampoco cambia la energía cinética. Entonces, no hay variación de la cantidad de energía almacenada en el vehículo en el conjunto del viaje de ida y vuelta; y por ello, la energía que ha entrado al vehículo (más las pérdidas) es igual a la que ha salido del mismo; y la energía que ha entrado (energía “final”) se puede calcular a través de la energía que ha salido (energía “útil”).

Se puede esquematizar el funcionamiento energético del movimiento del tren sabiendo que en cada instante, el tren debe vencer una fuerza que se opone a su avance, y recibir además energía necesaria para aumentar su velocidad, o su altura; y que en algunos tramos cede una cantidad de energía, como consecuencia de una reducción de su velocidad o pérdida de altura.

Por lo tanto, en su movimiento (y con independencia del consumo de energía para los servicios auxiliares), los trenes reciben energía fundamentalmente:

- Para vencer la resistencia al avance (depende de la masa del tren, de su velocidad, de que circule en cielo abierto o en túnel, de las curvas, de la cantidad de aire que entra en el tren y del viento) (García Álvarez, 2011a).

- Para incrementar su velocidad, tanto en el origen del viaje como después de cada parada; y, en general, en cada uno de los puntos en que se aumenta la velocidad. Un incremento de la velocidad del tren requiere una importación de energía, pero conlleva un aumento de la energía cinética acumulada en él.

- Para aumentar su altitud: cada vez que el tren supera una rampa, su altitud aumenta y por ello recibe una cierta cantidad de energía que acumula en forma de energía potencial.

Por el contrario, los trenes ceden energía:

- Cuando reducen su velocidad, tanto en una parada como en cualquier momento en que el tren pasa de una velocidad mayor a una velocidad menor (por ejemplo, en una limitación de velocidad), se produce una cesión de energía cinética

- Cuando pierden altitud al circular por una pendiente, ya que entonces disminuye la energía potencial.

En definitiva, el consumo de energía final (importada en pantógrafo) puede calcularse a partir de la siguiente expresión

$$E_{\text{Nantas}} = E_{\text{Ravance}} + E_{\text{cinética}} + E_{\text{potPendientes}} + E_{\text{PorDifAlturas}} + E_{\text{aux}} \quad (1)$$

$$E_{\text{Ravance}} = \left((A + A_c) \times M + B \times V_{\text{med}} + \left(\overline{V^2} + \delta_v^2 \right) \right) \times L_{\text{linea}} \times \frac{1}{360} \quad (2)$$

$$E_{\text{cinética}} = \frac{N_{\text{paradas}}}{3,6^3 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{2} \times (M_{\text{carg}} + M_{\text{rot}}) \times V_{\text{med}}^2 - \left(\frac{A \times V_{\text{med}}^2}{2 \times d} + \frac{B \times V_{\text{med}}^3}{3 \times d} + \frac{C \times V_{\text{med}}^4}{4 \times d} \right) \times \frac{1}{10^2} \right) \quad (3)$$

$$E_{\text{potPendientes}} = M_{\text{carg}} \times g \times \sum \left(\frac{(P_{\text{real}} - P_{\text{equilibrio}}) \times l_{\text{pendiente}}}{L_{\text{linea}}} \right) \times \frac{1}{3.600} \quad (4)$$

$$E_{\text{PorDifAlturas}} = M_{\text{carg}} \times g \times (h_f - h_i) \times \frac{1}{3.600} \quad (5)$$

$$E_{aux} = Pot_{aux} \times T_{viaje} \times 0,7 \quad (6)$$

Donde: L_{linea} es la longitud total del recorrido (km), A coeficiente de resistencia a la rodadura por fricción mecánica (daN/t), A_c coeficiente de resistencia a la rodadura en curvas (daN/t), M_{carg} masa cargado del vehículo (t), M_{rot} masa rotativas del vehículo (t), B coeficiente de entrada del aire (daN/(km/h)), V_{med} velocidad media del vehículo (km/h), C coeficiente de resistencia aerodinámica (daN/(km/h)²), δ desviación típica respecto a la media (excluyendo tiempos de parada), d deceleración disponible por el tren (m/s²), $N_{paradas}$ número de paradas que tiene la línea, P_{real} pendiente real en la que se encuentra el vehículo (mm/m), $P_{equilibrio}$ pendiente de equilibrio (mm/m), $l_{pendiente}$ longitud de la pendiente (km), g aceleración de la gravedad, 9.8 (m/s²), hf altura final del trayecto (m), h_i altura inicial del trayecto (m), Pot_{aux} Potencia de los auxiliares (kW), T_{viaje} Tiempo de viaje .

La influencia de cada uno de los consumos (y por ello de las variables que inciden sobre ellas) es muy diferente según el tipo de servicio, por lo que resulta útil presentar algunos casos concretos, lo que permite evaluar el valor absoluto y peso relativo de cada uno de estos consumos.

Para tratar de orientar sobre la importancia de cada una de las variables que inciden en el consumo de un vehículo, se han aplicado las fórmulas anteriores a trenes de mercancías (de diversos productos y diferente tracción).

2.2. Hipótesis de cálculo

Para el cálculo tanto del consumo de energía como para las emisiones de CO₂, los indicadores utilizados son:

1. Energía en barras de la central de generación (eléctrica): es la energía eléctrica medida a la salida de la central generadora de energía eléctrica. Se calcula con la energía que entra en la subestación del ferrocarril multiplicada por el coeficiente de pérdidas en el transporte y la distribución de la electricidad (Pilo de la Fuente, Eduardo & Pérez Arriaga, 2009) .
2. Energía suministrada al vehículo en el tren diesel: es la energía consumida por el vehículo. En este caso, toda la energía consumida es de origen fósil (Lopez Martínez, Sánchez Alejo, Gómez, & Fernández, 2009).
3. Emisiones de CO₂: se calculan a partir de la energía en barras de la central de generación (tracción eléctrica) o en pozo de petróleo (tracción diesel). Para el cálculo se multiplican los kWh consumidos por los gramos de CO₂ emitidos por kWh (en España, 2009, 233 gramos de CO₂ por kilovatio-hora) (Observatorio de la electricidad 2009); o los litros de gasóleo por el factor de emisiones (2.633 gramos de CO₂ por litro) y se añaden las emisiones en el proceso “well to tank” (14,58 g/MJfinal)

Las unidades utilizadas (tanto para la energía en barras de la central como en boca del depósito) son kWh/ (tonelada_neta•kilómetro); y las unidades utilizadas para las emisiones de dióxido de carbono son gramos de CO₂ por tonelada_neta•kilómetro.

En el sector de transporte de mercancías por ferrocarril se produce un consumo de energía especialmente intensivo y muy variable. El consumo varía dependiendo de la carga que se transporta, el tipo de tracción utilizado, el número de trayectos que se realizan en vacío, del perfil de línea. Para cada valor de cada uno de ellos se producen consumos de energía y gases de efecto invernadero de diferente magnitud.

En otros modos de transporte, esta variabilidad es menor: los consumos y emisiones se mantienen en un rango reducido, como es el caso del transporte por carretera, en el que el consumo no varía demasiado de unos tipos de camiones a otros y no les afecta excesivamente el tipo de carga que se transporta.

Debido a estas razones, es importante indicar qué factores provocan esta variación y cuáles son los parámetros que tienen una mayor incidencia así como el orden de magnitud de los mismos. Se han simulado los consumos de diversos tipos de trenes con distintas locomotoras, productos transportados y tamaños para obtener una idea de los consumos en cada caso.

3. Características de los trenes, material y de las líneas

A continuación se muestran las características del material rodante utilizado en la simulación, las líneas que se consideran representativas y el tipo de vagones utilizados.

Las máquinas utilizadas han sido, una locomotora diésel de la serie 335 y una eléctrica de la serie 251 de Renfe, cuyas características principales se resumen en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Características de locomotora diésel 335

Tipo	Diésel	
Masa (t)	124	
Longitud (m)	23,0	
Potencia (kW)	3.178	
Ejes	6	
Velocidad máxima teórica (km/h)	160	
Tensión (V)	No	
Esfuerzo máximo en el arranque (kN)	400	
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

Tabla 2. Características de locomotora eléctrica 251

Tipo	Diésel	
Masa (t)	138	
Longitud (m)	20,7	
Potencia (kW)	4.650	
Ejes	6	
Velocidad máxima teórica (km/h)	100	
Tensión (V)	3000	
Esfuerzo máximo en el arranque (kN)	453	
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

3.1. Tipos de mercancía (productos) y vagones

Los tipos de mercancías (productos) a transportar para los que se ha hecho la simulación son: automóviles, graneles, siderúrgicos planos y petroquímicos. Para el transporte de cada uno de ellos se han empleado los vagones de uso más extendido para el producto concreto, cuyas características se muestran en las siguientes tablas (Rallo Guinot, 2010)

Tabla 3. Características vagones empleados en el estudio

Vagón MA5 2p transporte de automóviles		Vagón TT5 para transporte de graneles	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	22,0	Carga máxima (t)	54,5
Tara media (t)	27,7	Tara media (t)	25,5
Longitud entre topes (m)	27,00	Longitud entre topes (m)	14,24
Longitud interior caja (m)	52,20	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	100	Velocidad máxima (km/h)	100
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360
Vagón JJ92 para transporte de siderurgicos		Vagón RR92 para transporte de Petroquímicos	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	71,0	Carga máxima (t)	65,5
Tara media (t)	25,3	Tara media (t)	24,5
Longitud entre topes (m)	12,04	Longitud entre topes (m)	16,74
Longitud interior caja (m)	10,80	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	120	Velocidad máxima (km/h)	120
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360

Fuente: Elaboración propia

3.2. Líneas recorridas

La simulación de todas las composiciones se ha realizado para dos líneas: una con un perfil suave (Valladolid-León), y otra de perfil montañoso (León-Gijón).

La línea de Valladolid-León tiene una rampa característica 12 milímetros por metro (mm/m), está electrificada a 3 kilovoltios en corriente continua, permite una velocidad máxima de servicio de 100 km/h y no tiene paradas intermedias. La velocidad media en la marcha, tanto para los trenes de mercancías eléctricos como para los diesel, es de 70 km/h, similar a la que obtienen en la práctica los trenes de mercancías en España.

La línea León-Gijón con una rampa característica de 22 mm/m está también electrificada a 3 kilovoltios en corriente continua, siendo la velocidad máxima del servicio de 100 km/h. Se ha simulado sin paradas intermedias. La velocidad media observada es de 70 km/h, similar a la que obtienen en la práctica los trenes de mercancías en España (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2009)

Tabla 4. Principales características de las líneas

		Perfil			
		Suave		Montañoso	
Línea		Valladolid-León		Gijón-León	
Paridad		Par	Impar	Par	Impar
Longitud	(km)	171,2	171,2	171,6	171,6
Longitud túneles	(km)	7,17	7,17	7,19	7,19
Factor de túnel		1,2	1,2	1,2	1,2
Tensión de Alimentación	(kV)	3kV CC	3kV CC	3kV CC	3k CC
Diferencia de Altitud	(m)	-143	143	833	-833
Coefficiente de curvas		0,4	0,4	1,2	1,2
Exceso de alturas		308	525	1.878	5.908,6
Paradas técnicas		1	1	1	1
Velocidad máxima de servicio	(km/h)	100	100	100	100
Velocidad media de servicio	(km/h)	70	70	70	70
Paradas equivalentes por reducción de velocidad		1,39	1,39	3,99	4,06
Rampa característica máxima	(mm/m)	10	12	23	22

Fuente: Elaboración propia

4. Calculo de la energía y emisiones de los diferentes trenes de mercancías en una línea con un perfil suave

En este apartado se cuantifica el consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías, para cada uno de los productos (porta-automóviles, petroquímicos, graneles y siderúrgicos) para cada tipo de tracción (tabla 2 y 3) y para una línea de perfil suave.

El consumo y emisiones se calculan en función de las toneladas netas y los kilómetros del recorrido, es decir se varía la carga neta que es capaz de transportar el tren (para cada uno de los productos), por lo tanto para cada carga neta (toneladas transportadas) existe una composición del tren (una longitud, una masa cargado...). Una vez determinadas estas características del tren para cada tonelada neta transportada y conocidas las características de la línea (velocidad media, coeficiente de curvas...) (tabla 4) se obtiene el consumo de energía y las emisiones de CO₂, permitiendo así una comparación homogénea entre los diferentes trenes que se pretenden estudiar.

En las figuras 1 y 2, se muestran de manera sencilla, para cada uno de los productos y tipo de tracción y sobre todo para cada valor de carga transportada (carga neta), cuál es la composición más eficiente y las diferencias que existen entre cada una de ellas.

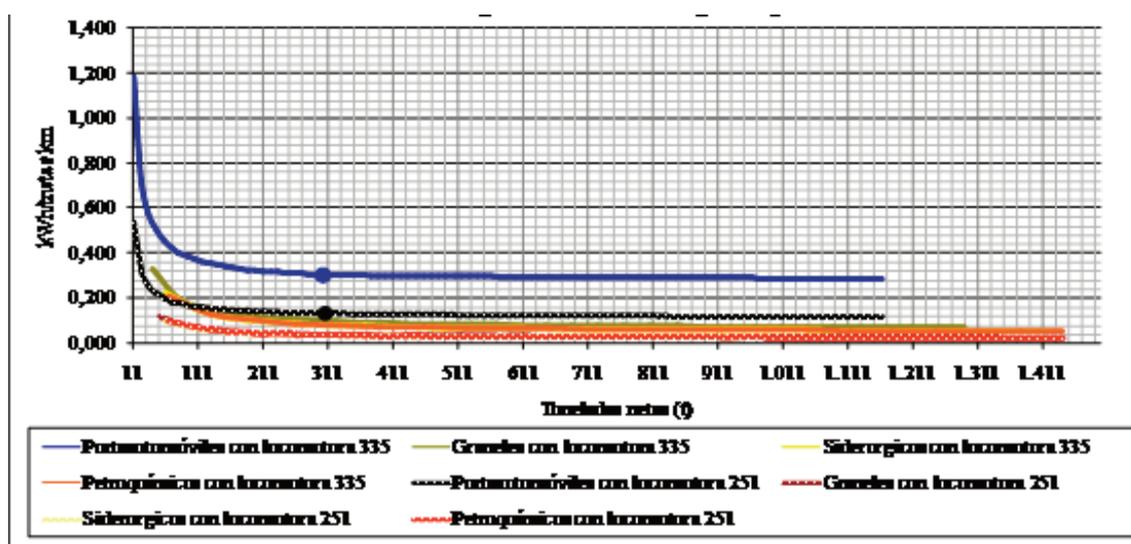


Figura 1. Consumo de energía (kWh/tneta*km) por tonelada neta transportada

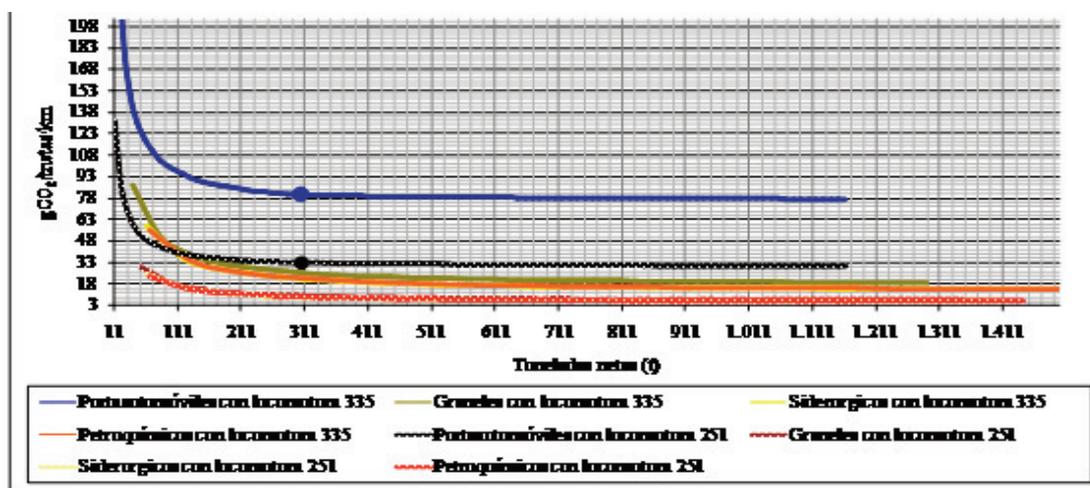


Figura 2. Emisiones de energía (gCO₂/tneta*km) por tonelada neta transportada

En el caso de los porta-automóviles se han calculado los consumos y emisiones para cargas netas mayores a la capacidad propia de los trenes de mercancías representativos de la red ferroviaria española, esto permite realizar una comparación más clara con los demás productos transportados, de ahí que se han calculado consumos ni emisiones para cargas netas mayores de 350 toneladas, ya que con estas cargas se necesitarían trenes con 30 vagones de 27 metros cada uno de ellos, lo que supone trenes de más de 750 metros de longitud.

Tras los cálculos realizados, las conclusiones a las que se llegan son diversas y complejas, por esta razón se dividirán en cuatro apartados, que permitirán una mayor comprensión.

4.1. Diferencias entre tráfico diesel y eléctrico

De las figuras 1 y 2 se obtiene:

Los trenes remolcados por máquina diesel tienen unas emisiones de dióxido de carbono y unos consumos de energía aproximadamente entre 2,3 y 2,9 veces mayor que las composiciones eléctricas, a igualdad de tamaño del tren (y por ello, de toneladas netas de carga) y en una línea de perfil suave.

En la siguiente tabla 5, se muestra la relación existente entre las composiciones diesel y las eléctricas, en cuanto a sus emisiones y consumos de energía.

Tabla 5. Comparativa entre tracción diesel y eléctrica para transporte de los diversos productos

	Consumo	Emisiones
	kWh Diésel/kWh Eléctrico	CO ₂ Diésel/CO ₂ Eléctrico
<i>Portaautomóviles</i>	2,3	2,4
<i>Graneles</i>	2,7	2,9
<i>Siderúrgicos</i>	2,3	2,4
<i>Petroquímicos</i>	2,3	2,4
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

Esta diferencia entre la tracción diesel y eléctrica está en la línea de lo apuntado en (García Álvarez & Martín Cañizares, 2009).

4.2. Efecto del tamaño del tren

Para el mismo producto y el mismo tipo de tracción, las emisiones y el consumo se reducen a medida que se aumenta la carga del tren (por ejemplo si se observa la figura 1, para cargas de 121 toneladas netas en el transporte de graneles y para tracción diésel el consumo de energía es de 15,2 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros; mientras que para trenes de 443 toneladas netas, el consumo baja a 8,8 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros). A partir de las 300 toneladas netas los consumos y emisiones se estabilizan y se mantienen prácticamente independientes del tamaño del tren (obsérvese figuras 1 y 2)

La alta sensibilidad del consumo y energía y de las emisiones al tamaño del tren es característica de los servicios de mercancías, pues éstos son siempre remolcados por locomotora, y por ello, la energía necesaria para mover la propia locomotora “se diluye” entre la carga a medida que aumenta tamaño del tren. Esto nos lleva a afirmar que, trenes de mercancías largos (gran longitud) son más eficientes.

4.3. Diferencias por productos

En los resultados presentados en las figuras 1 y 2, se aprecia que el caso de transporte de automóviles es distinto a los demás. La limitación en el número de automóviles que se pueden trasportar en cada vagón no es

debida al peso, sino al volumen de la carga (en este caso, a la longitud de los coches). Ello da lugar a que la relación entre la tara del vagón y la carga neta transportada es muy alta. Por ejemplo, una plataforma porta-automóviles MA5 de dos pisos, suponiendo que la longitud media de un automóvil es de 4 metros, puede cargar 11,75 vehículos que equivalen aproximadamente a 11,75 toneladas. Por tanto, por cada tonelada neta se necesitan 2,36 toneladas de tara del vagón. En petroquímicos, por ejemplo, por cada tonelada neta se precisan 0,37 toneladas de tara del vagón.

Se comprueba que para las mismas toneladas netas transportadas e igual tamaño del tren, los consumos por tonelada transportada de los trenes de diferentes productos son prácticamente iguales entre sí, exceptuando el caso de los trenes porta-automóviles cuyo consumo por tonelada es aproximadamente 4 veces mayor. Esto es debido a lo comentado anteriormente, se transporta poca carga para la misma longitud de tren que otros productos.

Al ser prácticamente iguales los consumos y emisiones de los trenes de productos “densos”, para los sucesivos cálculos se utilizará un tren de referencia que será una composición de productos petroquímicos, ya que como se ha mostrado se estará hablando también de los productos siderúrgicos y de graneles y reducirá el número de cálculos

4.4. Recorridos en vacío

Existe un parámetro que afectan indirectamente al consumo, que es coeficiente de recorridos en vacío. Cada tren cargado genera un determinado número de trenes vacíos. Un tren que vuelve vacío también consume energía y este consumo se le debe imputar a las toneladas netas transportadas en el sentido contrario. Por ejemplo, en el caso de transporte de graneles el coeficiente de recorridos en vacío es uno (ya que un tren cargado genera un tren vacío), pero para el caso de porta-automóviles es de 0,8 (cada tren cargado necesita “solo” 0,8 trenes vacíos).

5. Comparativa entre consumos y emisiones según perfil de línea

Una vez determinados los consumos y las emisiones en un perfil suave y para observar la influencia que tiene el perfil de la línea en el consumo y en las emisiones de dióxido de carbono, se realiza una comparativa de dos productos distintos en dos líneas con un perfil diferente. Una línea de perfil suave (Valladolid- León) y otra línea de perfil montañoso (León-Gijón).

En este cálculo se utilizan dos tracciones distintas (eléctrica y diésel) al igual que en el caso anterior, y dos productos: el petroquímico, producto de considerado el representativo de los “densos”; y el de transporte de automóviles, considerado “ligero”.

Se considera que cada una de las cuatro composiciones que se han escogido, transportan 200 toneladas netas.

Además, en este punto en el caso de la línea montañosa, para el cálculo de consumos y emisiones se tienen en cuenta ambos sentidos de la marcha, ya que hay diferencias significativas entre un sentido y otro. En las siguientes gráficas 3 y 4 y en la tabla 5, se puede observar los consumos y las emisiones obtenidas en el caso analizado

Tabla 6. Comparación de consumos y emisiones, en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para diversos tipos de productos

Toneladas netas = 200 t	Eléctrico		Diésel	
	kWh/tnetas.km	CO ₂ (g/tnetas.km)	kWh/Tnetas.km	CO ₂ (g/tnetas.km)
Petroquímico perfil suave	0,04	11,27	0,102	26,8
Petroquímico perfil montañoso	0,08	22,64	0,224	58,78
Relación Montaña/ perfil suave	2	2	2,2	2,2
Portaautomoviles perfil suave	0,14	35,13	0,32	84,89
Portaautomoviles perfil montañoso	0,25	63,34	0,58	152,14
Relación Montaña/ perfil suave	1,8	1,8	1,8	1,8

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que la diferencia entre los dos tipos extremos de línea son muy significativas, con cocientes entre 2 y 2,2 para los mismos trenes “densos”, y una diferencia de 1,8 para los trenes “ligeros”. Es decir que, el consumo de energía y las emisiones de CO₂, de un tren, sea cual sea el producto transportado, es aproximadamente el doble si se circula en un perfil montañoso, que si circulan en un perfil suave.

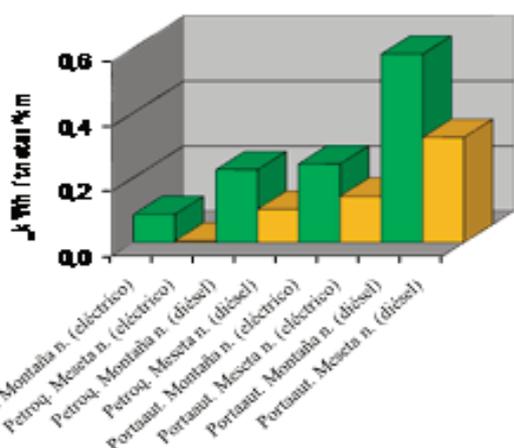


Figura 3. Comparativa de los consumos generados en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para transporte de diversos tipos de productos

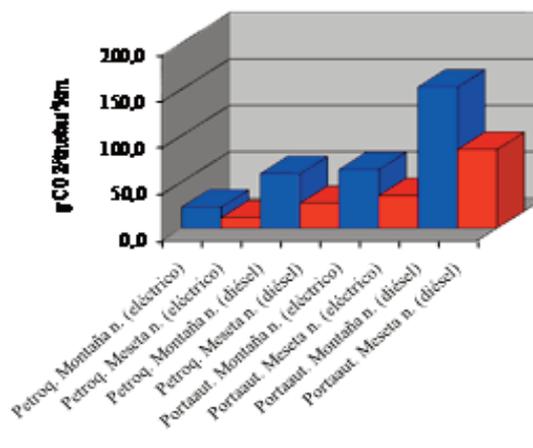


Figura 4. Comparativa de las emisiones de CO₂ emitidas en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para transporte de diversos tipos de productos

Además, las figuras 3 y 4 nos indican que el transporte de mercancías “ligeras” con tracción diesel en un perfil montañoso, se convierte en la explotación menos eficiente de todas, siendo la más eficiente el transporte de mercancías “ligeras” en un perfil suave

6. Conclusiones

Como se ha demostrado en este estudio, afirmar que el consumo de un tren de mercancías es de un valor determinado sin hacer ninguna reflexión al respecto, pues nos llevaría a cometer un gran error. Se ha demostrado la alta variabilidad de consumos y emisiones que presenta la explotación de trenes de mercancías, mostrando aquellas variables que afectan más al cálculo y la diferencia existente entre todas ellas.

Finalmente, a partir del consumo de energía y las emisiones generado por un producto de referencia (petroquímicos “densos”), para un transporte de 200 toneladas, tracción diesel y en una línea de perfil suave, (es el de 11,273 kgCO₂/(tonelada_neta kilómetro) es posible estimar el orden de magnitud y las emisiones de las diferentes composiciones multiplicando la de referencia por los siguientes valores:

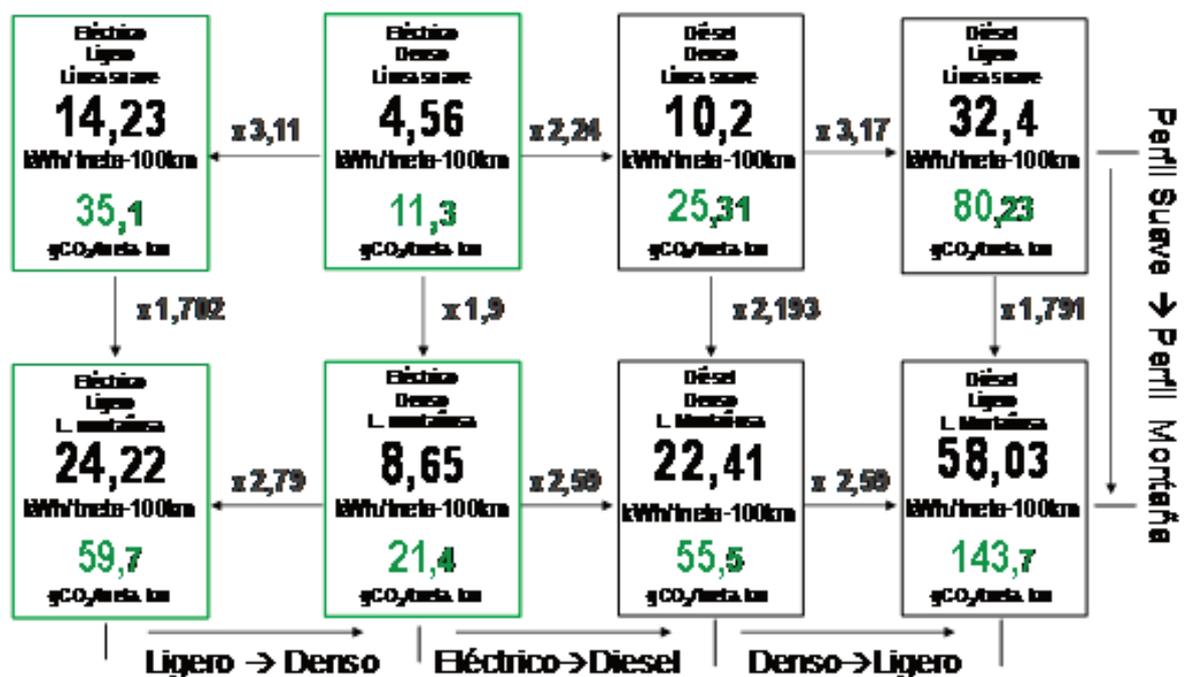
Para determinar el consumo de una composición con tracción diesel se multiplica el consumo del producto referencia por un valor que oscila entre 2,3 y 2,9.

Para determinar el consumo de un tren portaautomóviles de tracción eléctrica que transporta 200 toneladas netas (ligero), se multiplica las emisiones del producto de referencia (“denso”) por un valor que oscila entre 3 y 3,2.

Para determinar el consumo de energía en una línea montañosa, a partir de una línea de perfil suave se multiplican las emisiones, en el caso de trenes “densos” por un factor que oscila entre 2 y 2,3 y para el caso de trenes “ligeros” el factor varía entre 1,7 y 1,8.

Para determinar el consumo de trenes de mayor longitud, hay que acudir a las gráficas anteriores. A partir de 300 toneladas netas (al aumentar la carga transportada, aumenta la longitud de los trenes) transportadas en todas las composiciones, su consumo y emisiones tienen una tendencia asintótica, es decir que se mantienen prácticamente constantes.

A continuación, se muestra una figura resumen de todos los cálculos realizados, que muestra además la gran variabilidad existente en los trenes de mercancías (del orden de 13 veces). Demuestra también, que si se toma un tren eléctrico en un perfil suave (4,56 kWh/tmeta.km) como referencia, es posible calcular los consumos y emisiones para los demás casos, simplemente con el conocimiento de las diferencias que existen entre las variables analizadas (tracción diesel, eléctrica; perfil suave, montañoso; producto petroquímico, porta-automóvil...).



Tren ligero: Portaautomóviles de 200 toneladas netas y 808,56 toneladas brutas
 Tren denso: Petroquímica, de 200 toneladas netas y de 408 toneladas brutas
 En todos los casos, se incluye la parte proporcional de los consumos de los trenes vacíos

Figura 5. Consumo y Emisiones de CO₂ (por tonelada neta cada 100 kilómetros) en un tren ligero y en un tren denso de 200 toneladas netas en dos tipos de línea con tracción eléctrica y diésel

7. Referencias

- [1] Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2009). Observatorio del Ferrocarril en España No. M-2836262-2011)
- [2] García Álvarez, A. (2011a). In García González-Román L. (Ed.), *Dinámica de los trenes de alta velocidad* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid:
- [3] García Álvarez, A. (2011b). In García González-Román L. (Ed.), *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid.
- [4] García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril., 56.
- [5] López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J., Gómez, Á., & Fernández, Á. (2009). *Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- [6] Observatorio de la electricidad (2009). In WWF España (Ed.),
- [7] Pilo de la Fuente, Eduardo, & Pérez Arriaga, J. I. (2009). *Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- [8] Rallo Guinot, V. (2010). *Capacidad de los trenes*. Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios ICAI: