

Análisis de las emisiones de CO₂ en la producción de las fuentes energéticas utilizadas en el transporte por carretera

José María López Martínez

Profesor titular de la UPM, ETSI Industriales. Subdirector INSIA-UPM, España

Nuria Flores Holgado

Investigadora, INSIA-UPM, España

Julio Lumberras

Profesor titular de la UPM, ETSI Industriales, España

Rosalía Villimar

Investigadora de la ETSI Industriales-UPM, España

Cristina Pascual

Profesora titular de la UPM, ETSI Montes, España

RESUMEN

La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos del transporte por carretera suele realizarse considerando, exclusivamente, las del tubo de escape de los vehículos. Sin embargo, para poder comparar adecuadamente las fuentes energéticas disponibles, se ha de ampliar el ámbito de cálculo a las emisiones de todo el ciclo de vida de los vehículos y de las fuentes energéticas empleadas. Es decir, se deben cuantificar tanto las emisiones de la fabricación, mantenimiento y desguace de los medios de transporte como las derivadas de la producción (denominado “del pozo al tanque”) y uso de las fuentes energéticas que consuman (o análisis “del tanque a la rueda”).

Este artículo muestra la comparación de emisiones de GEI que se producen en el camino (del pozo al tanque, WTT) de las principales fuentes de energía empleadas en el transporte rodado. Así, se comparan los productos derivados del petróleo (gasolina, gasóleo y gases licuados del petróleo) con el gas natural y la electricidad. El estudio se centra en la situación de España en el año 2007.

En el caso del gas natural y derivados del petróleo, se incluyen las fases de extracción, transporte, refino o acondicionamiento y distribución hasta la estación de servicio. El cálculo de las emisiones de la generación eléctrica incluye su producción a partir de la matriz energética española de 2007, incluyendo las pérdidas en distribución hasta el punto de consumo.

1. INTRODUCCION

Este artículo se centra en el análisis del consumo energético y las emisiones de efecto invernadero (GEI) generadas durante todo el camino completo del combustible, desde su obtención hasta su entrega en el depósito del vehículo (análisis Well to Tank, WTT). Los caminos de combustible analizados son: petróleo, gas natural y electricidad. Los combustibles seleccionados y utilizados como combustibles puros en los sistemas de propulsión son: gasolina, gasóleo y gas natural comprimido (CNG)

El “contenido en CO₂” es la cantidad de CO₂ emitido por la combustión de 1MJ de combustible quemado. El contenido en CO₂ se obtiene del contenido de carbono y del poder calorífico inferior.

Con relación al balance de CO₂, si durante la producción del combustible final, algunos de los componentes del carbono son absorbidos por la atmósfera, entonces la contribución de CO₂ al balance final será negativa. Por otro lado, todo el CO₂ producido del “carbón fósil” durante un proceso (contribuyendo a un incremento del CO₂ sobre el suelo) será considerado como positivo. Así, la combustión de un combustible renovable produce cero CO₂, ya que la absorción de CO₂ y la emisión de CO₂ están equilibradas. De igual manera, el contenido de CO₂ de algunos biocombustibles, como la madera o el azúcar de la remolacha, es nulo, ya que la misma cantidad de CO₂ emitida durante la combustión es absorbida durante el crecimiento de la planta. Portadores de energía como la electricidad y el hidrógeno no tienen contenido en carbono. Si la electricidad se produce a través de combustibles fósiles, se emite CO₂ en la generación in situ de la electricidad y del hidrógeno. En el caso del carbono contenido en los combustibles renovables, como el etanol, el contenido de CO₂ se resta en la etapa de producción para dar valores negativos de CO₂. Durante la combustión en el vehículo el contenido en carbono, p.e. del etanol se libera a la atmósfera.

Las emisiones totales de CO₂-equivalente (GEI) se calculan con la siguiente expresión:

$$\text{CO}_2 \text{ equivalente} = [\text{CO}_2] + 21 \cdot [\text{CH}_4] + 310 \cdot [\text{N}_2\text{O}]$$

2. ANALISIS DEL POZO AL TANQUE (WTT)

Este análisis describe el proceso de obtener, transportar, producir y distribuir un determinado número de combustibles adecuados para los vehículos de transporte por carretera. Cubre todos los pasos, desde la extracción hasta el proceso de llenado del depósito de combustible del vehículo.

El objetivo principal es establecer el balance energético y de emisiones de gases de efecto invernadero para los diferentes caminos. La metodología utilizada se basa en la descripción del proceso individual, que se va fraccionando en pasos intermedios, lo que permite

modificaciones futuras para añadir más combinaciones (José María López, 2007).

Muchos procesos producen no solamente el producto deseado o principal, sino también otros subproductos. En estos casos se suele aplicar la siguiente metodología:

- Toda la energía y emisiones generadas por el proceso se asignan al producto deseado o principal de dicho proceso.
- El subproducto genera un crédito de energía y de emisiones igual a la energía y emisiones ahorradas por la no producción del material que el subproducto sustituya.

Los datos que a continuación se presentan para el análisis del pozo al tanque se han extraído del documento *Análisis Well-to-Wheels de futuros combustibles de automoción y tecnologías en el contexto europeo* de EUCAR, CONCAWE y JRC (2007), del estudio ENERTRANS (2004-2007), y del estudio de CIEMAT (2006).

2.1 Camino del Petróleo

La principal fuente del petróleo que se consume en España procede del exterior. En el año 2008 España importó el 86% del total del petróleo consumido como energía primaria, siendo el 52.5 % del total procedente de los países de la OPEP, según datos registrados por CORES (2008). En estos países, el crudo se extrae mediante diferentes procedimientos. Este crudo se transporta bien mediante oleoducto, como es el caso de Argelia o Noruega, o bien mediante transporte marítimo. En este último caso es necesario el transporte hasta los puertos en los países de origen. Una vez llega a España, el crudo pasa a las refinerías de las distintas empresas privadas. Debido a las ingentes cantidades que se consumen, es necesario disponer de centros de almacenamiento desde los cuales poder distribuir ordenadamente los productos.

Los datos del estudio aportan que para el proceso de extracción del crudo se invierte 0,025 MJ/MJ como energía de entrada y se emite 3,33 gCO₂eq/MJ. En el caso del transporte del crudo se ha considerado que éste se realiza mayoritariamente por barco, con un consumo energético de 0,0101 MJ/MJ combustible y una emisión de 0,081 gCO₂eq/MJ.

En el proceso de refino, para el balance energético y emisiones, cabe destacar que una parte del crudo entrante se usa directamente como fuente de energía para la propia refinería. Esta parte se considera consumo de energía sumándose a la energía aportada desde el exterior (electricidad y gas natural), y a las materias primas, en su valor energético. Considerando una planta tipo FCC (Fluid Catalytic Cracking) por ser las refinerías complejas más comunes en España. Por último, los productos resultantes del refino, como la gasolina y el gasóleo se transportan hasta las instalaciones de almacenamiento o centros de distribución, desde donde se trasladarán hasta los puntos de consumo. Se ha considerado varios tipos de transportes desde las refinerías a los depósitos: transporte por agua (navegación interior o costera), ferrocarril y gasoducto, con un aporte de cada uno de 1/3. Esta etapa lleva consigo un consumo energético de 0,0203 MJ/MJ y una emisión de 1,05 gCO₂eq/MJ.

El balance energético y de emisiones para el camino de la gasolina es de 0,1354 MJ/MJ como energía de entrada y 10,961 gCO₂eq/MJ. Sin embargo, para el camino del gasóleo, se requiere una energía de 0,1554 MJ/MJ y se emite 13,061 gCO₂eq/MJ.

2.1.1 Gases licuados del petróleo (GLP)

Los gases licuados del petróleo (butano y propano fundamentalmente), por sus propias características, disponen de una logística independiente al resto de productos petrolíferos. En España hay 37 centros de almacenamiento y envasado de GLP. Los que se encuentran cercanos a refinerías reciben los productos de éstas mediante tuberías y el resto, por camión o por barco.

En el estudio de EUCAR (2007) se asume que el GLP es producido como parte de hidrocarburos pesados asociados con gas natural, y que una gran proporción de la energía total requerida se relaciona con la separación, tratamiento y licuefacción cerca de los campos de gas. Así, los requerimientos de energía y emisiones son, respectivamente, para la fase de extracción 0,05 MJ/MJ y 3,5 gCO₂eq/MJ.; para el proceso de licuefacción, 0,01 MJ/MJ y 0,3 gCO₂eq/MJ, para el transporte por barco hasta las refinerías 0,03 MJ/MJ y 2,5 gCO₂eq/MJ, y finalmente, para el transporte a las estaciones de servicio 0,03 MJ/MJ y 1,7 gCO₂eq/MJ. Esto hace un total de energía necesaria de 0,12 MJ/MJ y unas emisiones de GEI de 8,0 gCO₂eq/MJ.

2.2 Camino del Gas Natural

El proceso de producción de GN consta de la extracción del gas natural y de una etapa de procesado. La extracción tiene lugar en el pozo, y desde el pozo el GN se transporta por tuberías hasta la planta de procesado.

2.2.1 Gas natural licuado (GNL)

El GN se licua en un lugar remoto y se transporta, en dicho estado, en buques metaneros hasta un puerto europeo y se distribuye, finalmente, a una estación de servicio. Allí se descarga, almacena y gasifica. En la regasificación, se asume un consumo energético de 0,03 MJ/MJ y unas emisiones de 1,8 gCO₂eq/MJ.

Para realizar la licuefacción se utiliza energía en forma de electricidad y de gas natural, para accionar los turbocompresores de los ciclos de refrigeración. El consumo de electricidad en una planta de licuefacción de gas natural está en torno a 0,010 kWh_{el}/MJ_{GNC} si el gas se suministra a la planta de licuefacción a una presión de unos 0,6 bar [FfE 1997].

Para el caso del GNL, los requerimientos de energía son de 0,22 MJ/MJ_{GNC} mientras que las emisiones de CO₂ equivalente por MJ de combustible puesto en el tanque son de 16,2 gCO₂eq/MJ_{GNC}.

2.2.2 Gas natural comprimido (GNC)

La presión en los gasoductos de transporte es siempre superior a 16 bar. En los gasoductos de transporte primario la presión es superior a 60 bar, entre 72 y 80 bar, mientras que en los gasoductos de transporte secundario las presiones están comprendidas entre 16 y 60 bar. En los gasoductos de distribución el servicio se establece a presiones inferiores a 16 bar, distinguiéndose entre gasoductos de alta presión (más de 4 bar), de media presión (entre 0,05 bar y 4 bar) y de muy baja presión (menos de 0,05 bar).

Los vehículos de gas natural comprimido repostan en las estaciones de gas natural llenando sus depósitos a una presión de unos 250 bar. El suministro a los puntos de entrega se realiza a baja presión desde la red de gasoductos. Hay dos tipos diferenciados de suministro de gas por gasoducto a las estaciones de servicio:

- a) Suministro a la estación de servicio con gas natural a 1 bar. En el punto de suministro de gas natural se comprime el gas natural desde una presión de entrada de 1 bar hasta una presión de 250 bar.
- b) Suministro a la estación de servicio con gas natural a alta presión. En el punto de suministro de gas natural se comprime el gas natural desde una presión de entrada de 40 bar hasta una presión de 250 bar.

En el caso a) el gas natural es suministrado a la estación de servicio a través de la red de distribución, al igual que se realiza el suministro de gas natural a viviendas. Por otra parte, en el caso b) el suministro de gas natural se realiza desde un gasoducto de transporte, de igual manera que se realiza el suministro de gas natural de forma habitual a grandes consumidores industriales o a plantas de generación eléctrica.

Los datos obtenidos para el suministro de gas natural por gasoducto, el cual se realiza desde Argelia y Noruega, determinan un requerimiento energético de 0,137 MJ/MJ y unas emisiones de GEI de 9,4 g/MJ.

2.3 Camino de la electricidad

La demanda creciente de energía eléctrica pone de manifiesto nuestra dependencia de esta energía y la clara tendencia futura de que esta dependencia crezca. Sin duda, la producción de la energía es la clave para combatir el cambio climático y en el caso de la generación de electricidad, su potencial de reducción de emisiones de GEIs, dependerá del mix de cada país.

En los últimos cinco años, España ha sido un exportador neto. Esto da pie a considerar, sin cometer apenas error, que todo el consumo nacional se puede aproximar al mix nacional de generación sin tener que estudiar el mix de los países con los cuales hay transferencias de energía eléctrica. Teniendo en cuenta el porcentaje de la demanda que se ha satisfecho con cada sistema de generación, nos encontramos con unas emisiones y rendimientos unitarios por sistema de generación, que una vez armonizadas dan lugar al mix nacional de generación.

De esta forma, en los procesos en los cuales se defina claramente dónde y mediante qué tecnología se producen, se empleará el rendimiento definido para un sistema de producción eléctrica concreto. En caso de desconocer el origen de la energía que entra en juego en el camino del combustible, se asumirá que se trata del mix nacional.

Después de analizar cada central con su producción y rendimiento, así como el combustible específico, se han valorado los resultados y armonizado en función de la generación. La tabla 1 muestran los rendimientos y emisiones unitarias medias por unidad energética generada:

Central	Energía (MJ/MJ)	Total GEI (gCO ₂ eq/MJ)	
Nuclear	3,238	4,856	
Térmica de Carbón sin gasificación	2,079	274,790	
Hidráulica	0,057	0	
Térmica de Fueloil y gas	1,778	209,319	
Residuos y biomasa	3,610	4	
Rayos solares	0,232	0	
Ciclos combinados de gas natural	Gas Natural con transporte por tubería de 4000 km	1,058	34,885
	Gas Natural con transporte por tubería de 7000 km	1,248	133,912
	Gas Natural a partir de Gas licuado	1,268	37,940
	Gasoil	1,348	144,625

Tabla 1 – Rendimiento energético y emisiones a partir de distintas tecnologías

El rendimiento energético y emisiones unitarias debidas a las pérdidas en el transporte de la energía eléctrica son, respectivamente, 1,162 MJ/MJ y 0,451 gCO₂eq/MJ.

3. CONCLUSIONES

Los requerimientos de energía más bajos con respecto al análisis WTT (figura 1) corresponden al camino de la electricidad vía hidráulica, en torno a 0,057 MJ/MJ, seguida de los combustibles derivados del petróleo, gasolina, gasóleo y GLP, así como del GNL y GNC, comprendidos entre 0,12 y 0,22 MJ/MJ, seguida de la electricidad vía energía solar, de 0,23 MJ/MJ. En el rango de 1 a 1,5 MJ/MJ están la electricidad obtenida a partir de ciclos combinados de GN y gasoil. Algo mayores son la energía requerida para obtener electricidad a partir de centrales térmicas de fuel oil y gas, y de carbón, superiores a 1,5 MJ/MJ. Los caminos de peor rendimiento energético son la electricidad generada a partir de centrales nucleares, con una energía requerida superior a 3 MJ/MJ, y la electricidad obtenida a partir de

biomasa, más de 3,5 MJ/MJ.

Con respecto a las emisiones WTT de efecto invernadero (figura 2), los mejores caminos son la energía eléctrica utilizando como fuente de generación el agua y los rayos solares, con un valor nulo de emisiones de GEI. Le sigue la electricidad procedente de la biomasa y centrales nucleares, con valores en torno a 4 y 4,86 gCO₂eq/MJ, respectivamente. El GNC de los pozos europeos es comparable con la gasolina, con unas emisiones netas en torno a 10 gCO₂eq/MJ. Con valores cercanos pero algo más superiores se encuentran los caminos del gasóleo, GLP y GNL. Significativamente más alto está la electricidad obtenida a partir de ciclos combinados utilizando GN por tubería de 7000km, cuyas emisiones son similares a la electricidad obtenida de ciclos combinados utilizando gasoil, ambos con unas emisiones de GEI entre 133 y 144 g/MJ. La electricidad generada mediante centrales térmicas de fuel oil y gas tiene las emisiones por encima de los 200 gCO₂eq/MJ, siendo la electricidad obtenida por centrales térmicas de carbón el camino que presenta mayores emisiones de GEI, próxima a los 250 gCO₂eq/MJ.

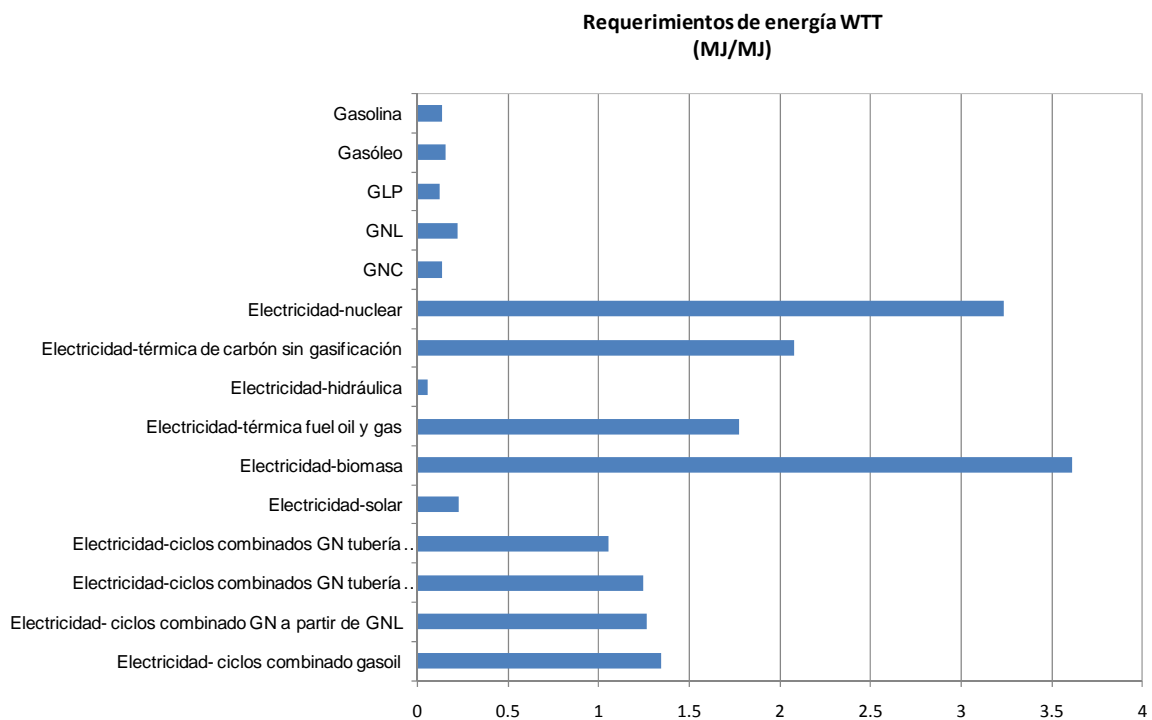


Figura 1 – WTT. Energía utilizada en los caminos seleccionados

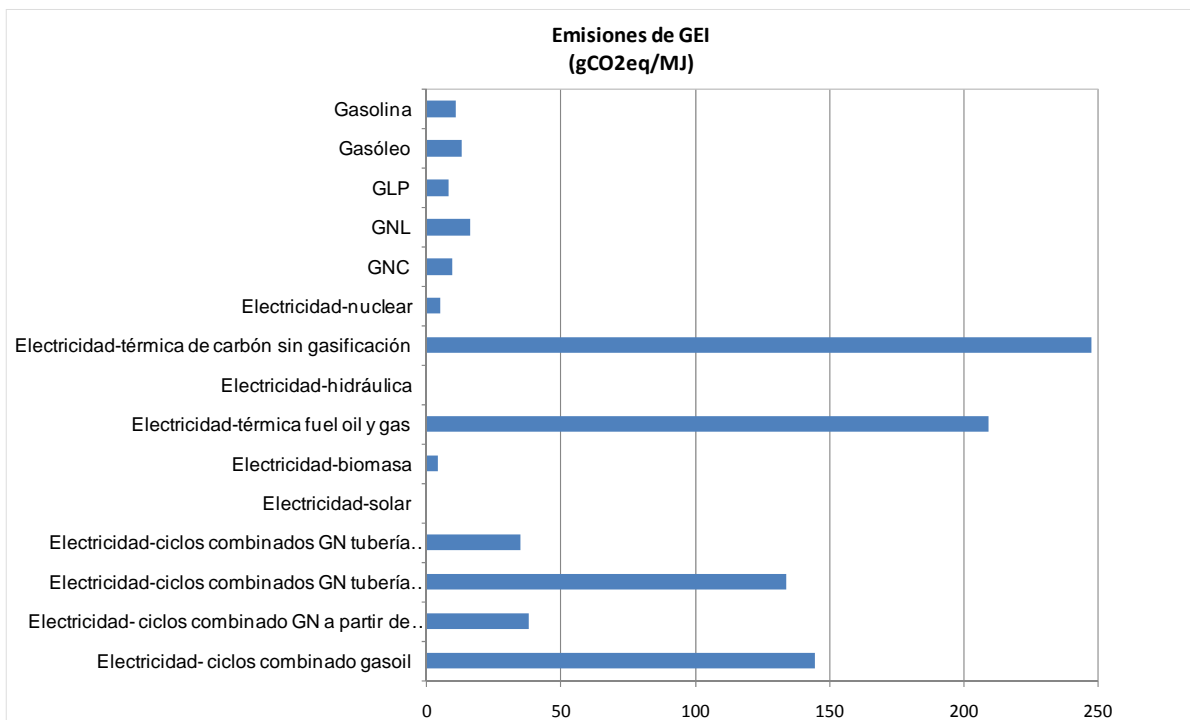


Figura 2 – WTT. Emisiones de GEI en los caminos seleccionados

4. REFERENCIAS

CIEMAT (2006). *Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid (2006).

CORES (2008). *Boletín Estadístico de Hidrocarburos. Resumen año 2007*. Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos.

EUCAR, JRC y CONCAWE (2007). *Well-to wheel analysis of future automotive fuels and powertrain in the european context*. European Council for Automotive R&D.

ENERTRANS (2004-2007): *Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de consumos energéticos y de emisiones del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión de infraestructura y de política de transporte*. ENERTRANS. Fundación de los Ferrocarriles, INSIA-UPM, Universidad Castilla La Mancha, ALSA, Universidad PONTIFICIA de Madrid. Alberto García Álvarez y José María López.

FfE (1997): Mauch, W. Forschungstelle für Energiewirtschaft (FfE), Fröchtenicht, R.; BMW AG; *Energieaufwand und Kosten für die Bereitstellung von Erdgas als GNC und LNG*, VDE/VDI/GFPE – Tagungsband der Schliersee-Tagung “*Dezentrale, zentrale und globale Energiesystemen – Bausteine eines optimiertes Energieverbunds*”, April (1997)

López, J.M. (2007). *El medio ambiente y el automóvil. El reto del vehículo automóvil frente a la reducción global del CO₂*. Ciedossat, Madrid. ISBN:978-84-96437-70-8