



Monografía 2

Usos de la energía en el transporte

Energy utilizations in the transport sector

Alberto García Álvarez
M^a del Pilar Martín Cañizares

Usos de la energía en el transporte

Energy utilizations in the transport sector

Alberto García Álvarez

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

<http://www.enertrans.es>

© Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto EnerTrans, 2008

ISBN: 978-84-89649-25-5

Depósito Legal: M-6383-2008

Esta monografía ha sido redactada por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación **“Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte” (EnerTrans)**.

El proyecto **EnerTrans** ha sido desarrollado por los siguientes organismos: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA; Universidad de Castilla-La Mancha; ALSA; Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid; Fundación “Agustín de Betancourt”; Fundación Universidad de Oviedo.

El proyecto **EnerTrans** contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).

El proyecto **EnerTrans** estuvo dirigido por su investigador principal Alberto García Álvarez con el apoyo de un “Comité Científico” del que formaron parte las siguientes personas: Alberto García Álvarez (Fundación de los Ferrocarriles Españoles); Ignacio Pérez Arriaga y Eduardo Pilo de la Fuente (Universidad Pontificia Comillas de Madrid); Jose María López Martínez (Universidad Politécnica de Madrid-INSIA); Alberto Cillero Hernández y Carlos Acha Ledesma (ALSA); Timoteo Martínez Aguado y Aurora Ruiz Rúa (Universidad de Castilla-La Mancha); José Miguel Rodríguez Antón y Luis Rubio Andrada (Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid); Manuel Cegarra Plané (Fundación “Agustín de Betancourt”) y Rosa Isabel Aza y José Francisco Baños Pino (Fundación Universidad de Oviedo). El coordinador del proyecto por parte del CEDEX fue Antonio Sánchez Trujillano.

The aim of the EnerTrans research project is to obtain an accurate model to find out the energy consumption (and associated emissions) of the Spanish transport system, according to the important variables on which it depends, and thereby avoid the need to extrapolate historical data series calculated with various methodologies in the European sphere for each mode of transport. The participants include various universities and foundations linked to different modes of transport: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, Fundación Agustín de Betancourt and Fundación Universidad de Oviedo.

The project has involved constructing a model which can be used to explain and predict energy consumption (and associated emissions) in the Spanish transport system, using a coherent methodology for all modes, considering all energy utilizations (construction, operation, maintenance, movement) and the whole energy cycle from source to final use, thus allowing the effects of the results of infrastructure or transport policy to be anticipated and evaluated. As a secondary objective, the project will permit assessment of the impact of any type of technical or operational measure aimed at reducing this energy consumption, which will be useful for transport operators.

It includes innovations such as taking into consideration different routes between the same points for each one of the different modes of transport, or separating consumption from load or space utilization coefficients.

The published documents corresponding to the EnerTrans project fall into three categories: Monographs, Articles and Technical notes.

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS



**Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2006-006-01IASM.**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1.Objeto.....	5
1.2.Justificación.....	6
1.3.Metodología	7
1.4.Terminología	7
1.5.Modos de transporte	9
1.5.1 Carretera	9
1.5.2 Ferrocarril	10
1.5.3 Aéreo	11
1.5.4 Marítimo	12
1.5.5 Tubería.....	15
1.5.6 Cable y cinta	15
1.5.7 Resumen de modos de transporte	16
2. CONSUMO Y FLUJOS DE ENERGÍA EN EL TRANSPORTE.....	17
2.1.Actividades en el transporte que consumen energía	17
2.1.1 Energía necesaria para el mantenimiento y otros consumos indirectos	19
2.1.2 Comparación de la energía empleada en la explotación del transporte	19
2.2.Flujos de energía	20
2.2.1 Esquema de flujos de la electricidad y el petróleo.....	22
2.3.Pérdidas de energía.....	23
2.3.1 Definición de rendimientos y coeficientes de pérdidas.....	23
2.3.2 Clasificación de las pérdidas de energía	24
3. ENERGÍA ÚTIL	26
3.1.Cálculo de la energía útil	26
3.2.Energía útil consumida para el movimiento del vehículo.....	27
3.3.Energía consumida por los servicios auxiliares	27
3.4.Energía generada en el frenado	27
3.5.Energía consumida en fases complementarias del ciclo de transporte.....	27
4. ENERGÍA FINAL.....	27
4.1.Sistemas de propulsión	27
4.2.Vectores energéticos	27
4.3.Orden de magnitud de rendimientos en el vehículo.....	27

5.	ENERGÍA PRIMARIA	27
5.1.	Pérdidas en tracción eléctrica	27
5.2.	Pérdidas en tracción con derivados de petróleo	27
6.	COSTES Y EFECTOS NEGATIVOS DEL USO DE LA ENERGÍA EN EL TRANSPORTE ...	27
6.1.	Contribución al agotamiento de las reservas naturales	27
6.2.	Emisiones de contaminantes	27
6.2.1	Emisiones de gases de efecto invernadero	27
6.2.2	Emisiones con impacto en la calidad del aire	27
6.2.3	Cuantificación y variabilidad de las emisiones según vectores energéticos.....	27
7.	ESTANDARIZACIÓN DE LOS CONSUMOS Y EMISIONES	27
7.1.	Unidades de referencia del consumo específico	27
7.2.	La cuestión de las diferencias entre trayectoria y desplazamiento.....	27
	BIBLIOGRAFÍA	27
	ANEXOS	27
	Anexo A. Unidades empleadas	27
	Unidades de trabajo o energía.....	27
	Macrounidades energéticas.....	27
	Unidades de potencia	27
	Unidades de longitud y velocidad	27
	Anexo B. Poder calorífico de algunos productos	27
	LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	27

1. INTRODUCCIÓN

El desplazamiento de una masa (que puede corresponder a una persona o a una cosa) desde un lugar a otro requiere la realización de un trabajo, y por ello, la aportación de energía es consustancial a todo proceso de movimiento.

Cuando una persona se mueve andando, corriendo o a lomos de un animal, o cuando una cosa es transportada por una persona o arrastrada por animales, o en un vehículo movido por ellos, se emplea el llamado “motor de sangre”: la energía procede de los alimentos que la persona o animal han ingerido y que eventualmente han podido acumular en su organismo. En el proceso, además, se genera dióxido de carbono (CO_2), por lo que este tipo de movimiento no es sustancialmente diferente del producido por otro tipo de motor. Sin embargo, el transporte que se realiza con el “motor de sangre” no es considerado a los efectos de análisis de la energía consumida en el transporte.

En el caso más general, el movimiento requerido para el desplazamiento se produce por un motor (que puede ser de diversos tipos) que mueve un vehículo en el que se desplazan las personas o cosas (así ocurre en el coche, tren, barco o avión); o bien mueve un cable que lo arrastra (transporte por cable); o bien impulsa un líquido o un gas por una conducción (transporte por tubería).

El motor siempre convierte una forma de la energía en otra forma de energía útil para el desplazamiento, y por ello el proceso de transporte requiere la aportación de una gran cantidad de energía.

La energía que necesita el motor debe ser suministrada en el lugar oportuno (generalmente en puntos de repostaje preestablecidos o en el propio vehículo) que se encuentra lejos de los yacimientos energéticos o de las refinerías o centrales de transformación, y por ello es preciso transportarla.

Por otra parte, la energía que necesita cada vehículo o modo de transporte tiene una forma concreta (energía eléctrica, gasóleo, etc.) y unas características (tensión, frecuencia, octanaje), lo que supone que debe producirse previamente un proceso de transformación de la energía entre las fuentes primarias de energía y su uso en el motor del vehículo.

En los procesos de transformación y de transporte de la energía se producen pérdidas y otros efectos negativos como emisiones, contaminación, etc., que deben ser imputados al proceso que requiere la energía, esto es, al transporte de personas o mercancías.

Cualquier estudio sobre el uso de la energía para el transporte requiere, pues, el conocimiento de los flujos de energía: su procedencia, los procesos de cambio de forma, o de características, su transporte y su uso. En todos estos procesos se producen pérdidas y emisiones de CO_2 ; unas y otras dependen de diversos parámetros y variables que es preciso conocer.

1.1. Objeto

El propósito general de este estudio es el análisis de los usos y de los flujos de energía para diversos modos de transporte, tipos de motores y propulsores, así como disponer de una aproximación al orden magnitud de las pérdidas y emisiones que se producen en los procesos asociados.

El conocimiento de los flujos y de la estructura de las pérdidas y de las emisiones es necesario como apoyo a otro tipo de análisis; en concreto, para establecer comparaciones entre modos de transporte, entre sistemas de propulsión, entre fuentes de energía empleadas, etc.

El análisis de los flujos de la energía, no solo permite conocer las cantidades de energía requeridas, sino su efecto en términos de agotamiento de las energías no renovables (petróleo, carbón y gas, fundamentalmente) o de emisiones de gases de efecto invernadero o de otro tipo de contaminantes.

Por ello, el objeto concreto de ese documento es:

- Describir y analizar los flujos que recorre la energía entre sus fuentes (en una concreta ubicación espacial) y su uso en el vehículo, incluyendo en estos flujos los cambios en su forma y características. Y ello, para cada modo de transporte y para cada sistema de propulsión.
- Describir y analizar las pérdidas que se producen en cada uno de los pasos de transformación, cambio de características y transporte, así como la energía primaria requerida (distinguiendo entre renovable y no renovable) en función de la energía final consumida, y las emisiones asociadas a cada proceso.
- Establecer una terminología y un sistema coherente de medida estandarizada de los consumos y de unidades y sus equivalencias, que permitan que los diversos estudios de modos de transporte concretos se realicen de forma homogénea.

1.2. Justificación

En el sector del transporte se produce un consumo de energía especialmente intensivo, creciente y singularmente perjudicial para el medio ambiente.

Y ello agravado por el hecho de que el modelo de transporte dominante actualmente (supuestamente “desarrollado”, pero intensivo en uso de energía y agresivo con el medio ambiente) sólo es accesible a una pequeña parte de la población mundial.

Se debe calificar el vigente modelo energético de transporte como “insostenible” y plantearse la necesidad de su modificación. El necesario cambio requiere el conocimiento profundo e intensivo de la relación entre los procesos de transporte y consumo de energía.

Los efectos perjudiciales del consumo de energía por el sector de transporte proceden fundamentalmente de tres ámbitos:

- La contribución del transporte al agotamiento de los combustibles fósiles (principalmente del petróleo, pero también del gas y del carbón), cuyas existencias son limitadas, y aunque el final de la extracción económicamente viable es desconocido, parece que se encuentra relativamente próximo en los casos del petróleo y del gas. Cabe reflexionar sobre el hecho de que la humanidad, en los últimos 100 años, ha consumido casi la totalidad de los recursos fósiles acumulados durante millones de años.
- La contribución del transporte al cambio climático, como consecuencia de los procesos de combustión (y la subsiguiente emisión de gases de efecto invernadero asociados al consumo de energía y a las transformaciones previas necesarias).

- La contribución del transporte a la contaminación local, tanto en lo que se refiere a la calidad del aire, como al ruido.

En todos los casos, la contribución del transporte a los efectos negativos asociados resulta especialmente relevante, por dos hechos:

- El transporte tiene un peso muy importante en el consumo total de energía, y con tendencia al crecimiento, tanto en el valor absoluto de la energía consumida, como en la participación del transporte en el conjunto de los consumos. Este crecimiento está normalmente por encima del crecimiento de otros indicadores de la actividad económica (como, por ejemplo, del PIB).
- El sistema de transporte, en su concepción actual, es especialmente dependiente de los combustibles fósiles no renovables y, en concreto, del petróleo. En efecto, el transporte (principalmente por carretera y aéreo) obtiene la mayor parte de la energía que necesita del petróleo, y a su vez, la mayor parte del consumo de petróleo se destina al transporte. Únicamente los modos ferroviarios de tracción eléctrica y el transporte por cable y tubería (oleoductos y gasoductos) emplean energía eléctrica como vector energético para el transporte; y en la medida que una parte (aún pequeña) de la energía eléctrica es generada con fuentes renovables, estos modos de transporte permiten la sustitución parcial de los combustibles fósiles (y las emisiones asociadas) para el transporte.

1.3. Metodología

El análisis de los usos de la energía en el transporte se realizará “de abajo arriba”, es decir partiendo del análisis de los usos finales de la energía útil, y subiendo en el análisis “aguas arriba” hasta las fuentes primarias de energía. Por ello, el trabajo se estructura en los siguientes apartados:

- En primer lugar, se presenta la justificación, objetivo de estudio y la metodología, así como los términos empleados y las unidades.
- Se analizan someramente los diferentes modos de transporte, sus especificidades técnicas relevantes y los sistemas de propulsión que emplean.
- Se definen con carácter general los *flujos de la energía*, es decir, los caminos y procesos que sigue ésta hasta su uso en el vehículo (energía útil) desde el yacimiento (energía primaria).
- Se reflexiona sobre el orden de magnitud de las pérdidas de energía y sobre la energía primaria consumida, así como las emisiones según los tipos de propulsores empleados.

Dada la diferente naturaleza del transporte por tubería, en el que no existen vehículos como tales, se tratará este modo de manera independiente, aunque se harán las necesarias referencias al describir los flujos de energía y pérdidas.

1.4. Terminología

La descripción de los flujos y usos de la energía en el transporte sugiere la definición de unos términos científicamente correctos, entendibles y homogéneos, válidos para los procesos energéticos como para todos los modos de transporte; así como de las unidades a emplear y de las equivalencias entre ellas.

Características de la energía. Son los atributos que caracterizan posibles estados de la energía de una determinada forma de energía. En los flujos de energía son frecuentes los procesos que producen cambios en las características de la energía (y en estos procesos hay pérdidas y generalmente emisiones de CO₂). Son ejemplos de características la tensión, la frecuencia, el octanaje o el poder calorífico.

Energía final. En el caso del transporte, denominamos *energía final* a la energía que entra al vehículo y que es el resultado de restar a la *energía primaria* las pérdidas que se producen en los procesos de transformación, cambio de características y transporte que tienen lugar antes de llegar al vehículo.

Energía primaria, es la cantidad de energía contenida en los combustibles antes de pasar por cualquier proceso de transformación.

Energía útil. Denominamos *energía útil* a la que realmente se aprovecha para los fines de transporte; es decir, a la suma de la energía consumida para el movimiento del vehículo (medida en las llantas, las ruedas, la hélice o el ala) y de la energía consumida por los servicios auxiliares (medida en la entrada de los equipos consumidores de esta energía).

Forma de energía. Cada una de las *formas de energía* tiene en común la habilidad de causar algún tipo de cambio o forma de hacer una labor. Son *formas de energía*, por ejemplo la energía mecánica, la eléctrica, la calorífica, etc.

Fuente de energía son aquellos elementos de la naturaleza que pueden suministrar energía. Se llaman *fuentes de energía renovables* a aquellas a las que se puede recurrir de forma permanente porque son inagotables; por ejemplo el agua, el sol o el viento. Las *fuentes de energía no renovables* son aquellas cuyas reservas son limitadas y, por tanto, disminuyen a medida que se consumen; por ejemplo el petróleo, el carbón o el gas natural.

Modo de transporte es el sistema definido por el vehículo de transporte utilizado y su infraestructura, y que tiene unas características tecnológicas propias (diferentes de las propias del sistema de propulsión). El transporte por tubería no requiere vehículo, pero también es un modo de transporte.

Motor principal es el motor del vehículo que recibe la energía del exterior, y que la convierte otra forma distinta de energía para el movimiento del vehículo (o la impulsión de un líquido). Si en un vehículo hay diferentes motores (por ejemplo, en un tren o en un barco de propulsión diésel-eléctrica hay un motor diésel y además motores eléctricos de tracción) se considera como motor principal al que recibe la energía del exterior (en este caso, el motor diésel).

Pérdidas “tank to wheel” (TTW). Son las pérdidas que se producen desde el suministro al vehículo hasta las ruedas del vehículo. (Corresponden, por lo tanto, a la diferencia entre la *energía final* y la *energía útil*).

Pérdidas “well to tank” (WTT) son las pérdidas de energía que se producen en los diferentes procesos de transformación y transporte desde la fuente de energía primaria (simbólicamente representada por la rueda, *wheel*”, del pozo de petróleo), hasta el aprovisionamiento al vehículo en su “*tanque*” de combustible. (Las pérdidas “*well to tank*” son, por lo tanto, la diferencia entre la “energía primaria” y la “energía final”).

Sistema propulsor. Conjunto formado por el motor principal, la transmisión y todos aquellos elementos que convierten la energía que recibe el vehículo en energía útil para el movimiento.

Transformación de la energía. Es el proceso que tiene por objeto cambiar de una forma de energía a otra, o cambiar las características de la energía.

Transmisión. Es el conjunto de elementos (incluyendo a veces motores diferentes del principal) que convierten la energía que sale del motor principal en energía de formas útiles para producir el movimiento.

Vector energético es la *forma de energía* que se es utilizable en usos finales, para el almacenamiento o para el transporte de la energía. Los *vectores energéticos* son las formas de energía que se usan para suministrar energía al motor principal, puesto que se transportan, en ocasiones se almacenan, y se manejan de forma más sencilla que la energía en su estado original. Son ejemplos típicos de vectores energéticos la electricidad y el hidrógeno, que no se presentan libres en la naturaleza, sino que se obtienen a través de otras formas de energía.

1.5. Modos de transporte

El transporte de personas o de cosas se puede realizar en los siguientes *modos de transporte*: carretera, ferrocarril, marítimo, aéreo y tubería seguidamente se indican algunas características relevantes de cada uno de ellos.

1.5.1 Carretera

La carretera es un medio que emplea vehículos no guiados que circulan sobre ruedas de caucho por caminos terrestres, generalmente dotados de una capa de rodadura.

Se utiliza para transporte de mercancías ya sea de productos terminados o semiterminados de volumen medio, cuando se requiere servicio de puerta a puerta; y para transporte de viajeros.

Los submodos del transporte por carretera son:

- Transporte de viajeros: se realiza normalmente en automóvil, autobús, trolebús o motocicleta.
- Transporte de mercancías: En furgoneta, camión (de varios tipos) o el llamado “tren de carretera”.

Automóvil

El automóvil es un vehículo de transporte de personas que tiene una cubicación de entre 4 y 8 m³, puede transportar normalmente desde 4 a 7 personas (incluido el conductor) y tiene una masa media de entre 1.200 y 1.700 kg. Las potencias instaladas varían de 52,5 a 125 kW (71 a 170 CV).

El motor térmico puede ser de gasolina o diésel; la transmisión del movimiento se produce mediante un cambio de marchas mecánico (normalmente de 5 marchas) o un cambio automático que transmite el movimiento al puente, donde a través de un diferencial y dos semiejes se dirigen las ruedas motrices.

Los consumos suelen ser, en el caso del motor de gasóleo de 0,05 a 0,08 litros por kilómetro y de 0,075 a 0,1 litros por kilómetro para los propulsados por gasolina, las emisiones medias de CO₂ son de 236 gramos por kilómetro y 178 gramos por kilómetro respectivamente.

Autobús

Los autobuses son vehículos para el transporte colectivo de personas que tienen una cubicación de aproximadamente 45 m³, con anchuras de 2,5 m y longitudes de hasta 18 m. Pueden transportar, en sus formatos más habituales, desde un mínimo de 30 a un máximo de 85 personas sentadas (número que aumenta si viajan de pie, como es el caso de los autobuses urbanos) y tienen una masa total en orden de marcha de 12.000 kg, y de 18.000 kg en carga.

Los autobuses llevan un motor diésel de 6 u 8 cilindros de una cilindrada completa de unos 10.000 cm³. Las potencias instaladas varían de 220 kW a 308 kW (300 a 420 CV). La inyección puede ser con y sin “intercooling”, el cambio mecánico con junta hidráulica normalmente tiene de 5 a 8 marchas y transmite el movimiento al puente (donde a través de un diferencial y dos semiejes) acciona las ruedas motrices.

El consumo medio es del orden 0,03 litros de gasóleo cada kilómetro y las emisiones medias del orden de 600 gramos de CO₂ por kilómetro.

Trolebús

El “trolebús”, también conocido como “trolley” o “trole”, es un autobús con motor eléctrico alimentado por dos cables suspendidos de los que toma la energía eléctrica, mediante dos astas. El trolebús no requiere de plataforma reservada o carriles en la calzada, lo que lo hace un de él sistema más flexible que el tranvía. Cuenta con neumáticos de caucho en vez de ruedas de acero en carriles como los tranvías.

1.5.2 Ferrocarril

El sistema ferroviario emplea vehículos guiados que tienen ruedas metálicas y que circulan sobre una vía formada por carriles metálicos. Se utiliza para transporte de viajeros y mercancías de todo tipo, tales como materias primas o productos de riesgo (gases licuados, combustibles, productos químicos, etc.).

Para el caso del transporte de mercancías es un medio relativamente lento, que ofrece una reducida capilaridad, pero que permite transportar grandes volúmenes y masa. La carga y la descarga se realizan en terminales especializadas.

En el transporte de viajeros permite altas velocidades por lo que se ha convertido en un fuerte competidor del avión en distancias de hasta 700 kilómetros. Ofrece también una alta capacidad específica, lo que favorece que se implante en servicios de alta densidad, tipo cercanías.

En el ferrocarril se diferencian dos submodos principales según el objeto material del transporte: el tren de mercancías y el de viajeros (que también puede llevar equipajes o cargas fraccionadas así como automóviles)

Trenes

Junto a las características que tengan los vehículos para la acomodación y para el transporte de viajeros o mercancías, hay ciertos parámetros que condicionan la forma de operar de los trenes:

- Tipo de tracción: puede ser diésel o eléctrica.
- Localización de la tracción en el vehículo: puede ser “distribuida” o “concentrada”, dando lugar a trenes “autopropulsados” y “remolcados” respectivamente. En el caso de tracción concentrada, los vehículos motores o

locomotoras tienen potencias de entre 2.500 y 5.000 kW, pudiendo llegar a remolcar cargas de hasta 1.300 t. Esta limitación no es debida generalmente a la potencia de las máquinas, sino a la adherencia y a la resistencia del gancho de tracción.

- Tipo de rodadura: existen vehículos de 2 o 3 ejes y vehículos de “bogies” (4 a 6 ejes) cuya longitud máxima es de 25 m. La carga estática por eje está limitada normalmente a 22,5 t por eje en Europa y a 30 t por eje en Norteamérica.
- Las limitaciones de gálibo para los trenes en España son de 2,9 a 3 m de ancho y 4,3 m de altura sobre el carril. La longitud de los trenes depende entre otros factores de la longitud de las vías de apartado, siendo un valor muy común en España el de 750 m, aunque en otros países europeos son frecuentes los 1.500 m y en Norteamérica de varios kilómetros.
- El consumo de energía en los trenes depende de muchas variables, y siendo el rango de tamaños de los trenes muy grande, también lo es el de variación de los conjuntos. Pero puede darse un orden de magnitud de 0,03 a 0,045 kWh (energía final) por kilómetro por cada tonelada de masa del tren.

1.5.3 Aéreo

El transporte aéreo emplea vehículos más pesados que el aire que vuelan sin más contacto con la tierra que el que se produce en el proceso inicial y final del vuelo (aterrizaje, despegue y rodaje). En este tipo de transporte no es necesaria la creación de infraestructuras más allá del aeropuerto de origen y destino, de los centros de control, de los servicios de navegación (lo que permite el transporte sobre o a zonas desérticas, deshabitadas, o a través de orografías complejas) y de los centros de inspección y mantenimiento, necesarios para el correcto funcionamiento de las aeronaves y sus sistemas.

Este modo de transporte permite altas velocidades, especialmente útiles en largas distancias, y se utiliza tanto para transporte de viajeros como de mercancías siendo, en este último caso, idóneo para mercancías de una masa pequeña y de alto valor añadido.

Los Estados utilizan para sus necesidades de transporte tanto la aviación civil como la militar. Si bien existe en determinados países (o alianzas), una elevada capacidad de transporte aéreo militar, en este trabajo nos referiremos a la aviación civil que es la empleada en el transporte.

La aviación civil se puede clasificar atendiendo a los medios que emplea, al fin a que se destinan esos medios, a la distancia a la que operan, a la masa al aterrizaje, etc. La primera gran clasificación se puede efectuar entre la aviación general y deportiva y la aviación comercial.

Dentro de la aviación civil comercial se encuentran los trabajos aéreos y el transporte aéreo. A su vez, el transporte aéreo puede clasificarse por la distancia a recorrer, en: *corto*, *medio*, *largo* y *ultra largo radio*; por el alcance, en *regional*, *doméstico*, *internacional* e *intercontinental*; por lo transportado, se clasifica en *carga*, *pasajeros* y *mixto*; por el tipo de servicio, en *regular* y *chárter*, etc.

Avión

En las aeronaves, se puede distinguir entre las de *ala fija* (avión) y las de *ala rotatoria* (helicóptero). A su vez, dependiendo de la motorización, pueden estar

equipadas con *motor de pistón* o *motor de reacción*. Dentro de los *motores de reacción* podemos distinguir entre *turborreactores*, *turbo fan* y *turbo hélices*. Es conveniente puntualizar que en el turbo hélice la potencia tractora se transmite, fundamentalmente, a una hélice.

Las aeronaves de transporte civil de pasajeros y carga tienen un rango amplio de velocidades entre los 200 km/h y 1.000 km/h. La cota de tangencia máxima varía con el tipo de aeronave y el trayecto, siendo usual, en tramos de distancias medias y largas, la operación entre los 9.000 y los 13.000 m. Los recorridos pueden ir desde los 300 a los 12.000 km, transportando desde un pasajero (aviación ejecutiva) hasta 800 pasajeros (Airbus A-380).

Las aeronaves de transporte de pasajeros y carga utilizan motores de pistón (usualmente en aviación general, deportiva, trabajos aéreos, etc.) o motores a reacción ya sean turbohélices o turbo fan. El número varía en virtud de los tipos de aeronave pero habitualmente oscila entre uno y cuatro.

Los “impulsos” (fuerza de empuje) por motor en los motores a reacción varían entre los 15,6 kN de un Allied Signal TFE 731-2 que equipa algunas aeronaves ejecutivas a los 504,9 kN de un General Electric GE90-113B que equipa alguno de los más grandes aviones en servicio como el Boeing B-777(ICA0, 2007).

1.5.4 Marítimo

El transporte marítimo se realiza en buques de diverso tipo, por océanos, mares, ríos, canales y lagos, siendo su campo de actuación el transporte de grandes masas a distancias medias o grandes, y también transporte de mercancías y personas entre territorios que no están unidos por tierra o que no lo están con una distancia razonable.

El transporte marítimo está conociendo un gran incremento en los últimos años, debido a la expansión de la demanda de China e India, a la globalización de la economía y a la deslocalización de la producción. Ello se traduce en un fuerte incremento de los transportes realizados, de los precios (denominados “fletes” en este sector), de la construcción de nuevos buques, y una reducción importante de los buques que se desguazan o que están inactivos por falta de carga.

El ámbito del transporte marítimo es mundial. Aunque existen trasportes nacionales o regionales (cabotaje), los grandes movimientos son de ámbito oceánico; las navieras operan en países diferentes del propio (y también abanderan sus buques en el propio país o en terceros países), lo que hace que las normas, usos y costumbres de este transporte sean de ámbito planetario, el idioma utilizado sea el inglés en la definición de todos los términos y disponga de unidades propias de distancia (1 milla náutica=1,85 kilómetros) y de velocidad (1 nudo=1 milla/hora=1,85 km/h).

El transporte marítimo se realiza por empresas denominadas “navieras” (que pueden ser o no ser propietarias del buque), a las que contratan el transporte o bien el cargador (propietario de la mercancía) o bien un operador logístico a quien ha contratado el cargador. El transporte se puede realizar de dos formas:

- Línea regular (con fechas y puertos de escala previstos y publicados y en principio de uso público para todos los cargadores y operadores interesados) y
- Tramp (equivalente al transporte discrecional) contratado para hacer un transporte determinado por un único cargador u operador. En muchas ocasiones este tipo de servicio se hace por contratos a largo plazo que incluso pueden

implicar la construcción de buques específicos y cuyo contrato es usado en muchos casos como garantía de la financiación requerida para la construcción. (Hay que tener en cuenta que el proceso de diseño y construcción de un buque suele ser de unos dos años y en el momento actual de ocupación completa de los astilleros puede llegar a 5 años, con lo que la necesidad de financiación y el importe de ésta es muy importante).

Buques

Los buques son vehículos que flotan sobre la superficie del agua y que se mueven utilizando motores de diverso tipo y, en algunos casos (solamente en el campo de buques de recreo es empleado) velas que aprovechan el impulso del viento. Dado que los recorridos que realizan pueden ser muy largos (normalmente miles de kilómetros) y la velocidad baja (máxima del orden de 50 km/h salvo los ferries) y que son totalmente autónomos, los buques son “ciudades flotantes” que deben tener una gran autonomía y que en realidad pueden ser considerados, a efectos de funcionamiento, como un transporte (Bodegas/Tanques de carga), una fábrica (Cámaras de máquinas) y una residencia (Habitación).

Los buques están caracterizados por su longitud (denominada “eslora”), su anchura “manga” y su altura a cubierta (denominada “puntal”), El “desplazamiento”, medido en toneladas, es la suma del “peso en rosca” (masa del buque desnudo) y el “peso muerto” (masa de la carga, lastre más la masa de los consumos). Hay buques de hasta 450 metros de eslora y hasta 560.000 toneladas de peso muerto. La capacidad de carga es de una media aproximada del 80% del peso muerto.

Los buques se pueden clasificar, según su uso, en:

- Militares; pesqueros;
- Deportivos y de recreo;
- “No transporte” (dragas, remolcadores, off shore, botes de servicio, etc.); y
- De transporte.

Por lo que se refiere a los buques destinados al transporte de mercancías y/o de personas, la clasificación según el tipo de carga, (según EUROSTAT) es la siguiente:

- Buques para graneles sólidos (carbón, hierro, grano, otros....)
- Buques para graneles líquidos (petróleo y derivados, gas licuado)
- Buques para portacontenedores
- Buques para carga general (para chatarra, mercancías no contenerizadas, aunque estos buques a veces llevan también contenedores).
- Buques para pasajeros/Ferries/Roll on - roll off.

Dentro de cada uno de estas clases se agrupan, a su vez, diversos tipos de buques.

En el movimiento de los buques pueden distinguirse las siguientes fases de su ciclo operativo:

- Crucero que es, etapa del ciclo en la que el buque navega a su velocidad de diseño, usualmente a potencias alrededor del 80 % de la potencia de propulsión instalada. (Es la fase fundamental de navegación por los mares, canales y ríos)
- Maniobras (de acercamiento y atraque en el puerto de destino o de salida)
- Atracado/Fondeadero en puerto. En esta fase se pueden distinguir a efectos de consumo energético entre la etapa con operaciones de carga y descarga (en las

que según el tipo de buques el consumo de energía es significativamente mayor) y la etapa de atraque/fondeo sin operaciones en las que el consumo de energía es el requerido por la habitabilidad del buque y de la carga.

Los buques, en su mayoría, están movidos por hélices accionadas por un motor diésel (con rendimientos de fábrica del orden de 160 a 190 g/kWh) con una transmisión mecánica entre ambos. (El rendimiento aproximado de la hélice y casco del buque es del 60% y de la transmisión del 97%)

En algunos casos, las hélices son accionadas por motores eléctricos que reciben la energía de grupos embarcados motor (diésel)-alternador. Algunos buques más antiguos están movidos por un sistema caldera de vapor-turbina de vapor. Específicamente algunos buques destinados al transporte de gas licuado se mueven por una turbina de vapor que se abastece de una caldera que se alimenta parcialmente con gases evaporados de la carga.

Para los servicios auxiliares (mantenimiento y refrigeración de la carga, manipulación de la misma, carga y descarga, otros servicios del buque y servicio de los tripulantes) se dispone de grupos generadores de electricidad formados, cada uno, por un motor diésel y un generador de electricidad.

Es común disponer una toma de fuerza del motor propulsor para conectarla a un generador eléctrico para obtener electricidad del motor propulsor. Esta toma está restringida a su uso en la etapa de crucero y en buques especialmente preparados durante la etapa de maniobra ya que su uso requiere un funcionamiento del motor propulsor a revoluciones constantes. En el caso de los buques de transmisión diésel eléctrico, los propios generadores acoplados a los motores diésel alimentan tanto al motor eléctrico que mueve la hélice como a los consumos auxiliares.

Por lo que se refiere a los combustibles utilizados en los buques, son fundamentalmente de tres tipos:

- “Residual fuel oil”, derivado residual del petróleo, de alto contenido en azufre que puede llegar al 7 % (Media 2,7 %). Por ello su uso está limitado en muchas áreas y en los puertos de manera general, donde está limitado el porcentaje de azufre (como por ejemplo en el mar Báltico) o incluso prohibido su uso. Debido a su alta viscosidad, en especial a temperaturas frías, debe ser calentado para trasegararlo y para su uso en los motores propulsores o auxiliares su densidad media es de 990 kg/m³ y su poder calorífico entre 40.000 y 40.500 kJ/kg.
- “Marine diésel oil”, derivado destilado del petróleo (con densidad de 890 kg/m³ y poder calorífico entre 42.000 y 42.500 kJ/kg)
- “Marine gas oil” derivado destilado del petróleo (con densidad 820 kg/m³ y poder calorífico entre 42.500 y 43.000 kJ/kg)

También, como se ha indicado, en ocasiones se emplea el gas excedente del transporte para las calderas de gas o directamente gas natural en los motores combustión interna, especialmente en zonas más sensibles a la contaminación.

Como se deduce de lo expuesto, el mismo buque suele utilizar diversos combustibles, por lo que suelen estar equipados de un dispositivo de cambio de combustible.

El criterio de clasificación de los motores más usado es según la velocidad de giro:

- Motores lentos. Su velocidad de giro es entre 80 y 300/400 normalmente entre 80 y 140 revoluciones por minuto. Se utilizan como motores propulsores y son los de menor consumo específico, permitiendo el uso de fuel oil de alta viscosidad.

- Motores semirápidos, su velocidad de giro está de entre 300/400 y 1.000 revoluciones por minuto. Se utilizan como motores propulsores y generadores y usan fuel oil o diésel oil.
- Motores rápidos. Su velocidad de giro es de más de 1.000 revoluciones por minuto, se usan como motores generadores o en buques de pequeño tamaño como motores propulsores. Debido a que queman gas oil, su uso en la marina mercante es reducido.

1.5.5 Tubería

El transporte por tubería permite desplazar líquidos o gases impulsados por un motor a través de oleoductos o gasoductos. Se caracteriza por bajas velocidades, permitir el transporte de grandes volúmenes de mercancías peligrosas con costes bajos y logrando una disponibilidad inmediata. Se utiliza para el transporte de combustibles, líquidos tales como petróleo y productos refinados, y de gases.

El transporte por tubería es una tecnología, entendiendo por tal un conjunto de conocimientos técnicos que hacen posible la implantación (proyecto y construcción) y la explotación de instalaciones de este tipo (oleoductos, gasoductos, etc.).

En esencia, el transporte por tubería es la tecnología opuesta al aprovechamiento energético de una corriente de fluido (Cegarra, 2007). En éste se extrae la energía del fluido en movimiento dentro de la tubería (conducción forzada) mediante la turbina. En la tubería, por contra, se inyecta en el fluido la energía necesaria, en su caso, para mantener el movimiento, mediante la máquina inversa (bomba o compresor).

Es decir, el transporte por tubería es un consumidor de energía, como cualquier otro modo de transporte. Así que, en el cálculo y análisis de las redes de tuberías, es muy importante llegar a conocer la variación de la energía (cinética, potencial de presión y gravitatoria) contenida en el fluido a lo largo de la conducción, en el proceso de su movimiento por el interior de la tubería, y de ahí deducir que cantidad de energía, y en qué punto conviene inyectarla en el fluido para mantener su movimiento, lo que en definitiva determina la potencia a instalar en las estaciones de bombeo o de compresión y su ubicación.

Las estaciones se conectan normalmente a la red eléctrica en media tensión de distribución y emplean motores trifásicos. En oleoductos las estaciones de bombeo se encuentran cada 80-100 km y su potencia es de 0,5 a 1 MW. Las estaciones de compresión de los gasoductos están ubicadas cada 250-500 km y tienen una potencia algo superior de alrededor de 1 MW.

1.5.6 Cable y cinta

El transporte por cable emplea sistemas concebidos para transportar mercancías o personas en vehículos remolcados por arrastres, suspendidos de cables o tirados por cables, estando colocados dichos cables a lo largo del recorrido efectuado. Este modo de transporte no es representativo como sistema de transporte público puesto que utilizado actualmente en instalaciones deportivas, minas o fábricas. Lo mismo puede decirse de la cinta transportadora.

1.5.7 Resumen de modos de transporte

En la tabla se resumen las principales características de los modos de transporte

Tabla 1. Cuadro resumen de los modos de transporte

Modos de transporte	Medios de transporte (vehículo)		Infraestructuras (vías)	Transportan		Entorno	Observaciones
	Generales	Para fluidos		Mercancías	Pasajeros		
Carretera	Automóvil / camión	Camión cisterna	Carreteras	x	x	Terrestre	Pasajeros y todo tipo de mercancías
Ferrocarril	Vagón de ffc	Vagón cisterna	Vías férreas	x	x	Terrestre	
Tubería		Tubería		x		Terrestre y acuático	Vehículo = vía Fluidos energéticos y otros (agua, etc)
Marítimo	Buque / barcaza	Buque tanque	Puertos	x	x	Acuático	Pasajeros y todo tipo de mercancías
Aéreo	Avión	Avión cisterna (nodriza)	Aeropuerto	x	x	Atmósfera	
Por cable	Cabina / cubeta	Cubeta	Funicular / teleférico	x	x	Terrestre	Pasajeros y cierto tipo de mercancías

Fuente: Cegarra Plané (2007)

2. CONSUMO Y FLUJOS DE ENERGÍA EN EL TRANSPORTE

El movimiento de los vehículos de transporte requiere una aportación importante de energía, que en el caso de los vehículos privados, se traduce en el suministro de gasolina o de gasóleo al coche, y por ello, se trata de una necesidad energética bien conocida para la mayor parte de los ciudadanos. Sin embargo, el consumo de energía en el transporte es algo más complejo, puesto que ésta se emplea en otras etapas del proceso de transporte.

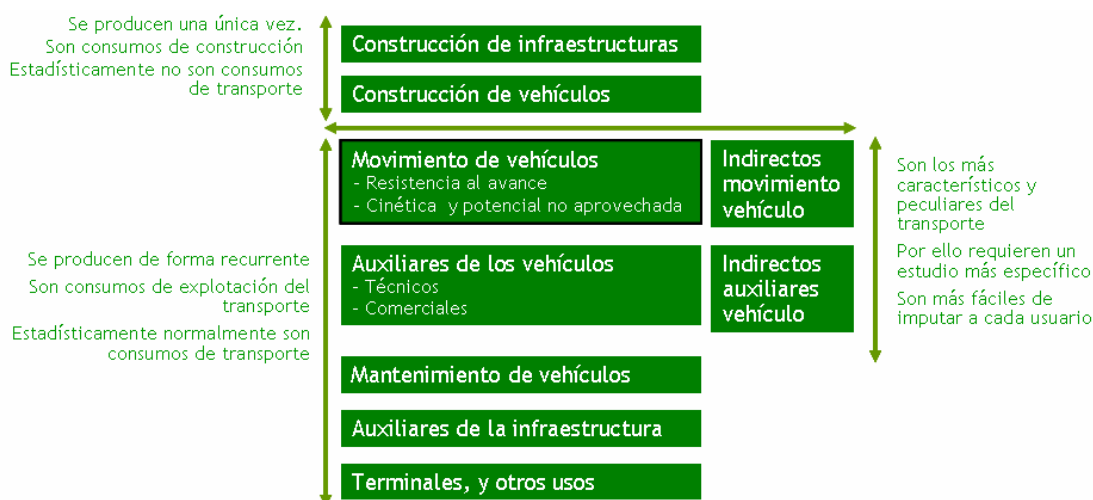
2.1. Actividades en el transporte que consumen energía

Dentro de los procesos de transporte, se pueden distinguir tres tipos de actividades que consumen energía:

- **Construcción y mantenimiento de infraestructuras.** Es necesario el empleo de energía para la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras del transporte, ya sea de caminos o de terminales. En este apartado se puede incluir la energía necesaria para el movimiento de tierras, para la excavación de túneles, para el traslado de las tierras excedentes a vertederos o a puntos de aporte, la fabricación de cemento y hormigón, etc. Como estos consumos de energía son realizados por empresas constructoras dentro de su actividad ordinaria, en las estadísticas no son imputados al sector transporte, sino al de la construcción.
- **Construcción, final de vida y mantenimiento de vehículos.** Para la fabricación, desguace o reciclado y mantenimiento de vehículos también se emplea energía, incluyendo la necesaria para la extracción y elaboración de las materias primas; para la fabricación y el transporte de piezas y componentes; para el montaje del vehículo; para el transporte del mismo antes de su entrega, etc. Debe incluirse también la energía necesaria para su desguace o fragmentación final. Estos consumos aparecen estadísticamente imputados al sector industrial, con la excepción del consumo de energía de los talleres de mantenimiento de trenes, aviones y barcos, que en ocasiones se imputan al transporte.
- **Explotación del transporte.** El consumo de energía para la explotación del transporte es el que produce directamente movimiento de los vehículos y otros servicios auxiliares, tanto en los propios vehículos (calefacción, aire acondicionado, iluminación), como en la infraestructura (terminales, señalización, etc.).

Los consumos de los vehículos, tanto para el movimiento como para los auxiliares pueden ser “directos”, (entendiendo por tales los producidos por un servicio comercial), o indirectos (entendiendo por tales los que se producen en movimientos en vacío, o en el estacionamiento de los vehículos entre servicios).

Figura 1. Usos de la energía en el transporte



Fuente: García Álvarez (2006)

Los consumos de explotación, que se caracterizan (a diferencia de los de la construcción) por ser recurrentes o repetitivos, y se producen en cuatro ámbitos o tipos de actividades:

- Energía para el movimiento de los vehículos (o para la impulsión del fluido o gas en la tubería). Esta parte del consumo de energía es la más importante cuantitativamente y la más característica del transporte. Por ello, a ella se le dedicará la mayor atención en este estudio.
- Energía para los *servicios auxiliares de los vehículos*. Se entiende por *servicios auxiliares* en los vehículos, tanto que denominaremos *técnicos*, que los necesarios para el funcionamiento de vehículos (ventiladores de los motores, los compresores, etc.); como los *comerciales*, que son los requeridos para el confort de los viajeros o la conservación de la carga (calefacción, refrigeración, iluminación, funcionamiento de la cafetería, etc.). En el pasado, estos servicios eran muy reducidos y se atendían de forma diferenciada y dispersa, pero el aumento de los requerimientos de confort a bordo de los vehículos ha hecho que este consumo pase a ser significativo. El suministro de esta energía se va confundiendo cada vez más con el de la energía requerida para el movimiento de los vehículos, por lo que su estudio requiere un conocimiento adecuado de uno y otro.
- Energía para *servicios auxiliares de la infraestructura*, que incluyen, por ejemplo, los consumos de iluminación de túneles o de tramos de la vía, la calefacción de agujas del ferrocarril, los paneles informativos luminosos en carreteras, la alimentación a sistemas de señalización y comunicaciones, etc.
- Energía para el funcionamiento de terminales y *otros usos*. Se incluyen en este apartado el consumo de energía para iluminación y climatización de aparcamientos, terminales y estaciones, talleres y oficinas; y en general todos los consumos del sistema de transporte que se requieren para su funcionamiento ordinario y que no están incluidos en los anteriores. Estos consumos no tienen un gran peso relativo dentro del conjunto (con algunas excepciones como algunos ferrocarriles metropolitanos) ni presentan, en

general, rasgos diferenciales en cuanto a su gestión en el transporte respecto a otros sectores, por lo que sólo se hará mención a ellos cuando se estime que ello es relevante por alguna razón.

Los dos primeros tipos de los *consumos de explotación* pueden denominarse como *consumos de los vehículos* y los dos últimos como *consumos diferentes de los de los vehículos*.

El consumo de energía por los vehículos (para tracción y servicios auxiliares), que impropiamente, y en conjunto, suele denominarse genéricamente como consumo de *energía para tracción*, supone la mayor parte del consumo energético del transporte.

2.1.1 Energía necesaria para el mantenimiento y otros consumos indirectos

Consumos de mantenimiento

Una parte de la energía que se emplea para el mantenimiento depende directamente del uso de los vehículos, por ejemplo la energía necesaria para fabricar el aceite de lubricación; los neumáticos de los vehículos de carretera o las ruedas de los vehículos ferroviarios, que deben ser reemplazadas cada cierto número de kilómetros. Igual ocurre con algunos costes de mantenimiento de las infraestructuras.

Dependiendo del objeto del análisis podría ser necesario añadir al consumo derivado de la circulación del vehículo los consumos energéticos marginales producidos por el mantenimiento del vehículo y en su caso, de la infraestructura.

Movimientos en vacío

Por otra parte, además de los consumos directos producidos por el movimiento comercial, en los vehículos existen otros consumos de explotación que no pueden imputarse directamente a un servicio concreto. Así ocurre con la energía empleada en los movimientos en vacío, o la consumida por los auxiliares de los vehículos cuando éstos se encuentran detenidos pero con una parte de los servicios auxiliares en funcionamiento.

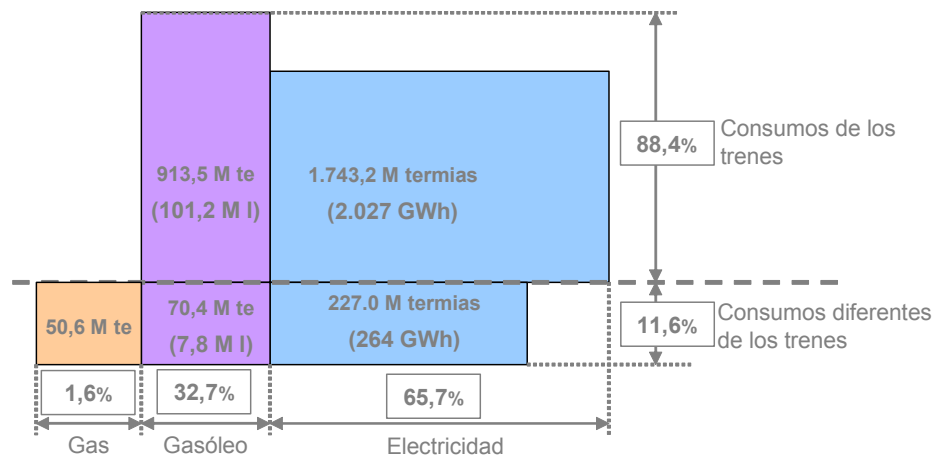
También dependiendo del objeto del estudio puede ser conveniente tener en cuenta estos consumos indirectos, aplicando un coeficiente de mayoración al consumo necesario para el movimiento y los auxiliares.

2.1.2 Comparación de la energía empleada en la explotación del transporte

Para la evaluación comparativa y aproximada de unos y otros usos de la energía se empleará el ferrocarril que, en el caso de las empresas ferroviarias integradas (que realizan tanto la explotación de la infraestructura como la operación de los servicios de transporte), ofrece una panorámica bastante completa, tanto de tipos de usos de la energía, como de combustibles y vectores energéticos empleados.

Si se analizan, por vía de ejemplo, los datos de una empresa ferroviaria integrada (que gestiona la infraestructura y además ofrece servicios de transporte) como era Renfe en 2002, se observa que el consumo para usos distintos de los propios de los trenes representa el 11,6% de la energía consumida en termias, y un porcentaje ligeramente superior (alrededor del 13%) del gasto económico (debido al menor precio unitario de la energía para uso de los trenes).

Figura 2. Usos de la energía y vectores energéticos empleados en el ferrocarril como ejemplo de un modo de transporte integrado



Fuente: García Álvarez (2006)

La mayor parte de la energía es de origen eléctrico, pero ésta es una singularidad del ferrocarril y de la tubería.

2.2. Flujos de energía

Para el análisis del consumo de energía en el transporte, en la parte que se refiere a la energía consumida por los vehículos, resulta básico disponer de una visión de conjunto sobre los diferentes tipos de tracción y de suministro a los servicios auxiliares; los vectores energéticos utilizados en cada caso; y las fuentes de energía empleadas.

Esto es de singular importancia por cuanto el suministro de energía es una “cadena” cuyos efectos deben analizarse en su conjunto. Así, es engañoso pensar que un vehículo es especialmente eficiente porque lo sea su sistema de propulsión si emplea un vector energético que se produce con un rendimiento muy bajo o con un nivel de emisiones alto.

Ello resulta especialmente relevante cuando se compara la tracción eléctrica con la producida por los motores térmicos (diésel o de gasolina, por ejemplo). En el primer caso, los vehículos son muy eficientes, pero el rendimiento energético global se ve muy condicionado por la estructura de generación de electricidad y por las pérdidas en el transporte de electricidad. Según los casos, pueden llegar a apreciarse rendimientos globales similares en ambos sistemas.

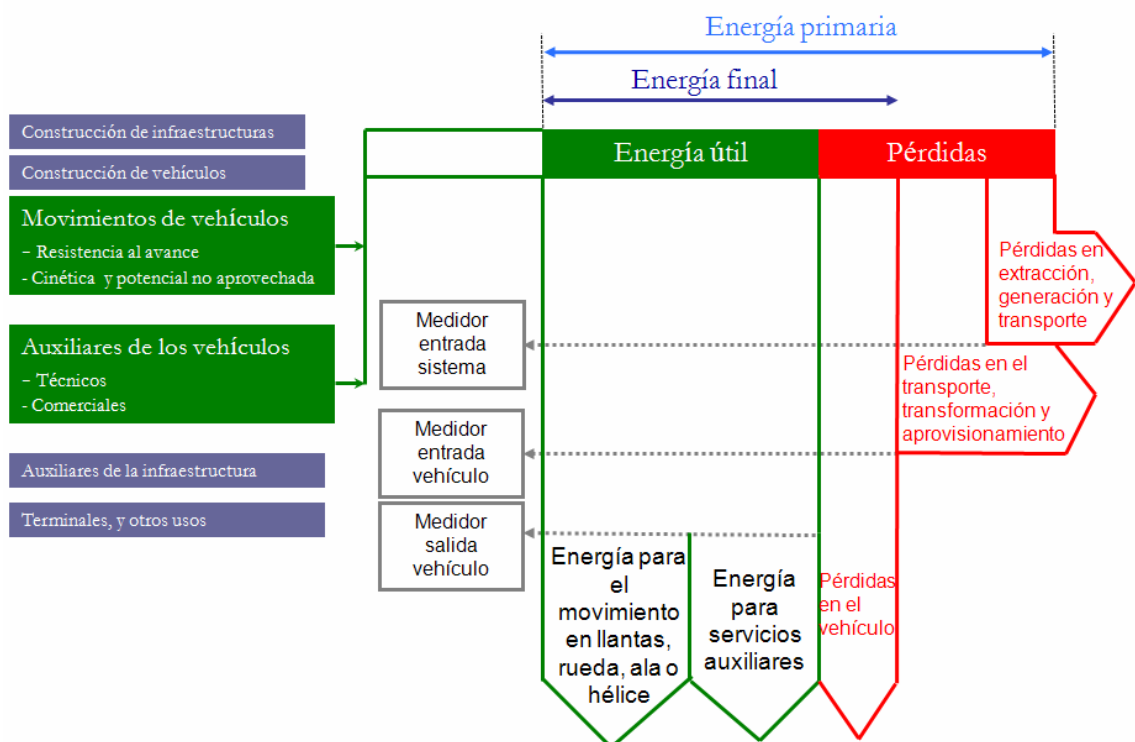
Para una mejor comprensión del problema, el flujo de energía consumida por los vehículos puede medirse para su análisis, de forma genérica para todos los modos de transporte y tipos de tracción, en cuatro “puntos de control” que, comenzado a describirlos desde el fin de la cadena (en coherencia con el enfoque “de abajo a arriba” de ese trabajo), serían los siguientes:

- **Energía útil**, sería la energía realmente utilizada para el movimiento del vehículo (medida en llantas, en hélice, en rueda o en ala); y la energía empleada para los servicios auxiliares (medida en la entrada de los equipos consumidores de esta energía).
- **Energía final** sería la energía que entra al vehículo, que es el resultado de sumar a la energía útil, la energía que se pierde en los procesos de

transformación y cambio de características que se producen dentro del vehículo. Entre estas pérdidas pueden citarse las del motor, de la transmisión del vehículo, las de generación de energía embarcada, de almacenamiento, la de transformación de energía, etc.

- **Energía suministrada al sistema de transporte**, que es diferente de la anterior en los casos en que se requiere un transporte o almacenamiento previo a la entrada de la energía en el vehículo (por ejemplo, en el caso de los aprovisionamientos a flotas desde depósitos centrales o de la energía eléctrica que se suministra a la compañía ferroviaria en las subestaciones de tracción). Realmente, la medición (intermedia) de esta energía no es relevante desde el punto de vista del consumo energético, pero sí puede serlo desde el punto de vista del coste económico soportado por el operador del transporte, ya que es la energía que paga.
- **Energía primaria**: es el resultado de sumar a la energía suministrada al sistema de transporte la que se pierde en los procesos de extracción, transporte, generación (en el caso de la eléctrica) o de refino (en el caso de derivados del petróleo), y en la conversión que se producen desde las fuentes primarias hasta el punto de entrega al sistema de transporte.

Figura 3. Flujos energéticos para los vehículos



Fuente: García Álvarez (2006)

Desde el punto de vista expositivo, estimamos preferible (en coherencia con el enfoque adoptado “de abajo arriba”) comenzar por describir los consumos del vehículo, para pasar después al estudio de la energía final y a las fuentes de energía primaria requeridas.

2.2.1 Esquema de flujos de la electricidad y el petróleo

Como se expondrá más adelante, y si se prescinde de los nuevos combustibles o sistemas de propulsión, existen tres formas principales de suministrar energía al vehículo:

- Con electricidad, que alimenta a motores eléctricos.
- Con gas, empleado en ocasiones para la propulsión en coches, autobuses y en gasoductos.
- Con derivados del petróleo, que alimentan a motores de explosión y turbinas de gas.

El flujo de la energía, en cada una de sus formas, incluye la fuente de producción, la distribución y transporte al punto de entrega al sistema de transporte y el uso final en cada una de las formas.

El conocimiento del flujo permite analizar los rendimientos y costes totales de cada uno de los consumos. Así, el punto de suministro de la energía al sistema es relevante tanto para conocer su coste (si es preciso hacer transformaciones y transportes), como para saber qué pérdidas se incluyen dentro el sistema y cuáles se producen fuera del mismo.

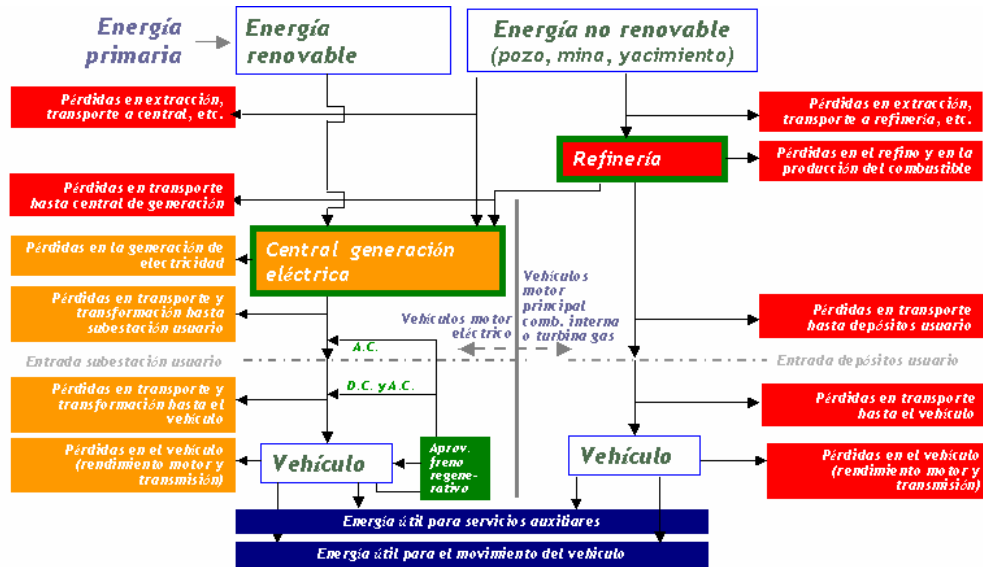
La estructura de producción de la energía eléctrica permite conocer el consumo de energía primaria, de energías renovables, las emisiones y la contaminación, considerando el conjunto del flujo.

Este análisis es relevante, ya que hace posible el conocimiento de los costes totales del empleo de energía en el transporte, que no resultan evidentes si sólo se analiza el coste económico y los consumos del sistema sin atender a su origen y a los procesos previos de transformación y transporte.

En efecto, el rendimiento energético de la tracción eléctrica en el vehículo es mayor que en la tracción diésel y además no contamina ni tiene emisiones. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la producción de energía eléctrica requiere el empleo de cantidades variables de petróleo, carbón o gas en las centrales térmicas, resulta que este tipo de tracción sí tiene un efecto contaminante, y que su rendimiento global en términos de energía primaria puede no ser tan diferente del de la tracción diésel.

En la figura se muestra el flujo energético para los vehículos, distinguiendo entre energías renovables y no renovables, y se pueden localizar las pérdidas que tienen lugar desde la extracción de la energía hasta que ésta llega al vehículo.

Figura 4. Flujos energéticos para la explotación de los vehículos



Fuente: García Álvarez (2006)

2.3. Pérdidas de energía

Hasta aquí se han expuesto cualitativamente los flujos y etapas de la energía. En este apartado se pretende dar un orden de magnitud de los rendimientos y las pérdidas que se producen en los diferentes procesos de transformación.

La energía, como se ha expuesto, se encuentra inicialmente en un lugar y con una forma diferente de los que se requieren para su uso final. Por ello se llevan a cabo procesos de transporte y transformación (refino, generación de electricidad,...) en los cuales se producen pérdidas. Además, una vez que la energía llega a los sistemas de tracción, se producen pérdidas asociadas en las máquinas rotativas y otros motores de transformación.

2.3.1 Definición de rendimientos y coeficientes de pérdidas

Definimos el *coeficiente de pérdidas* como:

$$C_{\text{pérdidas}} = 1 + \frac{\text{Energía}_{\text{entra}} - \text{Energía}_{\text{sale}}}{\text{Energía}_{\text{sale}}} = \frac{\text{Energía}_{\text{entra}}}{\text{Energía}_{\text{sale}}}$$

Denominamos *rendimiento*, al cociente entre la energía que sale de un elemento del sistema y la energía que entra al mismo:

$$\rho = \frac{\text{Energía}_{\text{sale}}}{\text{Energía}_{\text{entra}}}$$

Conforme a estas definiciones, si se dispone del valor del rendimiento, la energía requerida “aguas arriba” se calcula como:

$$\text{Energía}_{\text{aguas Arriba}} = \frac{\text{Energía}_{\text{sale}}}{\rho}$$

Y la energía “aguas abajo”

$$Energía_{aguas.Abajo} = Energía_{entra} \times \rho$$

Si se dispone del valor del *coeficiente de pérdidas*, la energía “aguas arriba” se calcula como:

$$Energía_{aguas.Arriba} = Energía_{sale} \times C_{pérdidas}$$

Y la energía “aguas abajo”

$$Energía_{aguas.Abajo} = \frac{Energía_{entra}}{C_{pérdidas}}$$

Tanto las pérdidas como el rendimiento se pueden expresar como coeficientes (entonces $C_{pérdidas} > 1$ y $\rho < 1$) o como porcentajes (entonces *Porcentaje de pérdidas* = $(C_{pérdidas} \times 100) - 100$).

2.3.2 Clasificación de las pérdidas de energía

Las pérdidas de energía, empleando la terminología aplicada en el transporte por carretera (que es aplicable a otros modos de transporte), se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de dónde se produzcan:

Pérdidas *well to tank* (WTT): son las pérdidas que se producen desde la rueda del pozo de petróleo, es decir desde la fuente de energía primaria, hasta el aprovisionamiento al vehículo.

- En el caso de tracción con derivados del petróleo, comprenden la energía necesaria para la extracción, refinado, el transporte, etc. y suponen un rendimiento equivalente de alrededor del 81 al 88%
- En tracción eléctrica incluyen las pérdidas en la generación de la electricidad y en el transporte hasta el punto de suministro, y representan un rendimiento equivalente del orden del 37 al 43%.

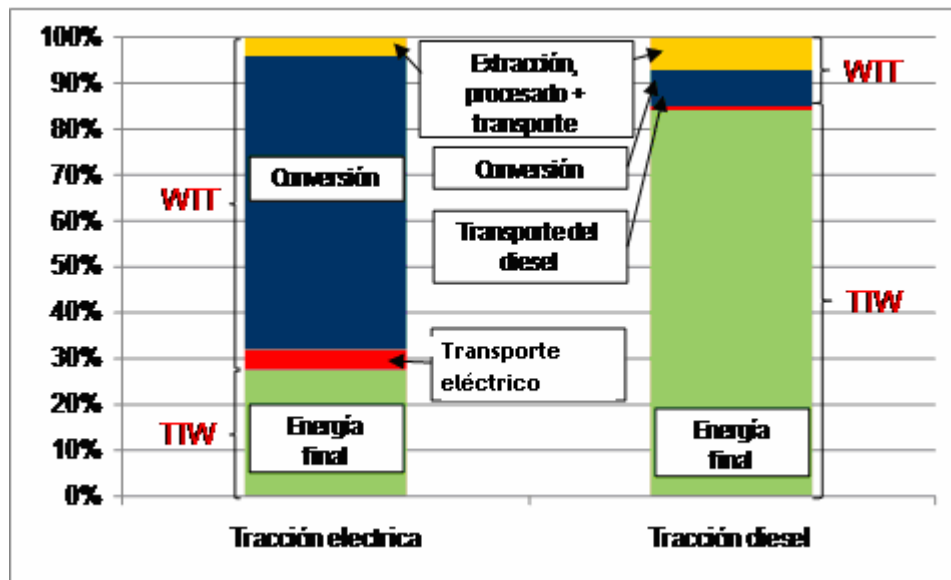
Pérdidas *tank to wheel* (TTW): son las pérdidas desde el suministro al vehículo (*tank*) hasta las ruedas del vehículo.

- En el caso de tracción con derivados del petróleo comprenden las pérdidas en el motor y en la transmisión, y equivalen a un rendimiento de alrededor del 28 al 35%.
- Para la tracción eléctrica, son las pérdidas en el motor y en la transmisión, y suponen un rendimiento equivalente de un 78 a un 92%.

Las pérdidas totales son la suma de las pérdidas *well to tank* y las *tank to wheel*, y el rendimiento equivalente total es, en cada caso, el producto de los dos rendimientos.

El flujo cualitativo de la energía procedente de derivados del petróleo y de la eléctrica es similar y, como se puede observar en la siguiente figura, las pérdidas globales son similares, aunque no así las pérdidas parciales en cada una de las dos etapas.

Figura 5. Porcentaje aproximado de pérdidas de la energía en origen desagregadas por fases



Fuente: Elaboración propia

3. ENERGÍA ÚTIL

Entendemos por *energía útil* la que es empleada para el movimiento de los vehículos (medida en llantas, salida de la hélice, rueda o ala); y la energía consumida para los servicios auxiliares, que se puede medir en la salida de los equipos consumidores de esta energía.

Aunque la tecnología de los distintos modos de transporte y de sus sistemas de propulsión es diferente, es posible definir una *función de consumo* similar en todos ellos. Así pues, se trata aquí de aproximarse a una forma común para el cálculo de la energía consumida por un vehículo, en la cual las diferencias de tecnología se plasmarán en la existencia o inexistencia de determinados sumandos o monomios y en los valores de los coeficientes y exponentes asociados.

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”, pero también es preciso considerar otras etapas diferenciadas del movimiento, como pueden ser la “maniobra” (de aproximación y movimiento en puerto) en el caso de transporte marítimo; el aterrizaje y el despegue en el avión; y es posible tener en cuenta consumos indirectos, como los tiempos en que el vehículo está a disposición de los viajeros o en carga y que consume energía; las maniobras ferroviarias para la formación de trenes; e incluso, en el caso de los barcos el tiempo en el que simplemente está dedicado a la vivienda del personal.

3.1. Cálculo de la energía útil

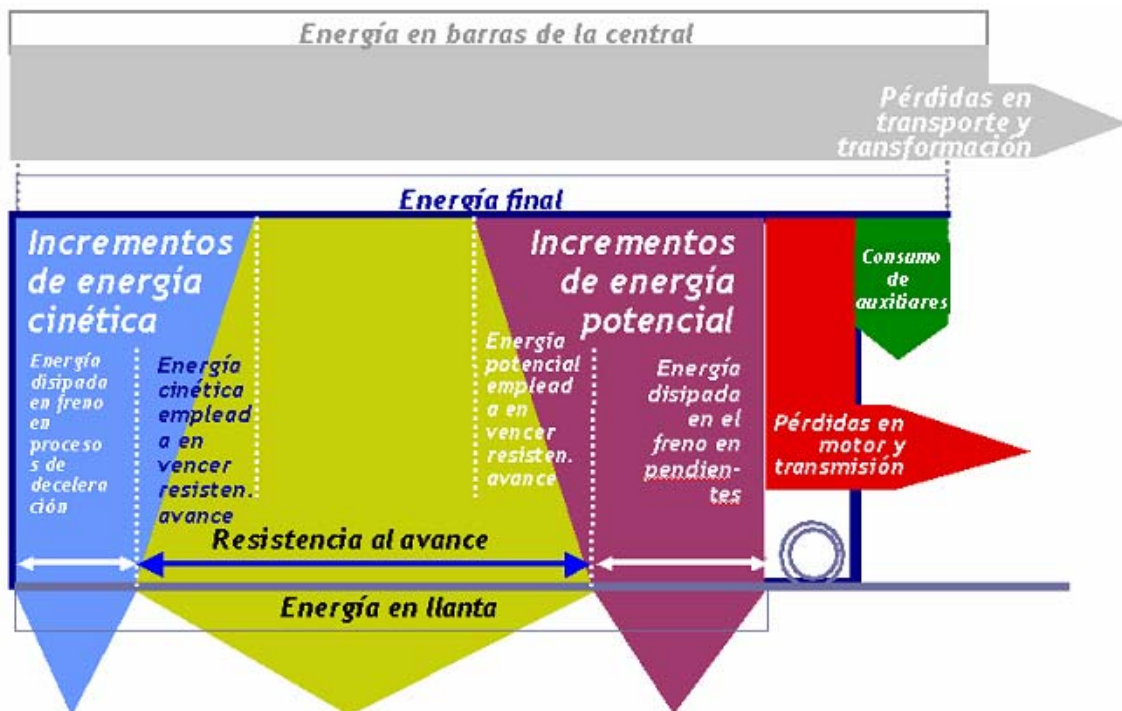
Cuando se estudia el consumo de un vehículo no se debe partir de la energía que se suministra al mismo en un instante determinado, ya que la energía potencial y cinética acumuladas en el vehículo varían constantemente a lo largo de su recorrido y pueden ser aprovechadas parcialmente para vencer la resistencia al avance y por ello no pueden ser imputadas a cada fase particular del movimiento.

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 almacenada de energía 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).

La energía que sale del vehículo es la energía necesaria para vencer la resistencia al avance, más la que se ha disipado o regenerado en los procesos de frenado. Los procesos de frenado pueden tener por objeto reducir la energía cinética del tren (al acercarse un punto de reducción de velocidad) o reducir la energía potencial (al bajar una pendiente).

En suma, es preferible calcular la energía útil empleada por el vehículo y sumar luego las pérdidas para conocer la energía final que ha consumido en el recorrido, en lugar de hacerlo al revés: estimar de la energía que entra al vehículo y, partiendo de este dato calcular la energía que sale de mismo.

Figura 6. Balance energético de un vehículo ferroviario de tracción eléctrica en un recorrido



Fuente: García Álvarez (2006)

La energía útil en la función de consumo

La función de consumo está integrada por tres sumandos principales, uno de ellos con signo positivo y uno con signo negativo:

- Energía (incluyendo la disipada en el freno) consumida para el movimiento del vehículo (+).
- Energía consumida por los servicios auxiliares, tanto de tracción como de confort (+).
- Energía devuelta al exterior del vehículo (-).
- A continuación se detalla el proceso de cálculo o de estimación de cada uno de ellos.

3.2. Energía útil consumida para el movimiento del vehículo

Se puede esquematizar el funcionamiento energético del movimiento del vehículo sabiendo que, en cada instante, el vehículo debe vencer una fuerza que se opone a su avance y recibir, además, energía necesaria para aumentar su velocidad, o su altura. Y que el vehículo cede (o disipa) una cantidad de energía como consecuencia de una reducción de su velocidad o de su altura. Por lo tanto, en su movimiento (y con independencia del consumo de energía para los servicios auxiliares), los vehículos reciben energía fundamentalmente para tres funciones:

- Para vencer la “resistencia al avance” (que, como hemos expuesto, depende de la masa del vehículo, de su velocidad, de que circule en cielo abierto o en túnel, en algunos modos de transporte de las curvas, de la cantidad de aire que entra al vehículo y de la resistencia de presión y fricción del aire circundante).
- 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 vehículo conlleva un aumento de la energía cinética acumulada en él.
- Para aumentar su altitud: cada vez que el vehículo supera una rampa, su altitud aumenta y, por ello, la energía potencial que lleva acumulada.

Por el contrario, el vehículo puede ceder energía:

- Cuando reduce su velocidad, tanto en una parada como en cualquier tramo en que pasa de una velocidad mayor a una velocidad menor.
- Cuando pierde altitud al circular por una pendiente, ya que disminuye la energía potencial.

Así pues, la energía empleada por el vehículo en un recorrido circular (que equivale a la *energía útil* para el movimiento en llanta) es:

1. Energía empleada para vencer la resistencia al avance en recta (en un kilómetro medio):

$$\frac{E_{ar}}{L} = \frac{R_a \times L}{L} = A^t + B^t \times V^s_{media} + \left(C^t \times (V^s_{media})^2 + C^t \times \sigma^2(v) \right) \times \left[(T^s_f - 1) \times T^s_l + 1 \right]$$

donde:

E_{ar} es la energía necesaria para vencer la resistencia al avance (kWh/km)

A^t es el coeficiente de resistencia mecánica del vehículo (daN)

B^t es el coeficiente de resistencia a la entrada de aire (normalmente depende de la velocidad) (daN/km/h)

V^s_{media} es la velocidad media del servicio (km/h)

C^t es el coeficiente de resistencia aerodinámica (normalmente depende de la forma y tamaño del vehículo). (daN/(km/h)²)

$\sigma^2(v)$ es la desviación típica de las velocidades respecto a su media. (km/h)

T^s_f es el factor de túnel (adimensional).

T^s_l es la longitud media en túnel por kilómetro en el recorrido (km)

2. En el caso específico del ferrocarril, la energía requerida para vencer la resistencia adicional al avance en las curvas (en un kilómetro medio):

$$\frac{E_{ac}}{L} = \frac{\sum R_{ac} \times l}{L} = \left[\sum l_c \times \frac{800}{R_c} \times M^t \right] \times \frac{1}{L} = C^s_c \times M^t$$

donde:

E_{ac} es la energía necesaria para vencer la resistencia al avance en las curvas (kWh/km)

l_c es la longitud de la curva (m)

R_c es el radio de la curva (m)

M^t es la masa del vehículo (t)

L es la longitud total del recorrido (m)

C^s_c es el coeficiente de curvas (daN/t)

El valor 800 deberá sustituirse por otros valores, según el ancho de vía.

3. En el caso de los barcos es preciso sumar la resistencia hidrodinámica (viscosa) que afecta a las partes sumergidas del buque (“obra viva”) ya que la resistencia aerodinámica afecta sólo a las partes por encima del agua (“obra muerta”). Ambas resistencias son proporcionales a la densidad del fluido respectivo y al cuadrado de la velocidad.

$$\frac{E_h}{L} = \frac{R_{ha} \times L}{L} = [C^t + D^t] \times \left[(V^s_{media})^2 + \sigma^2(v) \right]$$

donde:

E_h es la energía necesaria para vencer la resistencia hidrodinámica (kWh/km)

C^t es el coeficiente de resistencia aerodinámica (normalmente depende de la forma y tamaño del vehículo). (daN/(km/h)²)

$\sigma^2(v)$ es la desviación típica de las velocidades respecto a su media. (km/h)

D^t es coeficiente de resistencia hidrodinámica que depende entre otros factores de la forma y tamaño de la parte del barco que va sumergida (obra viva).

V^s_{media} es la velocidad media del servicio (km/h)

4. Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad, considerando en su caso, el efecto de la *conducción económica* (en un kilómetro medio), pero sin considerar la existencia de freno regenerativo:

$$E_b = \frac{1}{2} \times (M^t + M^t_{rot}) \times \frac{1}{D^s_p} \times (V^s_{max F})^2$$

donde:

E_b es la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad

M^t es la masa del vehículo (t)

M^t_{rot} son las masas rotativas del vehículo (t)

D^s_p es la distancia entre paradas (km)

$V^s_{max F}$ es la velocidad máxima a la que se aplica el freno desde la velocidad máxima de servicio hasta esta velocidad se supone que se circula en deriva (km/h)

De esta cantidad de energía, se resta la que se emplea para vencer la resistencia al avance durante el proceso de deceleración.

$$E_{ravid} = \frac{A^t \times (V^s_{max})^2}{2 \times d^s} + \frac{B^t \times (V^s_{max})^3}{3 \times d^s} + \frac{C^t \times (V^s_{max})^4}{4 \times d^s} + \frac{D^t \times (V^s_{max})^4}{4 \times d^s}$$

donde:

E_{ravn} es la energía necesaria para vencer la resistencia al avance durante el proceso de deceleración (kWh/km)

$V_{\max}^s$ es la velocidad máxima del servicio (km/h)

A^t es el coeficiente de resistencia mecánica del vehículo (daN)

B^t es el coeficiente de resistencia a la entrada de aire (normalmente depende de la velocidad) (daN/km/h)

C^t es el coeficiente de resistencia aerodinámica (normalmente depende de la forma y tamaño del vehículo). (daN/(km/h)²)

d^s es la deceleración medida (m/s²)

5. Energía potencial disipada en el freno en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima (en un kilómetro medio), suponiendo que no existe freno regenerativo. En el caso de vehículos con freno regenerativo una parte de esta energía se recupera a través de dicho freno.

$$Ep = M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L}$$

El *exceso específico de pendientes* ($p_t - p_e$), se define como la diferencia (en “[mm/m]/km”) entre la *pendiente real* y la *pendiente de equilibrio* en los tramos en que este valor sea positivo, multiplicada por la longitud en que existe esa diferencia y dividida por la longitud total del tramo. Tiene la utilidad de que se relaciona directamente con la parte de energía potencial que es disipada en el frenado en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima.

Por lo tanto la energía total neta consumida por el vehículo en un kilómetro medio:

$$\begin{aligned} E_T = & \left(A^t + B^t \times V_{\max}^s + \left(C^t \times (V_{\max}^s)^2 + C^t \times \sigma^2(v) \right) \times \left[\left((T_{\max}^s - 1) \times T_{\max}^s \right) + 1 \right] \right) + \\ & + \left[C^t + D^t \right] \times \left[(V_{\max}^s)^2 + \sigma^2(v) \right] + \left(\frac{1}{2} \times (M^t + M_{\text{rot}}^t) \times \frac{1}{D_p^s} \times (V_{\max}^s)^2 \right) - \\ & - \left(\frac{A^t \times (V_{\max}^s)^2}{2 \times d^s} + \frac{B^t \times (V_{\max}^s)^3}{3 \times d^s} + \frac{C^t \times (V_{\max}^s)^4}{4 \times d^s} + \frac{D^t \times (V_{\max}^s)^4}{4 \times d^s} \right) \\ & + \left(M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L} \right) \end{aligned}$$

Los valores de los que depende cada uno de los coeficientes varían según el modo de transporte, e incluso para un mismo modo de transporte según el tipo de vehículo, pudiendo ser cero en algunos casos.

Estos valores también varían, para un mismo modo de transporte y vehículo, según el tipo de servicio (velocidad máxima, velocidad media, número de paradas, etc.)

3.3. Energía consumida por los servicios auxiliares

Los *servicios auxiliares* de los vehículos son equipos embarcados que consumen energía para usos diferentes del propio movimiento del vehículo. Pueden incluirse en este apartado dos tipos de consumos:

- *Consumos auxiliares de tracción*, entendiendo por tales los consumos de ventiladores, compresores, convertidores, focos, etc.
- *Consumos comerciales (o de confort)*, como son los de la calefacción y acondicionamiento de aire para el confort térmico de los viajeros, la iluminación interior de los vehículos, el funcionamiento de cafeterías, frigoríficos para la conservación de alimentos, equipos de refrigeración para las mercancías, etc.

Los *consumos de auxiliares de tracción* difieren de unos modos de transporte a otros y por tanto no es posible realizar una generalización en cuanto a su modelado, aunque no son, en general, muy significativos.

Los *consumos de auxiliares de confort* más importantes proceden de la calefacción y la climatización, pero hay algunos elementos singulares en los trenes, los barcos y los aviones, tales como los frigoríficos, que tienen unos requerimientos importantes de fiabilidad y continuidad, y los secadores eléctricos de manos de los aseos, cuyo consumo medio no es elevado, pero que requieren una potencia relativamente alta e inducen puntas de consumos, etc.

Los consumos energéticos de estos servicios han sufrido una importante evolución a lo largo del tiempo, en un doble sentido:

- Por un lado, los propios servicios han ido aumentando: en el pasado, los vehículos de transporte de viajeros sólo disponían de calefacción y de iluminación, mientras que otros servicios como cafetería, cocinas, puertas automáticas, aseos de vacío o químicos, entretenimiento a bordo, música, videovigilancia... han ido apareciendo y potenciándose a lo largo del tiempo.
- Los servicios auxiliares se alimentaban antes de forma autónoma e independiente de suministro de energía de tracción: Desde los primitivos calefactores al gas o petróleo que alimentaba el alumbrado de los trenes y los barcos, pasando por el carbón o el gas butano para las cocinas de los clásicos trenes de coches camas de la “Belle époque”. El suministro de ciertos servicios auxiliares desde el vehículo comenzó con la calefacción de vapor de los trenes o barcos que aprovechaba el vapor generado en la locomotora o con calderines instalados en furgones desde los que se alimentaba una tubería específica a lo largo del tren para suministro de éste. En la actualidad, el suministro de la energía para los servicios auxiliares en los vehículos procede, en casi todos los casos, de las mismas formas de energía que las empleadas para la tracción, y se entrega al vehículo confundida con ella.

En general los auxiliares técnicos pueden dividirse en dos grupos: climatización e iluminación y otros usos.

El consumo de energía de un vehículo que se destina a la iluminación se puede calcular como la superficie útil bruta del vehículo multiplicada por un parámetro de kWh/h·m² (orientativamente 0,1 kWh/h·m²).

El consumo de energía destinado a la climatización depende de la diferencia entre la temperatura exterior y la de consigna interior, el volumen de aire a acondicionar, el tiempo y frecuencia de apertura y cierre de puertas, la conductividad térmica de la caja del vehículo, las superficies de disipación (ventanas,...) y la carga térmica de los viajeros.

El consumo medio por kilómetro de los equipos de climatización se puede calcular como la media ponderada del consumo para diversos tipos de días: días “cálidos”, “medios” y “fríos”. La diferencia en el cálculo del consumo auxiliar de calefacción y

aire acondicionado en días cálidos, normales y fríos, es el incremento de temperatura (ΔT), que es diferente para cada tipo de día (valor parametrizable).

La fórmula es la misma en días cálidos y normales (con valores diferentes del ΔT), pero no así en días fríos, ya que en éstos días, las ganancias internas hay que tener en cuenta que la temperatura de las personas es mayor que la temperatura exterior. Por ello, el signo de las ganancias interna (debidas en su mayor parte al sensible y latente de las personas) hay que restarlo en lugar de sumarlo. Por otra parte, en estos días no se considera el efecto de la radiación solar.

A su vez el consumo para cada uno de estos tipos de días se puede hacer por agregación del consumo debido a:

- Ganancias por radiación solar: dependen del coeficiente de transmisión de calor ($W/m^2\text{ }^\circ C$), la piel del tren y la superficie de ventanas.
- Ganancias por transmisión: dependen del coeficiente de transmisión de calor ($W/m^2\text{ }^\circ C$), la piel del tren y la superficie de ventanas.
- Ganancias por infiltración y ventilación: depende del número de viajeros, la diferencia entre la temperatura interior y la de consigna, el incremento específico de humedad y las renovaciones de aire ($m^3/\text{viajero}$).
- Ganancias internas: se deben al calor sensible y latente de los viajeros. Dependen del número de viajeros, la potencia total de iluminación y la potencia de los evaporadores.

Merece ser destacado que los consumos de los auxiliares no solo se producen cuando el vehículo está en movimiento, sino también cuando está parado, tanto en paradas comerciales, como en talleres o limpieza o simplemente parado con los equipos funcionando. Cada vez más los vehículos disponen de sistemas que permiten reducir el consumo cuando no es necesario para los viajeros o mercancía, lo que es relevante teniendo en cuenta que es frecuente encontrar tipos de vehículos que en un día están más hora parados con los equipos en funcionamiento que moviéndose.

Los vehículos deberían poder graduar la entrada de aire en función de las plazas ocupadas.

3.4. Energía generada en el frenado

En el caso del ferrocarril y de algunos (muy pocos) automóviles, existe una clase de freno eléctrico llamado *regenerativo*, que permite el aprovechamiento y devolución de parte de la energía generada en el frenado (tanto por las reducciones de velocidad como por la bajada de pendientes)

La energía eléctrica generada en el proceso de frenado puede almacenarse en el propio vehículo en el caso de los automóviles. Pero el ámbito del uso del freno regenerativo de gran escala se reduce al ferrocarril, cuyas características básicas, desde el punto de vista de los flujos de energía expondremos seguidamente.

Si el tren está dotado de sistema de freno regenerativo, normalmente en primer lugar intenta aprovecharla para la alimentación de los servicios auxiliares, y así lo hace en la medida de lo posible. Si los servicios auxiliares requieren menos energía de la que el vehículo está generando en el proceso de frenado trata de enviar la electricidad “sobrante” a la catenaria, y si no es posible, la disipa¹.

Para tener en cuenta la recuperación de energía (medida en términos de energía final) es preciso considerar el porcentaje de energía devuelta a la red por el freno regenerativo, para lo que se incorpora el término B^s_r que expresa el porcentaje de aprovechamiento por el freno regenerativo de la energía total disipada en el freno, y depende del número de ejes que estén equipados con freno regenerativo, de la deceleración que se desea alcanzar y de la cantidad de trenes que requieran energía (acelerando) en la misma sección eléctrica que el tren que frena.

$$E_{fr} = \left[\left(\frac{1}{2} \times (M^t + M^t_{rot}) \times \frac{1}{D^s_p} \times (V^s_{max F^2} - V^s_{min F^2}) \right) - \left(\frac{A^t \times (V^s_{max^2} - V^s_{min F^2})}{2 \times d^s} + \frac{B^t \times (V^s_{max^3} - V^s_{min F^3})}{3 \times d^s} + (C^t + D^t) \times \frac{(V^s_{max^4} - V^s_{min F^4})}{4 \times d^s} \right) + \left(M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L} \right) \right] \times \rho^t_b \times B^s_r$$

donde:

D^s_{pc} es la distancia entre paradas comerciales (km)

D^s_{pe} es la distancia entre paradas equivalentes por reducción de velocidad (km)

D^s_{pt} es la distancia entre paradas técnicas (km)

M^t es la masa del vehículo (t)

M^t_{rot} son las masas rotativas del vehículo (t)

$V^s_{d max}$ velocidad máxima en deriva (km/h)

$V^s_{min F}$ es la velocidad mínima del freno regenerativo en el caso de disponer de él (km/h)

g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

ρ^t_b es el rendimiento del freno regenerativo (energía devuelta a la salida de vehículo/energía mecánica disipada en el freno).

3.5. Energía consumida en fases complementarias del ciclo de transporte

Las expresiones anteriores se refieren a las fases del ciclo de uso en las que el vehículo se está moviendo, tanto para hacer recorrido productivo (cargado o vacío)

¹ En algunos casos puede ser devuelta a la red eléctrica pública

para reposicionamiento o para ir a mantenimiento) como para fases terminales del viaje (maniobras en los barcos o trenes, o aterrizaje y despegue en el avión).

En el “ciclo de uso” de los vehículos hay otras fases diferentes del las del movimiento que requieren el uso de energía, generalmente para servicios auxiliares, que deben tenerse en cuenta con las peculiaridades de cada caso. Así, es el tiempo en que los trenes o autobuses están puestos a disposición de los viajeros para que accedan a ellos, los tiempos de carga y descarga de aviones y barcos, etc...

La siguiente tabla resume las fases en las que los diferentes modos de transporte emplean energía.

Tabla 2. Consumo energético en las fases del ciclo de transporte

¿Emplea vehículo?	Consumo energético en las fases del ciclo de transporte				
	Mov. cargado o en servicio	Mov. en vacío	Maniobras y aproximación	Carga y descarga	Vivienda de personal
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	No	No	No
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	No	No	No
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	No	No	No
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	Formación (mov. y aux.)	aux	No
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	Puerto (mov. y aux.)	aux	aux
Sí	mov. y aux.	mov. y aux.	Aterri/Desp/Taxi (mov. y aux)	aux	No
No	mov. y aux.	No	No	No	No
No	mov. y aux.	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

4. ENERGÍA FINAL

La *energía final* es la energía que entra al vehículo (en el depósito de combustible o en el pantógrafo):

- Si adoptamos un enfoque de “abajo a arriba” podemos definirla como la resultante de sumar a la *energía útil* (la empleada para el movimiento y los auxiliares) las pérdidas que se producen dentro del vehículo.
- Si por el contrario el enfoque que se emplea es de “arriba a abajo”, se define la *energía final* como el resultado de restar a la *energía primaria* las pérdidas que se producen en los procesos de transformación, cambio de características y transporte de energía que se producen antes de llegar al vehículo.

4.1. Sistemas de propulsión

El sistema de propulsión de un vehículo de transporte está determinado por el motor principal embarcado en el vehículo para su movimiento. Cada sistema de propulsión requiere un “vector energético” y éste, a su vez, puede producirse de diversas formas.

Existen tres sistemas de propulsión fundamentales: motores de combustión interna, motores eléctricos, turbinas de gas (en aviación, reactores)

Y otros de menor importancia actualmente, como las máquinas de vapor

4.2. Vectores energéticos

El vector energético es la forma de energía utilizable que se emplea para suministrar al motor principal.

El **transporte por carretera** emplea como vectores energéticos, para todos los tipos de servicios, y de forma ampliamente mayoritaria, gasóleo y gasolina que alimentan motores de combustión interna. En ciertos casos se emplean biocombustibles (biodiesel o bioetanol) y gas natural, pero de forma aún muy minoritaria. Los escasos vehículos de carretera de tracción eléctrica o híbridos suelen emplear también derivados del petróleo como vectores energéticos que producen energía eléctrica dentro del vehículo, o bien con un generador, o bien regenerada por el freno, o de ambas formas.

El **ferrocarril**, para atender sus diferentes necesidades energéticas, emplea fundamentalmente dos vectores energéticos (electricidad y gasóleo), y también otros vectores de forma menos intensiva (gas, fuelóleo, etc.)

- La electricidad en el ferrocarril se emplea para el movimiento de los trenes que circulan con tracción eléctrica; y para la alimentación de los servicios auxiliares de los trenes que circulan con tracción eléctrica (con alguna excepción, como algunos trenes Talgo o algunos coches camas, en los que los coches llevan grupos electrógenos para alimentar sus servicios auxiliares)
- El gasóleo en el ferrocarril se emplea para el movimiento y para la alimentación de los servicios auxiliares de los trenes de tracción diésel. También se emplea para la alimentación de los grupos electrógenos de los

coches que llevan estos equipos para los servicios auxiliares, tanto cuando circulan con tracción eléctrica, como cuando lo hacen con tracción diésel. Se emplea el gasóleo para el movimiento de los trenes de tracción de turbina de gas (que son muy escasos).

- Fuelóleo: se emplea residualmente en algunos casos para el movimiento de trenes de tracción vapor (trenes históricos).

La aviación emplea como vectores energéticos:

- El queroseno (derivado del petróleo) en turbinas de gas (reactores).
- Algunos tipos de gasolinas (100LL, AVGAS), para aplicarlos en motores de combustión interna.

Los barcos emplean fuelóleo y gasóleo de diversas clases para su movimiento, que se utiliza en motores de combustión interna o en turbinas de vapor o gas.

El transporte por tubería, tanto de gas como de derivados del petróleo, emplea electricidad y en algunos también gas natural.

4.3. Orden de magnitud de rendimientos en el vehículo

Según el tipo de motor principal empleado, es decir, según el tipo de tracción, las pérdidas en el vehículo es decir las pérdidas *tank to wheel* son diferentes, y también lo es el grado de variación del rendimiento en función del régimen de funcionamiento del motor:

- En el caso de los vehículos de tracción diésel, el rendimiento del conjunto del vehículo (que depende bastante del régimen de uso de motor) suele ser del 25% al 35 %.
- En los motores de gasolina, el rendimiento del vehículo (también dependiente del uso del motor) puede ser del 23 al 33 %.
- En los vehículos de tracción eléctrica, el rendimiento del motor puede ser del orden del 80 al 90%, y es menos dependiente del régimen de funcionamiento del motor.

5. ENERGÍA PRIMARIA

Para determinar la *energía primaria* empleada por un determinado modo de transporte (tanto en el caso de la tracción eléctrica como diésel) es preciso sumar a la energía recibida por el sistema las pérdidas previas asociadas. Estas pérdidas son, como hemos expuesto, muy diferentes en la tracción eléctrica y en la tracción con derivados de petróleo.

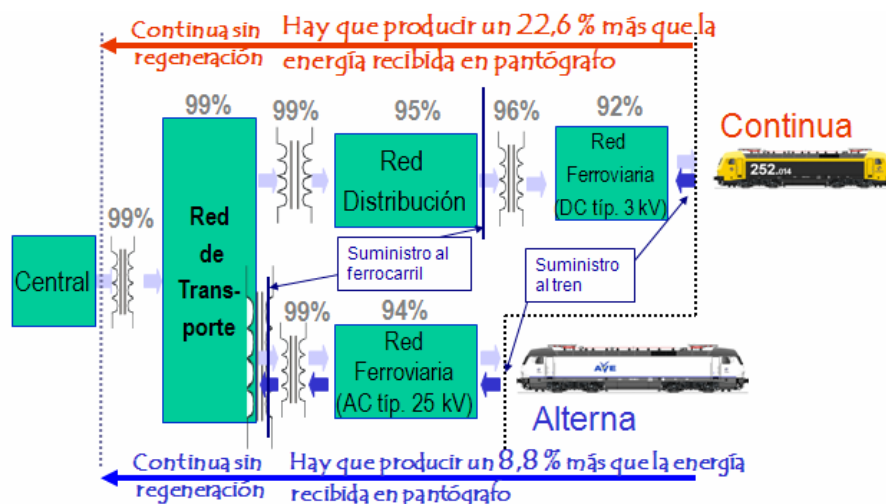
5.1. Pérdidas en tracción eléctrica

En el caso de la tracción eléctrica, las pérdidas comprenden las que tienen lugar en el proceso de generación de la energía eléctrica (que dependen del tipo de energía primaria empleada, y que difiere en cada país de un año a otro); y las que tienen lugar en los procesos de transporte de la energía y cambios de tensión desde los puntos de generación hasta los puntos de consumo (que dependen, sobre todo, de la tensión de suministro y de las características del sistema eléctrico).

Valores típicos de rendimientos en España (2002) en el caso del ferrocarril pueden ser (energía de entrada/energía de salida) de 0,39 a 0,42 para la generación y de 0,93 para el transporte, lo que da un rendimiento global para la tracción eléctrica de 0,36 entre la entrada de las plantas de generación eléctrica y la entrada en el sistema ferroviario.

En la figura se puede apreciar, para el caso español, la magnitud de las pérdidas en el ferrocarril con electrificación en corriente continua (3 kV) y alterna (25 kV, 50 Hz). Obsérvese que las pérdidas en corriente alterna son menores, a lo que se une la facilidad de transformación de tensiones mediante los transformadores y como consecuencia la facilidad para transportar grandes potencias con bajas intensidad.

Figura 7. Eficiencia energética del ferrocarril electrificado

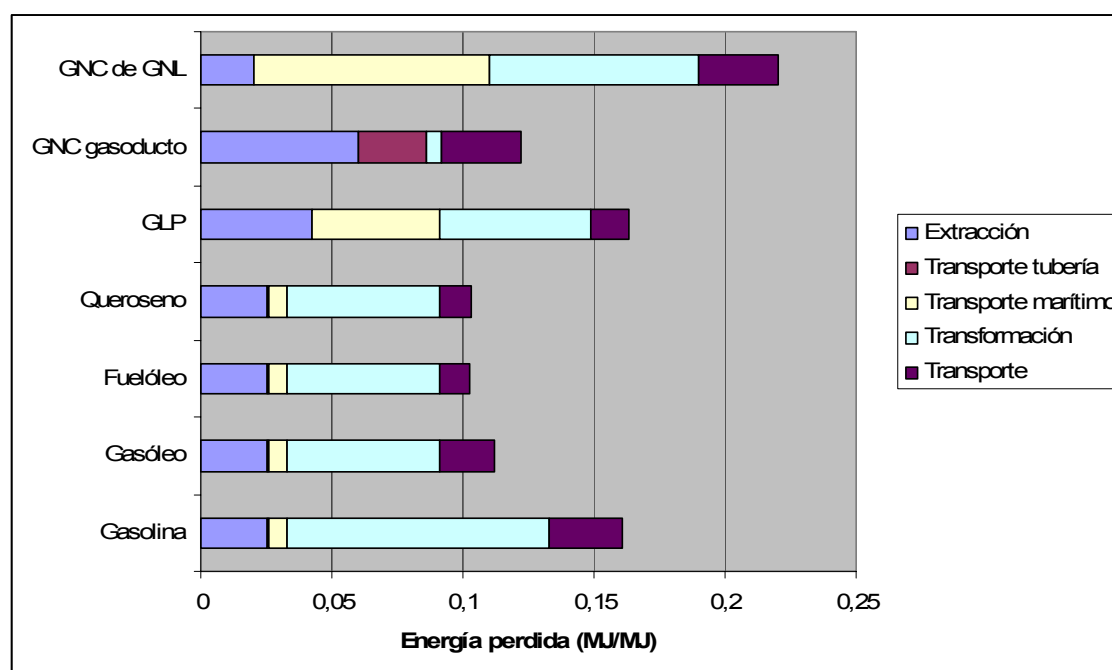


Fuente: Pilo de la Fuente (2006)

5.2. Pérdidas en tracción con derivados de petróleo

En el caso de la tracción con productos derivados del petróleo (gasóleo, gasolina, queroseno), las pérdidas previas a la llegada de la energía al vehículo son inferiores a las del caso de la electricidad, ya que el proceso de refinado y transporte anterior a la entrega al vehículo de transporte (*well to tank*) no tiene pérdidas importantes. Este rendimiento puede ser del orden de 0,81-0,88. En la figura se muestra la energía perdida en el camino de los diferentes combustibles derivados del petróleo, distinguiendo las fases de extracción, transporte por oleoducto, transporte marítimo, transformación y transporte, según INSIA (2007).

Figura 8. Pérdidas de energía en los procesos de transformación y transporte de derivados del petróleo



Fuente: INSIA (2007)

6. COSTES Y EFECTOS NEGATIVOS DEL USO DE LA ENERGÍA EN EL TRANSPORTE

Los costes del uso de la energía no son sólo de naturaleza económica, sino que también hay que tener en cuenta todos los efectos negativos que se producen por el hecho de consumir energía, que son denominados *costes sociales*. Se pueden identificar fundamentalmente tres tipos de costes o efectos negativos:

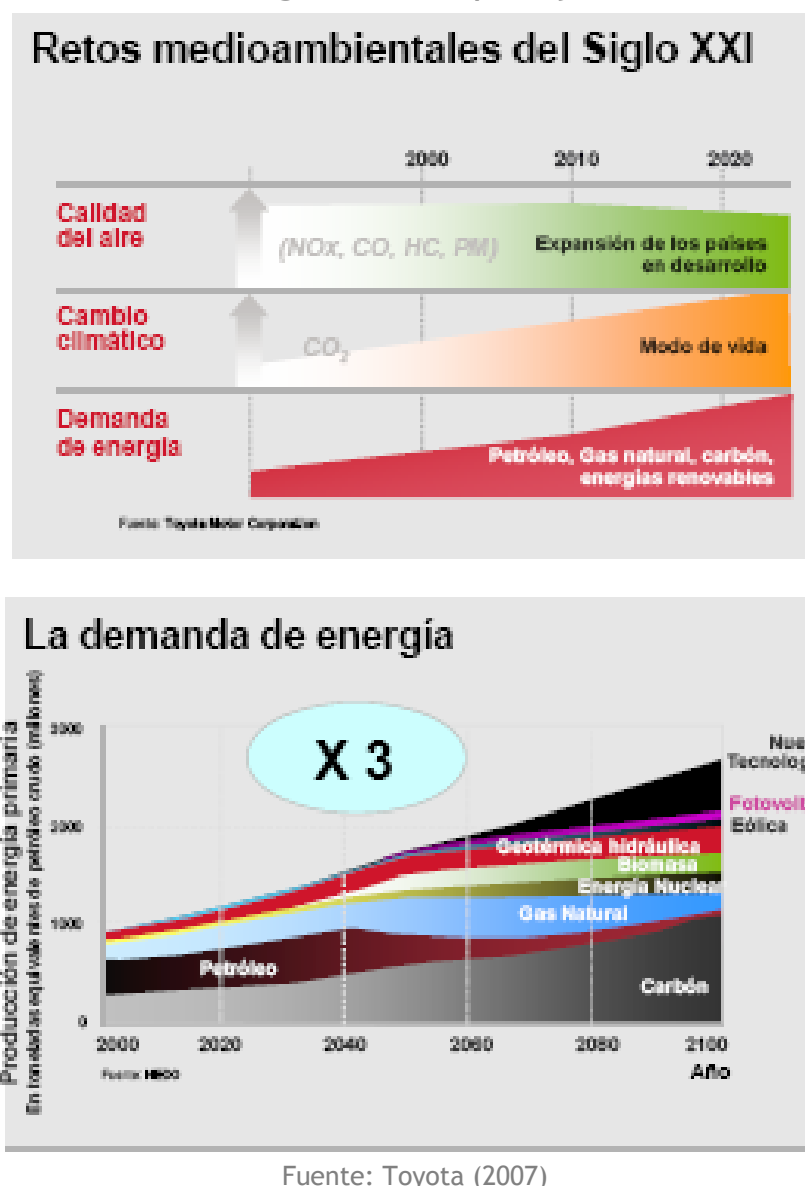
- Contribución al agotamiento de las fuentes no renovables de energía (carbón, petróleo, gas...)
- Emisión de gases de efecto invernadero
- Emisión de otros contaminantes que afectan a la calidad del aire.

En el caso del transporte, objeto de este trabajo, la tendencia de incremento de la movilidad va en contra de los esfuerzos de control de la explotación de los recursos no renovables, del efecto invernadero y de la contaminación local; puesto que para llevar a cabo el transporte es necesario sacrificar recursos naturales, en la mayoría de los casos no renovables, contribuyendo con ello al agotamiento de las fuentes de energía. Además, en los procesos asociados al consumo de energía destinada al transporte se producen emisiones con costes ambientales relevantes.

Po lo tanto, la cantidad de energía final (medida, por ejemplo, en kWh) consumida para el transporte en su conjunto o para un servicio de transporte determinando, no es un resultado relevante, ya que ese dato en sí mismo no refleja la totalidad de los efectos negativos sociales y ambientales que conlleva el uso de la energía. Para la misma cantidad de energía consumida, estos efectos pueden ser diferentes según cuál sea su origen y los procesos intermedios que ha sufrido. Por ello, como exponen Aparicio Izquierdo y López Martínez (2005) *“el consumo energético y las emisiones de efecto invernadero deben analizarse en un contexto global del pozo a la rueda (WTW) para una valoración justa entre los distintos acoplamientos sistema de propulsión-combustible”*.

Según Toyota (2007), las perspectivas de evolución de cada uno de estos problemas son diferentes: los efectos del cambio climático y el agotamiento de las fuentes no renovables se agravarán con el tiempo, debido a que se estima que la demanda energética se multiplicará por tres en los próximos 100 años; mientras que se cree que a largo plazo el problema de la calidad del aire tenderá a remitir por la mejora de los sistemas de propulsión.

Figura 9. Perspectiva de evolución de los problemas relacionados con los efectos negativos del uso de la energía en el transporte y de la demanda de energía



Hasta el descubrimiento de las consecuencias de la emisión de los gases de efecto invernadero sobre el cambio climático, el agotamiento de los combustibles fósiles era la principal preocupación en lo que se refiere al consumo de energía en general y del transporte en particular por su vinculación al petróleo.

En la actualidad, las emisiones de gases de efecto invernadero constituyen la principal preocupación, quizás con la excepción del transporte marítimo en el que las emisiones de otros contaminantes (como azufre).

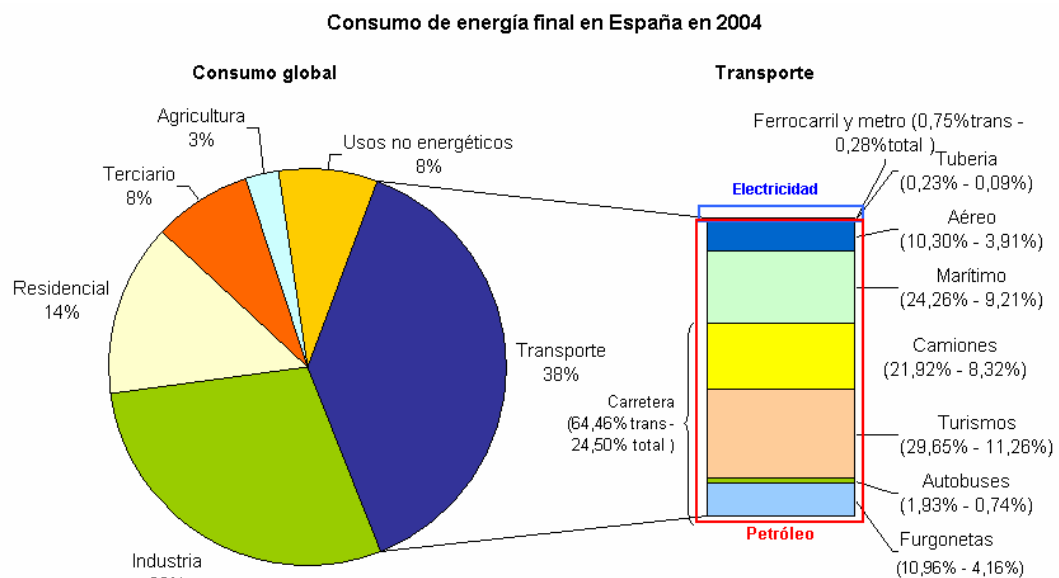
6.1. Contribución al agotamiento de las reservas naturales

El transporte es uno de los principales consumidores de energía y, con las tecnologías actuales, emplea fundamentalmente derivados del petróleo, tanto para el transporte

por carretera como para el marítimo y el aéreo. Solo una parte de transporte por ferrocarril y el transporte por tubería emplean energía eléctrica (de la que a su vez una parte es generada con combustibles fósiles, parte que es diferente según países y años).

En concreto en España en 2004, según Ministerio de Fomento (2005), se consumieron para el transporte 46,3 millones de toneladas de derivados de petróleo y tan solo 3,3 TWh de energía eléctrica, lo que significa que la electricidad (en TJ equivalentes) sólo tiene un peso del 0,6% del total de la energía consumida para el transporte.

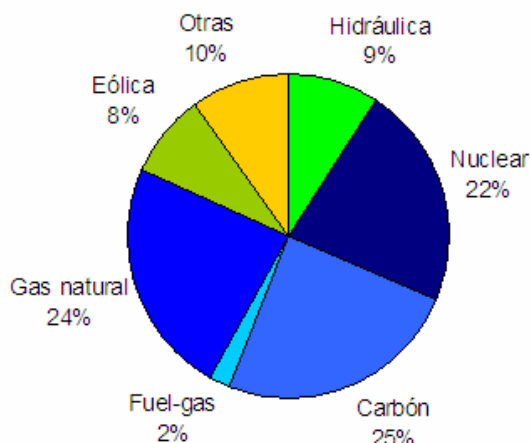
Figura 10. Consumo global y en el transporte de energía en España, por modo 2004



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de fomento (2005)

Ello implica que la demanda de energía para el transporte, sobre todo de derivados del petróleo, es una de los principales causas de agotamiento de los recursos naturales; y que el ferrocarril eléctrico y el transporte por tubería también contribuyen (aunque en menor medida) al agotamiento del carbón, del gas y del petróleo por la parte de la generación de electricidad que emplea estos combustibles.

Figura 11. Origen de la electricidad producida en España en 2006



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de WWF Adena

La reducción de este efecto negativo puede venir por la disminución de la cantidad de energía consumida, ya sea por reducción de la movilidad, ya sea por mejora de la eficiencia energética o por ambas causas. Además de ello, sólo el aumento de peso relativo del transporte realizado con energía eléctrica y el empleo de otros tipos de combustibles puede reducir este efecto negativo.

6.2. Emisiones de contaminantes

Se pueden distinguir dos tipos de emisiones de contaminantes:

- Las que producen el “efecto invernadero” (GEI) y contribuyen al cambio climático, que son de efecto global, siendo indiferente el lugar donde se generen.
- Las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire (EICA) y son de efecto local.

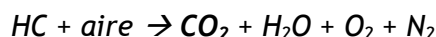
6.2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) producen el calentamiento global del planeta, con las consecuencias negativas que se derivan de este calentamiento.

El principal de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera por el hombre es el dióxido de carbono (CO_2) que es consecuencia de la quema de combustibles fósiles utilizados para la producción de energía y en el transporte, principalmente. Además del dióxido de carbono, existen otros gases de efecto invernadero:

- Gases no fluorados: metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)
- Gases fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruros de azufre (SF_6).

Los gases de efecto invernadero (GEI) se producen en una combustión ideal:

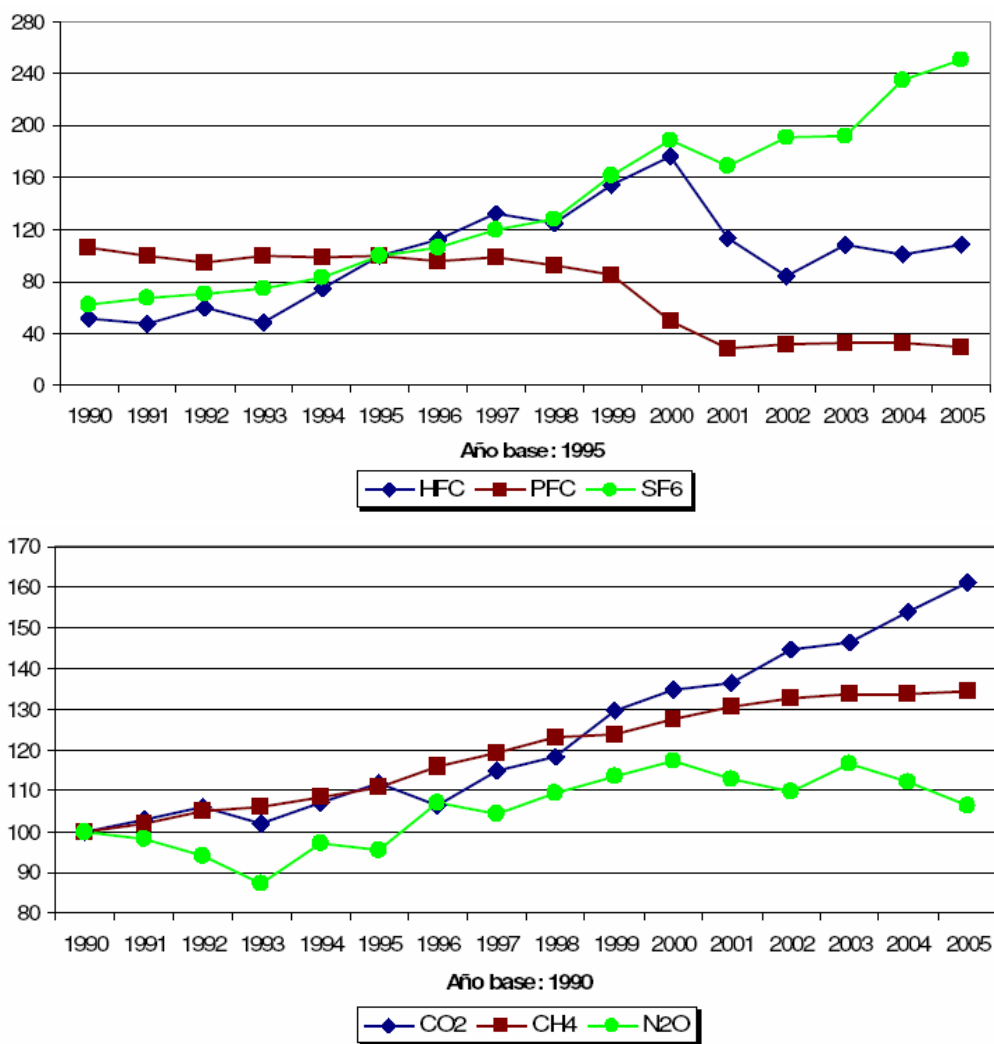


estos gases envuelven el planeta reteniendo la energía térmica en la capa inferior de la atmósfera terrestre. Si los niveles ascienden demasiado, se produce un aumento global de la temperatura del aire que podría perturbar las pautas naturales del clima.

Según Adena (2006) “el CO_2 se ha incrementado un 34% desde la revolución industrial (finales s. XIX)” y “las concentraciones de CO_2 en la atmósfera en la actualidad superan las que ha habido en los últimos 20 millones de años”

La siguiente gráfica muestra la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España en los últimos 15 años.

Figura 12a. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2007)

Las emisiones de CO_2 procedentes del transporte continúan aumentando debido al incremento de la demanda de transporte y pese a la mejora de las tecnológicas.

CO_2 equivalente

Generalmente cuando se estiman las emisiones de gases de se considera además del propio CO_2 , el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), prescindiendo de los gases fluorados. Se presentan en toneladas de CO_2 *equivalente*, para cuyo cálculo se consideran los potenciales de calentamiento atmosférico siguientes:

Tabla 3. Potencial de calentamiento atmosférico de los GEI

Compuesto	Potencial de calentamiento atmosférico
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

Fuente: INSIA (2007)

Así las emisiones de GEI de un determinado combustible se calculan como:

$$Emisiones_GEI = \sum (FactorEmisión_{gas} \times PotCalentamiento_{gas})$$

Siendo $FactorEmisión_{gas}$ las emisiones de cada uno de los gases que se emiten en la combustión y $PotCalentamiento_{gas}$ el potencial de calentamiento atmosférico de dichos gases.

En el caso del transporte prácticamente no se emiten gases de efecto invernadero diferentes del dióxido de carbono. Por ello, a efectos prácticos, puede establecerse una paridad entre el CO₂ y el CO₂ equivalente. Sin embargo, recientemente, se ha puesto de relieve la contribución específica de la aviación comercial en la acumulación de contaminantes derivados de su actividad y su depósito más cerca de las capas altas de la atmósfera. Se estima que a diez kilómetros de altura las emisiones de CO₂ equivalente de la aviación son tres veces más nocivas. Esta altitud se alcanza en la fase de crucero de vuelos cuyo recorrido se encuentra entre 400 y 500 kilómetros, IFEU (2008). En todo caso, gracias a las mejoras constantes que se están produciendo en la eficacia del combustible, las emisiones de dióxido de carbono de la aviación crecen a un ritmo mucho más lento que el tráfico aéreo.

6.2.2 Emisiones con impacto en la calidad del aire

Las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire (EICA) corresponden a los gases que se derivan de una combustión real:



Las sustancias nocivas que se producen son:

- Monóxido de carbono (CO)
- Compuestos hidrocarburos sin quemar (HC)
- Partículas (PM) u hollín
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Dióxido de azufre (SO₂)

La emisión de estos gases produce efecto local, por lo que tienen especial importancia y efectos negativos en el transporte urbano, ya que en este caso se emiten en entornos muy poblados y con una fuerte incidencia sobre la salud de muchas personas. Por ejemplo, las emisiones de gases tóxicos por un autobús urbano en el centro de Madrid producen más daño que la emisión de los mismos gases en una central termoeléctrica que quema fuelóleo en una zona apenas poblada y que genera

la electricidad que se emplea en el Metro de Madrid. Es por esta razón que en muchos casos en el transporte urbano se pasa a emplear autobuses propulsados por gas natural (con menos emisiones) aún cuando el rendimiento térmico sea menos favorable que el de los motores diésel.

También, en el caso del transporte marítimo se controlan las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire en las zonas próximas a la costa, no así en alta mar, aunque es objeto de preocupación por el alto contenido en azufre de algunos de los combustibles que se emplean en el transporte marítimo.

6.2.3 Cuantificación y variabilidad de las emisiones según vectores energéticos

En el caso de los combustibles fósiles, los factores de emisiones de CO₂ y SO₂ son constantes. Por tanto, la cantidad emitida es directamente proporcional a la cantidad de combustible consumido. La siguiente tabla muestra los factores de emisión en kilogramo y litros por kilogramo o gramo de combustible.

Tabla 4. Factores de emisión (kg/kg y kg/l)

	CO ₂	SO ₂	CO ₂	SO ₂
	(kg/kg)	(g/kg)	(kg/l)	(g/l)
Gasolina	3,18	0,3	2,1624	0,24
Gasóleo	3,14	0,7	2,62504	0,59
Queroseno	3,15	0,97	2,3625	0,73

Densidades consideradas: gasolina 0,68 g/cm³, gasóleo 0,836 g/cm³, queroseno 0,75 g/cm³.

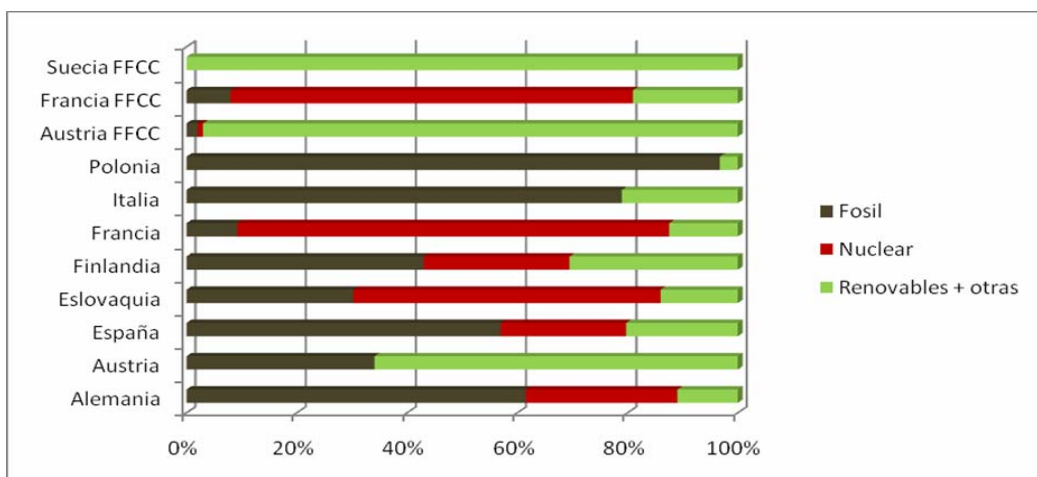
Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de NO_x y de partículas no tienen unos factores de emisión fijos, ya que dependen del combustible y otros aspectos como la cilindrada del vehículo y la normativa aplicada en el diseño del motor.

Los factores de emisiones en la generación de energía eléctrica varían de un año a otro y según los países, ya que son dependientes del *mix* de generación empleado en cada año por el sistema eléctrico de que se trate. Incluso el *mix* de generación varía según sea de día o de noche y verano o invierno, pues hay tecnologías de generación eléctrica que se acomodan mejor a las variaciones de la demanda.

El método generalmente aceptado para estimar los factores de emisión asociados a la producción de electricidad es usar el *mix* de generación medio para cada año y país. Así en la siguiente figura se puede ver, para varios países en 2004, cómo se combinaron los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables. En algunos de estos países la generación de electricidad destinada al ferrocarril es independiente de la red eléctrica nacional, como es el caso de Suecia, Francia o Austria, cuyo *mix* de generación también se muestra en la figura. Como se puede observar, las diferencias son notables; por ejemplo, Polonia tiene un 97% de utilización de combustibles de origen fósil, mientras los Ferrocarriles Austriacos emplean un 97% de energías renovables.

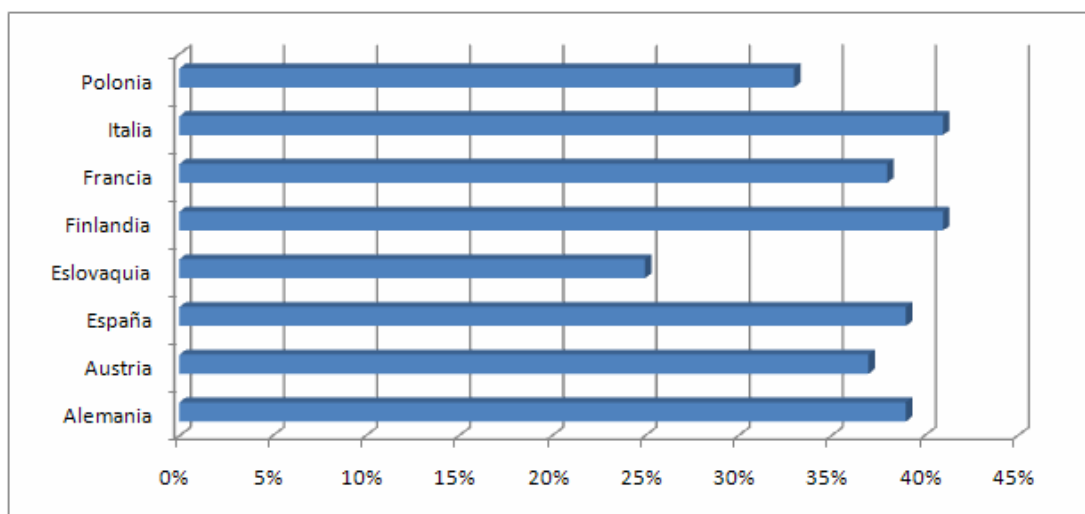
Figura 13. Mix de generación de electricidad de diferentes países europeos



Fuente: Elaboración propia a partir de European Commission (2007) y Knör y Reuter (2005)

La eficiencia en la producción de electricidad también es variable. En el caso de centrales térmicas se suele situar entre el 30% y el 40% dependiendo de los países, como se puede ver en la siguiente figura. Para otros tipos de generación de electricidad (nuclear e hidráulica) no se puede calcular la eficiencia porque las energías de entrada no tienen contenido energético químico; pero en la práctica, en las estadísticas internacionales se asume como eficiencia de las centrales nucleares el 33% y de las centrales hidráulicas el 100% (Knör y Reuter, 2005)

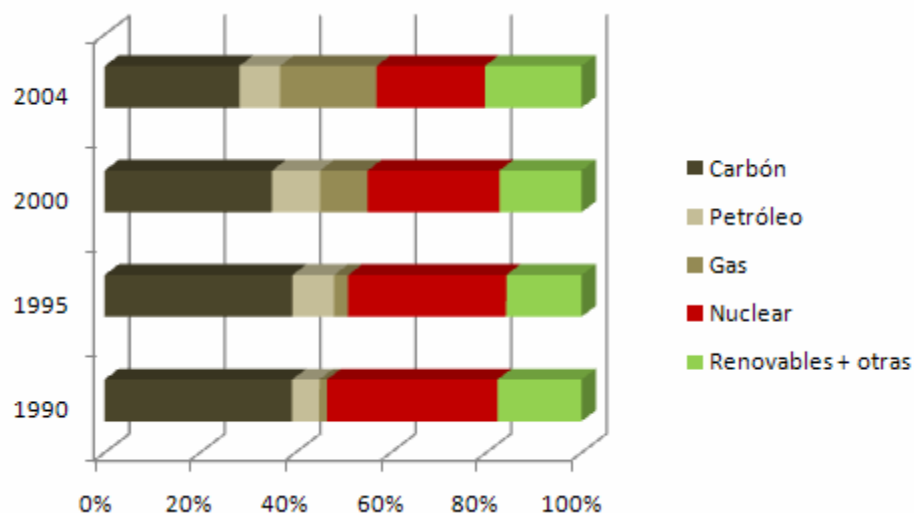
Figura 14. Eficiencia de las centrales térmicas en diferentes países europeos



Fuente: Elaboración propia a partir de European Commission (2007)

Para apreciar las diferencias según los años se muestra a continuación en mix de generación de España en cuatro años distintos.

Figura 15. Mix de generación de España en diferentes años



Fuente: Elaboración propia a partir de European Commission (2007)

Según WWF Adena, las emisiones de CO₂ en España en la generación de electricidad, en el año 2006 fueron de 337 g de CO₂/kWh. Las emisiones medias de CO₂ en los países Nórdicos correspondientes al periodo 2000-2004 fueron de 96g/kWh, según Lukaszewicz (2006).

Tabla 13. Emisiones de CO₂ en la generación de electricidad por países

Pais	CO ₂
	kg/kWh
Austria	0,067
Bélgica	0,253
Bulgaria	0,484
Suiza	0,005
Rep.Checa	0,565
Alemania	0,592
Dinamarca	0,346
España	0,48
Finlandia	0,384
Francia	0,069
Grecia	1,042
Croacia	0,445
Hungría	0,499
Irlanda	0,793
Italia	0,64
Luxemburgo	0,755
Montenegro	0,834
Países Bajos	0,407
Noruega	0,006
Polonia	0,986
Portugal	0,635
Rumanica	0,781
Rusia	0,936
Suecia	0,015
Eslovenia	0,716
Eslovaquia	0,186
Reino Unido	0,569

Fuente: Ecopassenger

Puede observarse una gran dispersión de los valores, ya que oscilan entre las 0,015 Kg CO₂/kWh de Suecia o las 0,006 de Noruega; y las 1,042 kg CO₂/kWh de Grecia. España estén en la banda media

Evolución del control de emisiones en Europa

Las normativas Euro regulan la concentración de contaminantes en los gases de escape producidos en la combustión. En la tabla se pueden ver las diferentes directivas publicadas así como la fecha de aplicación.

Tabla 5. Evolución de control de emisiones en Europa

Norma	Directiva europea	Fechas de aplicación
Euro 1 (EC93)	91/441/EEC turismos; 93/59/EEC turismos y LT	
Euro 2 (EC96)	94/12/EC; 96/69/EC	
Euro 3/4	98/69/EC; 2002/80/EC	2000 / 2005
Euro 5/6	Propuesta COM 683 12/2005; Propuesta EP 056 12/2006	2009 / 2014

En concreto la normativa 4, vigente en la actualidad, indica con respecto a las emisiones de contaminantes en vehículos de gasolina:

- CO: reducción del 57% respecto a la normativa Euro 3 (1000 mg/km)
- HC: reducción del 50% respecto a la normativa Euro 3 (100 mg/km)
- NOx: reducción del 47% respecto a la normativa Euro 3 (80 mg/km)
- Para los vehículos diésel:
- NOx: reducción del 50% respecto a la normativa Euro 3 (250 mg/km)
- Partículas: reducción del 50% respecto a la normativa Euro 3 (25 mg/km)

7. ESTANDARIZACIÓN DE LOS CONSUMOS Y EMISIONES

Para realizar comparación de consumos y emisiones entre vehículos o entre modos de transporte es preciso disponer de ciertos datos de los vehículos que se comparan para hacer la comparación homogénea.

Debe tenerse en cuenta que las medidas orientadas a redistribuir el reparto modal constituyen una de las acciones posibles para reducir el consumo de energía en el transporte y sus emisiones; y en suma, para moderar su impacto ambiental y aumentar su sostenibilidad. El trasvase de tráfico entre modos de transporte (o incluso entre diversos tipos de vehículos mismo modo) es una de las formas de lograr la mejora de la eficiencia energética del sistema de transporte. Este trasvase debería tener como objetivo final el empleo, en cada caso, del modo de transporte más eficiente.

Las decisiones sobre diseños de la infraestructura y los vehículos, y sobre la programación y ejecución del servicio inciden sobre la eficiencia energética del modo de transporte particular y (a través del *mix* de modos de transporte) en el sistema en su conjunto. En efecto, cada modo y vehículo de transporte, puede operarse de diversas maneras y el servicio se puede planificar y efectuar de formas diferentes.

La optimización de la eficiencia del sistema para la toma de decisiones en ambos campos requiere el conocimiento de *funciones de consumo* que expresen éste en función de las variables relevantes, de forma que se puedan analizar las consecuencias del trasvase de tráfico y de la aplicación de las diversas alternativas en la planificación y ejecución de la oferta.

Pero las *funciones de consumo*, para alcanzar su máxima utilidad y permitir la comparación entre vehículos de un mismo modo o entre diferentes modos de transporte, no deben ofrecer solo *consumos absolutos*, ni siquiera por vehículo-kilómetro (cantidad de energía por cada kilómetro recorrido por el vehículo). Las *funciones de consumo* deben ofrecer *consumos específicos* (es decir, consumo por cada unidad de oferta o de demanda) y por kilómetro de *desplazamiento*. Por ello, es del máximo interés determinar el divisor adecuado de la *función de consumo*.

7.1. Unidades de referencia del consumo específico

Para elegir la unidad de referencia del consumo específico en el transporte de viajeros (que podría ser, por ejemplo: “viajero” “viajero.km”, “plaza·kilómetro”, etc.), podemos optar entre dos posibles alternativas:

- Emplear unidades de demanda y tráfico (por ejemplo, “Viajero” o “Viajero·km”). Estas unidades son las que suelen usarse en los estudios disponibles.
- Emplear unidades de oferta (como “plaza” o “plaza·km”) que se relacionan con los costes del transporte; es decir, con los consumos de recursos, por lo que están más ligadas al consumo por cada unidad oferta.

En nuestra opinión, cada caso de estudio es diferente y requiere (según cual sea su objetivo específico) el empleo de un divisor diferente, que puede ser de oferta de tráfico.

Homogeneización por oferta

Las unidades a emplear para homogeneizar por oferta deberán ser la “plaza” o “plaza·km” (o “tonelada·km” de capacidad de carga ofertada), puesto que el consumo de un vehículo en un kilómetro es prácticamente independiente del número de viajeros que empleen el vehículo en el recorrido considerado: no variará sensiblemente si el vehículo considerado va al 100% de ocupación o si va vacío. Y dentro de las unidades de oferta, la unidad “plaza·km” (o “tonelada de capacidad·km”) parece preferible a la “plaza” (o a la “tonelada”), pues es una mejor medida del transporte realizado al tener en cuenta la distancia a la que se ha realizado el transporte. Una consideración especial a este supuesto se efectuará para el caso de la aviación comercial.

Así, el consumo debe abstraerse de los índices de ocupación de cada vehículo o de cada modo de transporte. En general y para un mismo servicio (excepto en el caso de la aviación comercial), un vehículo vacío consume prácticamente lo mismo que uno lleno. Por ello, debe medirse en “kWh/plaza.km” el lugar de “kWh/viajero.km o t.km”.

En el caso del transporte de mercancías, la unidad de oferta será normalmente la tonelada de capacidad ofertada por kilómetro, pero en algunos productos de baja densidad, puede ser el metro cúbico·km u otra unidad equivalente.

Homogeneización por tráfico

Conociendo el consumo por unidad de oferta, con el índice de aprovechamiento, puede calcularse de forma inmediata el consumo por unidad de demanda, si fuera necesario.

Homogeneización de la oferta

Aún empleando la unidad “plaza” o plaza.km” hay un problema de homogeneidad, ya que el mismo vehículo (y por ello con el mismo consumo) puede tener diferente número de plazas (piénsese en los aviones, con muy diversas configuraciones del mismo modelo; o en un autobús que puede estar equipado con 55 plazas o con 35 si es de la clase *Supra*). Además, si la comparación de los consumos se realiza por plaza.km sin corrección alguna, se está penalizando a los modos de transporte o empresas de transporte que en el mismo espacio ofrecen menos plazas (tienen menos densidad, y por ello más comodidad). Por ello, debe medirse en unidades que permitan la comparación homogénea, tales como energía por “plaza estándar.km” o por “metro cuadrado disponible.km”.

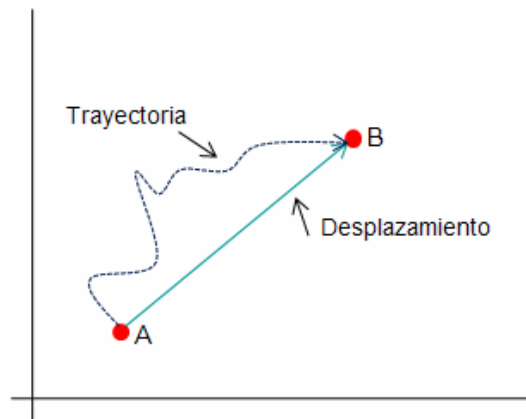
Por ello es preciso definir una “plaza estándar” o “plaza equivalente”, para no discriminar a los modos u operadores por la diferente densidad de plazas.

7.2. La cuestión de las diferencias entre trayectoria y desplazamiento

Es preciso tener en cuenta, además, la incidencia del cociente entre “trayectoria” y “desplazamiento” en cada caso o en cada uno de los modos de transporte, tanto a nivel medio agregado, en el caso concreto. Con ello se trata de recoger el hecho de que un mismo transporte puede realizarse por modos de transporte alternativos con

recorridos muy diferentes. Por ello, en el análisis trasvase de tráficos entre modos de transporte, es preciso recoger el efecto de las diferencias de trayectoria para un mismo desplazamiento, parámetro que tiene también un efecto muy importante en las decisiones en materia de diseño de infraestructuras.

Figura 16. Diferencia entre trayectoria y desplazamiento



Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre la *trayectoria* y el *desplazamiento* se puede producir por dos causas:

- Por una parte, por la diferencia de longitud de la trayectoria de los caminos físicos empleados. Así, en España, por término medio los aviones recorren de un 5 a un 10% más que la distancia en línea recta; los coches en recorridos interurbanos del orden de un 35 % más; los trenes convencionales un 49 % más mientras que los trenes de alta velocidad un 25 % más. Estas diferencias son muy relevantes (aunque frecuentemente ignoradas) por cuanto un trasvase de tráfico, por ejemplo del avión al tren de alta velocidad, no produce el resultado que se podría esperar derivado de aplicar los diferentes resultados de consumo específico de energía por plaza.km entre el avión y el tren, sino que hay que tener en cuenta el incremento de trayectoria al que hay que asociar el indicador de consumo (de poco vale, por ejemplo, consumir un 10% menos por kilómetro si hay que realizar un 20% más de kilómetros).
- También en el diseño de la operación de los servicios se puede actuar sobre este parámetro (por ejemplo, en la aviación o transporte marítimo con los sistemas de operación “*hub and spoke*”, o en la gestión de flotas de camiones o de autobuses, diseñando los recorridos óptimos) por lo que los efectos de cada una de las decisiones operativas podrán medirse a través del este parámetro.

Por todo lo expuesto, es conveniente multiplicar el consumo específico derivado de la función de consumo por el coeficiente que liga el *desplazamiento* (distancia en línea recta) con la longitud de la *trayectoria* (distancia real recorrida). Este coeficiente normalmente puede tomarse como un valor constante para cada modo de transporte, tipo de servicio y país, aunque puede adaptarse al caso concreto.

En el caso de la aviación, se debe distinguir entre las rutas continentales, sujetas a una estructura fija de encaminamientos, y las rutas oceánicas con encaminamientos aleatorios. En general se puede dar por buena la suposición de que una ruta aérea continental será entre un 5 y un 10% superior en distancia a la ruta más corta (ortodrómica) entre dos puntos. En rutas de larga distancia y muy larga distancia y

con tramos oceánicos la referencia debería ser la ruta más eficiente (menor tiempo o menor consumo) y no la distancia más corta en km. Por ejemplo, un vuelo Madrid-México puede durar 12 horas recorriendo 9.000 km (hacia el Oeste) y 10 horas recorriendo 10.000 km (hacia el este).

Deben considerarse igualmente los consumos provocados por los recorridos en vacío de los vehículos, que en algunos casos son operativas y en otros son estructurados, por ejemplo en transporte de mercancías.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

García Álvarez, A. (2006): Consumos de energía y eficiencia energética en el transporte. El caso del ferrocarril, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

García Álvarez, A. (2005): *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

IDAE (2007): Guía práctica de la energía. Consumo eficiente y responsable, 2ª edición. IDAE, Madrid

Knör, W.; Reuter, C. (2005): EcoTransIT: Ecological Transport Information Tool. Environmental Methodology and Data. Heidelberg, 2005.

Zeevenhooven, N. (1989): *Subtema 1: El medio ambiente y la energía* Requisitos comparativos de energía de los medios de transporte, en Los ferrocarriles, el medio ambiente y la calidad del transporte, ITF, Holanda

ESTUDIOS Y TRABAJOS EN REVISTAS

Aparicio Izquierdo, F. ; López Martínez J. M. (2005): **Balance del consumo energético e impacto ambiental de los combustibles**. *Genera, Foro internacional de energía y ciudad sostenible*

García Álvarez, A.; Martín Cañizares, M.P. (2007): *Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros*. III Congreso de Innovación Ferroviaria. Tenerife, mayo de 2007

Gutierrez Serna, J. (2007): *Tendencias futuras en automóviles y motores*. Combustibles de automoción: innovación tecnológica y medioambiental. Madrid, abril de 2007

Luna, M. (2007): *Visión de los fabricantes de vehículos en España*. Combustibles de automoción: innovación tecnológica y medioambiental. Madrid, abril de 2007

Linares Hurtado, J.I.; Moratilla Soria, B.Y. (2007): *El hidrógeno como vector energético*. Anales de mecánica y electricidad, vol 83-84

Pilo de la Fuente, E. (2006): *Diseño del sistema de alimentación eléctrica*. Jornadas de Eficiencia energética en el ferrocarril. Madrid, FFE marzo de 2006

Lukaszewics, P. (2006): Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains, Stockholm

Pérez Arriaga, J.I. et al. (2007): La gestión de la demanda de energía en los sectores de la edificación y del transporte, Fundación alternativas, Madrid

DOCUMENTOS E INFORMES

Comisión Europea (2006): *Por una Europa en movimiento. Movilidad sostenible para nuestro continente*, Oficina de publicaciones oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo

Eurelectric (2007): *El papel de la electricidad. Una nueva senda hacia fuentes de energía garantizadas y competitivas en un contexto de limitación de las emisiones de CO₂*. Eurelectric, Bruselas

IDAE (2005): Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012. E4 resumen. Plan de acción 2005-2007, Madrid

IHOBE. Sociedad Pública Gestión Ambiental (2000): 13. Tablas de entradas y salidas en materia, agua y energía.

Ministerio de Medio Ambiente (2007): Inventario de gases de efecto invernadero de España. Edición 2007 (serie 1990-2005). Sumario de resultados, Madrid

Ministerio de Medio Ambiente (2006): **Perfil ambiental de España 2005. Informe basado en indicadores**, División de información, documentación y publicaciones, Madrid

Servicios de Información de la Secretaría de la UNFCCC (2004): **Cuidar el clima. Guía de la convención marco sobre el cambio climático y el protocolo de Kyoto**, Secretaría de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, Bonn

IFEU (2008): EcoPassenger. Environmental Methodology and Data. Final report. Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC)

WWF Adena (2006): Observatorio de la electricidad, resumen anual

ANUARIOS, MEMORIAS Y ESTADÍSTICAS

European Commission: EU energy and transport in figures. Statistical pocketbook 2006. Luxemburgo, 2007

Ministerio de fomento: Los transportes y los servicios postales, Informe anual 2004. Madrid, 2005

Ministerio de industria, turismo y comercio: **La energía en España 2005**. Madrid, 2006

Renfe: Memoria energética 2002. Madrid, 2003

DOCUMENTOS DEL GRUPO DE TRABAJO DE ENERTRANS

Cegarra Plané, M. (2007): Nota técnica 1: “Introducción al transporte por tubería”

INSIA (2007): Monografía Flujos del petróleo y del gas natural

Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo (2008): Nota técnica 9: “Aspectos generales del transporte marítimo”:

ANEXOS

7.3. Anexo A. Unidades empleadas

En este anexo se da una visión general de las unidades y equivalencias que se utilizan al tratar temas relacionados con la energía.

Unidades de trabajo o energía

A continuación se muestran las equivalencias entre las principales unidades de trabajo o energía en sus formas eléctrica, mecánica y térmica.

Tabla 6. Unidades de energía y equivalencias

	Ergio (Erg)	Julio (J)	Kilocaloría (kcal)	Caballo de Vapor-hora (CV-h)	Kilovatio-hora (kWh)
Ergio	1	10^{-7}	$2,389 \cdot 10^{-11}$	$0,377 \cdot 10^{-13}$	$2,778 \cdot 10^{-14}$
Julio	107	1	$2,389 \cdot 10^{-4}$	$0,377 \cdot 10^{-6}$	$2,778 \cdot 10^{-7}$
Kcal	$4,186 \cdot 10^{10}$	$4,186 \cdot 10^3$	1	$1,581 \cdot 10^{-3}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$
CV-h	$2,650 \cdot 10^{13}$	$2,650 \cdot 10^6$	6,326 102	1	0,736
kWh	$3,600. \cdot 10^{13}$	$3,600 \cdot 10^6$	860	1,359	1

Fuente: Elaboración propia

Macrounidades energéticas

Además de las unidades de energía expuestas en el apartado anterior, existen otras, denominadas “macrounidades” que suelen emplearse en los análisis macroeconómicos: la “tonelada equivalente de carbón” (tec), la “tonelada equivalente de petróleo” (tep), la teracaloría (Tcal), la termia (Th) y el barril de petróleo. A continuación se muestran las equivalencias entre dichas “macrounidades” energéticas.

Tabla 7. Macrounidades energéticas

	tec	tep	Tcal	Th	B petróleo	km ³ GN	t GLP	kWh
tec	1	0,700	0,007	$7 \cdot 10^3$	5,300	0,778	0,569	$8,143 \cdot 10^{-6}$
tep	1,428	1	0,010	10^4	$0,758 \cdot 10^1$	1,111	0,813	$11,62 \cdot 10^3$
Tcal	$1,428 \cdot 10^2$	100	1	10^6	$0,758 \cdot 10^3$	$1,111 \cdot 10^2$	$0,813 \cdot 10^2$	$1,163 \cdot 10^6$
Th	$1,428 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	1	$0,758 \cdot 10^{-3}$	$1,111 \cdot 10^{-4}$	$0,813 \cdot 10^{-4}$	1,16
B petróleo	$1,884 \cdot 10^{-1}$	$1,319 \cdot 10^{-1}$	$1,319 \cdot 10^{-3}$	$1,319 \cdot 10^3$	1	0,146	$0,115 \cdot 10^{-3}$	$1,534 \cdot 10^3$
km ³ GN	1,285	0,900	0,009	$0,900 \cdot 10^4$	$6,810 \cdot 10^{-3}$	1	$0,724 \cdot 10^{-3}$	$10,475 \cdot 10^3$
t de GLP	1,757	1,230	$1,230 \cdot 10^{-2}$	$1,230 \cdot 10^{-4}$	$8,68 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^3$	1	$14,30 \cdot 10^3$
kWh	$0,123 \cdot 10^6$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	0,86	$6,518 \cdot 10^{-4}$	$9,546 \cdot 10^{-5}$	$6,991 \cdot 10^{-5}$	1

Fuente: Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Unidades y tablas de conversión y equivalencias

La *tonelada equivalente de petróleo* (tep) es una unidad de medida corrientemente utilizada por los economistas para comparar las fuentes de energía entre ellas. Es la energía producida por la combustión de una tonelada media de petróleo, 10^4 termias.

Las equivalencias para el m³ de gas (en las condiciones normales de presión: 0° C, bajo 1013 hPa, norma ISO; por oposición al m³ estándar) están dadas en energía PCS (poder calorífico superior) el equivalente en energía PCI (poder calorífico inferior) se obtiene multiplicando por 0,9.

La siguiente tabla muestra para la gasolina y el gasóleo las equivalencias entre litros y kg y toneladas equivalentes de petróleo (tep).

Tabla 8. Equivalencias para gasolina y gasóleo

	tep
1 l Gasolina	0,0000955
1 l Gasóleo	0,0000890
1 kg Gasolina	$1,273 \cdot 10^{-4}$
1 kg Gasóleo	$1,053 \cdot 10^{-4}$

Fuente: Elaboración propia

Unidades de potencia

La siguiente tabla muestra la equivalencia entre las unidades de potencia más utilizadas.

Tabla 9. Unidades de potencia

	kW	CV	HP
kW	1	1,36	1,34
CV	0,735	1	0,9862
HP	0,746	1,014	1

Fuente: Elaboración propia

Unidades de longitud y velocidad

La siguiente tabla muestra las equivalencias entre las unidades de longitud más utilizadas:

Tabla 10. Unidades de longitud

	Km	Milla terrestre	Milla náutica
km	1	0,621	0,54
Milla terrestre	1,61031	1	0,86957
Milla náutica	1,85185	1,15	1

Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla muestra las equivalencias entre las unidades de velocidad más comunes:

Tabla 11. Unidades de velocidad

	m/s	Km/h	mph	Nudo ²
m/s	1	3,6	2,237	1,944
Km/h	0,278	1	0,6215	0,539
Mph	0,447	1,609	1	0,8689
nudo	0,514	1,852	1,151	1

Fuente: Elaboración propia

² 1 nudo = 1 milla náutica/h

7.4. Anexo B. Poder calorífico de algunos productos

La siguiente tabla muestra el poder calorífico o energético de los combustibles más generalizados.

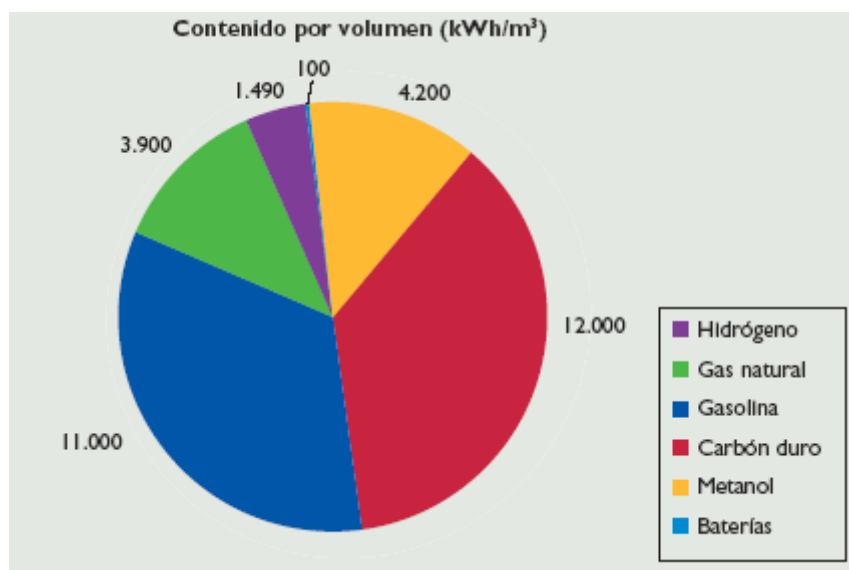
Tabla 12. Poderes caloríficos de algunos productos

	Unidad	kJ (NCV)
Carbón (hard coal)	1 kg	17.200 - 30.700
Gasolina (motor spirit)	1 kg	44.000
Queroseno (kerosenes)	1 kg	43.000
Nafta (naphtha)	1 kg	44.000
Gas diesel oil	1 kg	42.300
Residual fuel oil	1 kg	40.000
Crudo (crude oil)	1 kg	41.600 - 42.800
Energía eléctrica (electrical energy)	1 kWh	3.600

Fuente: European Commission(2007)

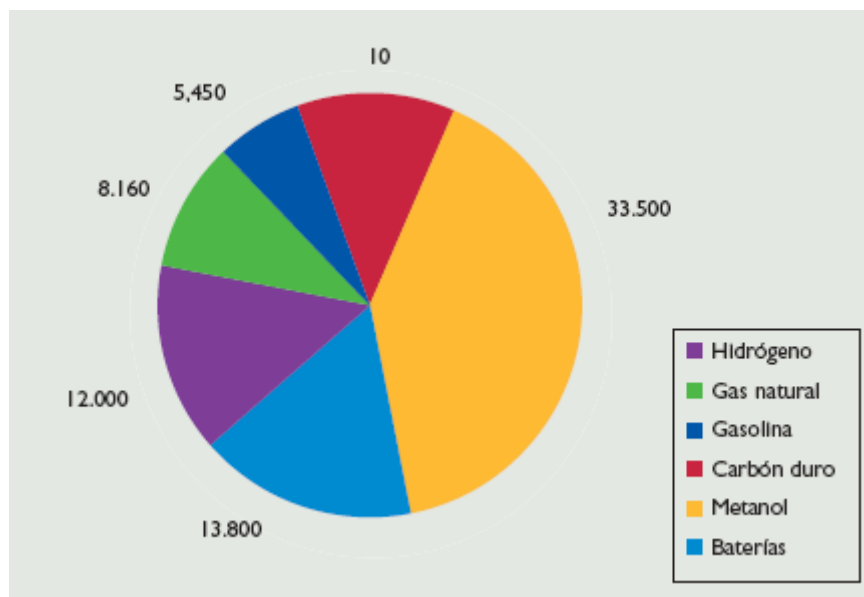
Los siguientes gráficos muestran la densidad energética por unidad de volumen y por unidad de peso de algunos vectores energéticos.

Figura 17. Densidad energética por unidad de volumen



Fuente: Linares Hurtado, J.I.; Moratilla Soria, B.Y. (2007):

Figura 18. Densidad energética por unidad de peso



Fuente: Linares Hurtado, J.I.; Moratilla Soria, B.Y. (2007):

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Cuadro resumen de los modos de transporte	16
Figura 1. Usos de la energía en el transporte	18
Figura 2. Usos de la energía y vectores energéticos empleados en el ferrocarril como ejemplo de un modo de transporte integrado.....	20
Figura 3. Flujos energéticos para los vehículos	21
Figura 4. Flujos energéticos para la explotación de los vehículos	23
Figura 5. Porcentaje aproximado de pérdidas de la energía en origen desagregadas por fases.....	25
Figura 6. Balance energético de un vehículo ferroviario de tracción eléctrica en un recorrido.....	27
Tabla 2. Consumo energético en las fases del ciclo de transporte	27
Figura 7. Eficiencia energética del ferrocarril electrificado.....	27
Figura 8. Pérdidas de energía en los procesos de transformación y transporte de derivados del petróleo	27
Figura 9. Perspectiva de evolución de los problemas relacionados con los efectos negativos del uso de la energía en el transporte y de la demanda de energía ..	27
Figura 10. Consumo global y en el transporte de energía en España, por modo 2004	27
Figura 11. Origen de la electricidad producida en España en 2006.....	27
Figura 12a. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España ..	27
Tabla 3. Potencial de calentamiento atmosférico de los GEI	27
Tabla 4. Factores de emisión (kg/kg y kg/l)	27
Figura 13. Mix de generación de electricidad de diferentes países europeos.....	27
Figura 14. Eficiencia de las centrales térmicas en diferentes países europeos.....	27
Figura 15. Mix de generación de España en diferentes años	27
Tabla 5. Evolución de control de emisiones en Europa	27
Figura 16. Diferencia entre trayectoria y desplazamiento	27
Tabla 6. Unidades de energía y equivalencias	27
Tabla 7. Macrounidades energéticas.....	27
Tabla 8. Equivalencias para gasolina y gasóleo	27
Tabla 9. Unidades de potencia	27
Tabla 10. Unidades de longitud.....	27
Tabla 11. Unidades de velocidad	27
Tabla 12. Poderes caloríficos de algunos productos.....	27
Figura 17. Densidad energética por unidad de volumen.....	27
Figura 18. Densidad energética por unidad de peso.....	27

Documentos del Proyecto EnerTrans

Monografías EnerTrans

Monografía 1: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”: José Ignacio Pérez Arriaga, Eduardo Pilo de la Fuente, Ignacio de L. Hierro Ausín

Monografía 2: “Usos de la energía en el transporte”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 3: “Modelos de consumos y emisiones: Estado del arte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro

Monografía 4: “Análisis de las estadísticas de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el transporte”: Alberto Cillero, Paula Bouzada Outeda

Monografía 5: “Tablas input-output relacionadas con las estadísticas de consumos y emisiones en el transporte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 6: “Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 7: “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 8: “Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo, Álvaro Gómez, Ángel Fernández.

Monografía 9: “Flujos de la energía de la electricidad para el transporte”: Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio

Monografía 10: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras”: Timoteo Martínez Aguado, M^a José Calderón Milán, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 11: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 12: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión”: José María López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 13: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar”: Alberto Cillero Hernández, Gustavo Martinelli, Paula Bouzada Outeda

Monografía 14: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Monografía 15: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Monografía 16: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 17: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Monografía 18: “ENERTRANS: Modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte”: Grupo de investigación del proyecto Enertrans

Notas técnicas EnerTrans

Nota técnica 1: “Introducción al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 2: “Informe sobre el tráfico internacional y el consumo de carburante en el sector aeronáutico”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 3: “Informe sobre el suministro de combustible en los aeropuertos en España”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 4: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte aéreo”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 5: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario”: Alberto García Álvarez, Eduardo Fernández González

Nota técnica 6: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 7: “Informe sobre el tráfico español y el consumo de carburante en el sector marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 8: “Análisis de documentación referida al transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 9: “Aspectos generales del transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 10: “Características de la navegación marítima”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 11: “Consumo de los servicios auxiliares en el automóvil”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 12: “Notas sobre los valores del coeficiente de resistencia a la rodadura”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 13: “Tipos de aeronaves según su compañía constructora”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

