

ASIGNACIÓN ENERGÉTICA DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA Y EMISIONES DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS EN REFINERÍA EN EL MARCO DEL ACV

Daniel Garraín

Israel Herrera

Carmen Lago

Yolanda Lechón

Rosa Sáez

CIEMAT – Dpto. Energía – Ud. Análisis de Sistemas Energéticos, Madrid (España)

Abstract

Several products with different characteristics and uses are usually obtained from oil refining process (olefins, propane, butane, gasoline, kerosene, diesel, paraffin, asphalt, etc.). Allocation of proportional impacts of energy consumption and emissions for each product is a difficult task because many of them are correlated.

When performing the life cycle assessment (LCA) of petroleum products, inventory data (input and output collection of mass and energy) are generally global compilations and they are not partitioned into sub-processes, but handled as a black box. Therefore, energy consumption and emissions are allocated according to the final product distribution

The most allocation methods used for petroleum products are often based on relationships of mass, energy content or market values. This study highlights the results of allocation of energy consumption and emissions of most usual petroleum products in a Spanish refinery, based on literature review. Results highlight the need of real data from refinery to obtain more adjusted results, as well as the possible partial subdivision of the system as a solution.

Keywords: *LCA; petroleum products; refinery; energetical allocation*

Resumen

Del proceso de refino de petróleo se obtienen normalmente diversos productos con diferentes características y usos (olefinas, propano, butano, gasolina, keroseno, gasóleos, parafinas, asfaltos, etc.). En este proceso resulta una tarea difícil la asignación de impactos proporcionales de consumos energéticos y emisiones a cada producto ya que muchos de ellos están correlacionados.

A la hora de realizar el análisis del ciclo de vida (ACV) de los productos de una refinería, los datos de inventario recopilados (entradas y salidas de materia y energía) suelen ser totales y no detallados por subprocesos, asimilándose de esta forma a una caja negra. Por tanto, los consumos energéticos y las emisiones están asignados de acuerdo a la distribución de producto final.

Los métodos de asignación utilizados generalmente para productos petrolíferos suelen estar basados en sus relaciones másicas, energéticas o de valores de mercado. En este estudio

se muestran los resultados de asignación de consumos energéticos y emisiones de los principales productos obtenidos en una refinería española, basados en estudios bibliográficos. A partir de los mismos se demuestra la necesidad de obtener datos propios reales de refinería para la obtención de resultados más ajustados, además de posibilidad de realización de subdivisiones parciales del sistema como solución.

Palabras clave: ACV; productos petrolíferos; refinería; asignación energética

1. Introducción

1.1 El proceso de asignación según la norma ISO 14044:2006

La norma ISO 14044:2006, en la que se presentan los requisitos y las directrices de la metodologías del ACV y que anula y sustituye a la ISO 14041:1999, define el proceso de asignación como la “distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes”, es decir, un procedimiento en el que se distribuyen las cargas ambientales generadas en el sistema a cada uno de los productos que se obtienen en el mismo (de la Rúa, 2009). Los pasos a seguir para realizar este procedimiento, según dictamina la norma ISO 14044:2006, son los siguientes:

- “Siempre que sea posible, se debería evitar la asignación: (i) dividiendo el proceso unitario a asignar, en dos o más subprocesos y recopilando datos de entrada y salida relacionados con estos subprocesos, o (ii) ampliando el sistema del producto para incluir las funciones adicionales relacionadas con los coproductos teniendo en cuenta los requisitos de los límites del sistema anteriormente definidos”.
- “Cuando no se pueda evitar la asignación, se deberían separar las entradas y salidas del sistema entre sus diferentes productos o funciones de tal forma que reflejen las relaciones físicas existentes entre ellos; es decir, deberían reflejar la forma en la cual se modifican las entradas y salidas por cambios cuantitativos en los productos o funciones procedentes del sistema”.
- “Cuando la relación física por sí misma no pueda establecerse o utilizarse como base de la asignación, se deberían asignar las entradas entre los productos y funciones que reflejen otras relaciones entre ellos”.

1.2 Asignación de impactos en productos petrolíferos

En los estudios de ACV, un proceso de fabricación multiproducto se define como el proceso en el cual se obtienen dos o más productos. En el caso de este tipo de procesos y debido a que el estudio de ACV se centra generalmente en los productos, la responsabilidad de las cargas ambientales asociadas debe asignarse a cada producto por un procedimiento adecuado (Kim & Overcash, 2000), ya que se considera de una trascendencia fundamental para la realización de un estudio correcto de impacto ambiental.

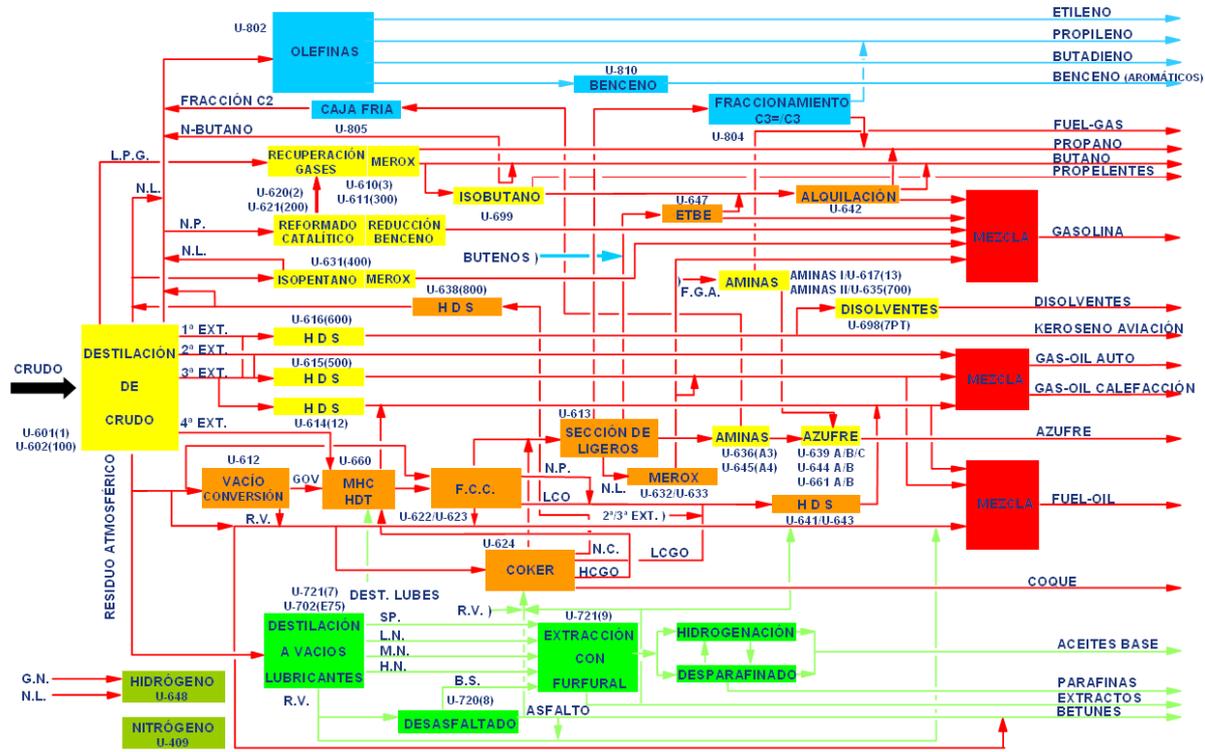
Este tipo de proceso se plantea con frecuencia en la fabricación de productos químicos, como es el caso de una refinería, ya que del proceso de refinado de petróleo se obtienen normalmente diversos productos con diferentes características y usos (olefinas, propano, butano, gasolina, keroseno, gasóleos, parafinas, asfaltos, etc.).

De forma general, a la hora de realizar el ACV de los productos de una refinería, los datos de inventario recopilados (entradas y salidas de materia y energía) suelen ser totales y no detallados por subprocesos ya que resulta muchas veces imposible por las características de las propias refinerías, asimilándose de esta forma a una caja negra. Así, los consumos energéticos y las emisiones están asignados de acuerdo a la distribución de producto final,

por lo tanto, para una mayor precisión y coherencia en los resultados, es necesaria la realización de un proceso de asignación de impactos en una refinería.

La figura 1 muestra, a modo de ejemplo, un diagrama de flujo del esquema de producción de una refinería española, en la que se puede observar la complejidad que supone el proceso de asignación de impactos proporcionales de consumos energéticos y emisiones a cada producto, ya que muchos de ellos están correlacionados. La dificultad de llevar a cabo la subdivisión de procesos o la realización de una expansión en los límites del sistema es lo que origina que los métodos de asignación utilizados generalmente para productos petrolíferos estén basados en sus relaciones de masa, contenido energético o valores de mercado.

Figura 1: Esquema general de producción de una refinería española (adaptación MMA, 2004)



A continuación se citan los estudios más relevantes encontrados en la bibliografía en los que se ha realizado un proceso de asignación de impactos en refinería.

Furuholt (1995) realizó un estudio de ACV para comparar la gasolina, la gasolina con MTBE y el diésel en una refinería noruega. En el mismo se presenta por primera vez el concepto de caja negra, resolviendo este problema con la división de la refinería en ocho subprocesos y realizando la correspondiente asignación por unidad de proceso en base al contenido másico, energético y volumétrico de los productos. Los resultados muestran una diferencia considerable en el consumo de energía y en las emisiones de gases por la diferencia en el consumo de energía por unidad de cada producto.

De forma muy parecida, aunque más detallada y precisa, en el estudio de Wang et al. (2004) se presenta una metodología para asignar el uso de la energía de la refinería entre los diferentes productos a nivel de los subprocesos individuales de la propia refinería en comparación con el nivel de refinería global. Esta asignación la realizan de acuerdo a la masa, el contenido energético y la cuota de valor en el mercado de los productos finales e intermedios en una refinería estadounidense. Los resultados difieren considerablemente a la

hora de realizar los diferentes tipos de asignación, concluyendo que, para determinados productos, la asignación realizada a nivel de subprocesos muestra los impactos de una forma más realista, los cuales se pasarían por alto si se realizara la asignación a nivel global. Este método sigue las recomendaciones de la normativa ISO en las que se considera que las asignaciones deben dividirse por subproceso cuando sea posible y es aplicable a cualquier refinería en la que los balances de materia y energía estén disponibles para cada unidad o subproceso.

La base de datos suiza Ecoinvent (Dones et al., 2007), en sus inventarios de sistemas energéticos, propone unos factores de asignación específicos para cada producto como media para refinerías suizas y europeas. De la misma forma que los autores anteriores, han separado de la forma más detallada posible los subprocesos de diversas refinerías para realizar la asignación másica y energética. Finalmente presentan unos factores de uso energía relativa y eléctrico los cuales describen la relación entre el consumo de energía o electricidad de un producto específico y la media del consumo energético o eléctrico de la refinería completa.

A nivel español, Lechón et al. (2005 y 2006) han realizado estudios de ACV de diferentes combustibles alternativos para el transporte para su comparación con los tradicionales. En el caso de la gasolina (Lechón et al., 2005) han efectuado la asignación en base al contenido energético y al valor económico en función de la producción de cada producto en refinería, mientras que para el diésel (Lechón et al., 2006), se realizaron estos mismos procedimientos de asignación, completando el estudio con la expansión de los límites del sistema para el caso de producción de biodiésel de aceites vegetales y bioetanol de cereales.

Los estudios de Babusiaux & Pierru (2007) y Pierru (2007) muestran la asignación de las emisiones de dióxido de carbono en una refinería mediante modelos de programación lineal, normalmente utilizados por las empresas petrolíferas para reducir los costes variables bajo unas determinadas restricciones de mercado. El establecimiento de un mercado de derechos de emisión de CO₂ en Europa ha motivado el uso de estos modelos para el cálculo de la contribución marginal de cada producto de la refinería referido a las emisiones gaseosas. Demuestran que, además de los gastos de funcionamiento, en los costes variables pueden incluirse los costes asociados a las citadas emisiones. Para ello proponen distintos modelos todos ellos inspirados en la teoría económica, como el método de reparto de costes de Aumann-Shapley, la adaptación de la fórmula de los precios de Ramsey o usando contribuciones marginales adaptadas proporcionalmente. La asignación basada en estos métodos conduce a resultados interesantes en el ACV de productos petrolíferos.

Tehrani Nejad M. (2007a; 2007b) también plantea en sus estudios el uso de modelos de programación lineal, proponiendo una metodología original basada en la contribución marginal de los productos del petróleo y la elasticidad de la producción de la unidad de procesos para proporcionar un esquema adicional de asignación de CO₂. Demuestra que este procedimiento es coherente con teorías microeconómicas.

Finalmente, cabe destacar el estudio de Ozalp & Hyman (2007), en el que se asignan los insumos energéticos del crudo y del carbón con el llamado 'modelo energético de final de uso'. Para ello se asignan los insumos de combustibles fósiles y energías renovables entre usos finales genéricos (procesos de generación de calor, procesos de generación de frío y refrigeración, maquinaria, procesos eléctricos, etc.), incluyendo las conversiones intermedias a través de la generación de electricidad y vapor en refinerías norteamericanas.

2. Metodología

Para llevar a cabo el proceso de asignación, obviamente la disponibilidad de datos es fundamental para su realización. En algunos casos es una tarea difícil debido a la confidencialidad de los mismos o, simplemente, por la dificultad de su cuantificación. Por ello y por regla general, muchas veces se recurre a la extrapolación de resultados de asignación de otras industrias y procesos afines.

En este estudio se pretende realizar la asignación de consumos o eficiencias energéticas y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los principales productos petrolíferos en una refinería española en la que no pueden subdividirse todos los procesos. Por esto, para este cometido se mostrarán los resultados a partir de la extrapolación de datos de asignación de otros autores. La tabla 1 muestra los datos de inventario más relevantes para una refinería en España bajo estudio (adaptación MMA, 2004) en cuanto a los principales productos obtenidos, emisiones de gases y consumos energéticos por cantidad de crudo.

Tabla 1. Datos de entradas y salidas más relevantes de materia y energía de una refinería española (adaptación MMA, 2004), por tonelada de crudo

Entradas (MJ)		Salidas (kg)	
Electricidad externa	269,18	Etileno	26,50
Gas natural	438,56	Propileno	18,03
		Butadieno	7,70
		Aromáticos	11,43
		Propano	5,78
		Butano	8,38
		Naftas	2,39
		Gasolina (95 y 98)	141,46
		Keroseno	46,81
		Diésel (<10 ppm, B, C)	486,63
		Azufre	11,62
		Fuel-oil	17,49
		Coque	67,82
		Betunes	42,81
		Otros (fuel gas, lubricantes, parafinas, propelentes, extractos)	105,15
		GEI (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) (CO ₂ eq.)	365,56

2.1 Asignación a partir de factores de refinerías europeas (Dones et al., 2007)

La tabla 2 presenta los factores de uso energía relativa y eléctrico utilizados sobre los datos de inventario de la refinería bajo estudio, en la que su producto principal es la gasolina. Estos factores describen la relación entre el consumo de energía o electricidad de un producto específico y la media del consumo energético o eléctrico de la refinería completa.

Tabla 2. Factores de asignación energética de los productos principales en una refinería media europea (Dones et al., 2007)

Producto	Uso de energía relativa	Factor eléctrico
Betún y coque	0,7	1,11
Fuel-oil pesado	0,7	0,90
Fuel-oil ligero	1,0	0,70
Diésel	1,0	0,70
Keroseno	1,0	0,60
Gasolina	1,8	1,59
Nafta	0,6	1,59
Propano/butano	1,5	1,41
Fuel gas	1,5	0,95
Azufre	1,5	1,00

2.2 Asignación a partir de factores de eficiencia energética de una refinería estadounidense (Wang et al., 2004)

En el estudio se ha desarrollado una asignación de acuerdo con la masa, el contenido energético y la cuota de valor en el mercado de los productos finales e intermedios en una refinería estadounidense en la que su producto principal es la gasolina, obteniendo los resultados de intensidad energética de la tabla 3. Para el caso de estudio se considerarán los valores de la tercera columna correspondientes a la asignación energética.

Tabla 3. Intensidad energética de productos principales a partir de la asignación del consumo energético en base a sus contenidos másicos, energéticos y económicos (Wang et al., 2004)

Producto final	Base producción másica (%)	Base contenido energético (%)	Base valor económico (%)
Fuel gas	78,2	110,0	40,1
Nafta	52,4	50,9	36,7
Diésel	71,1	71,8	88,0
Keroseno	61,1	62,4	50,2
Gasolina	116,6	115,9	127,5
GLP	52,4	46,2	52,9
Gasoil	114,3	112,7	102,9
Fuel-oil pesado	72,1	64,0	20,4
Asfaltos	125,3	123,0	113,0
Lubricantes	158,5	156,0	164,2
Hidrógeno gas	129,3	160,3	83,7

2.3 Asignación a partir de datos de refinerías europeas (Dones et al., 2007) y aplicación del método de Wang et al. (2004)

Del estudio de Dones et al. (2007) se puede calcular los porcentajes de consumo eléctrico que le corresponden a cada producto. Para ello se considera el gasto energético (eléctrico y térmico) por kg de producto y la masa total de producida de cada uno. La relación final entre este consumo energético y la producción anterior es la que utilizan Wang et al. (2004) para calcular los factores de intensidad energética. La tabla 4 muestra estos valores, en los que la última columna muestra el porcentaje final de asignación.

Tabla 4. Intensidad energética de productos principales a partir de datos de producción de Dones et al. (2007) y el método de asignación energética de Wang et al. (2004)

Producto	Consumo energét. específ. (MJ/kg)	Producción (%)	Consumo energét. relativo (%)	Intensidad energét. (%)
Betún y coque	0,97	2,79	1,72	61,53
Fuel-oil pesado	0,96	17,00	10,30	60,61
Fuel-oil ligero	1,33	28,80	24,27	84,26
Diésel	1,33	10,80	9,11	84,32
Keroseno	1,32	9,85	24,27	28,73
Gasolina	2,42	23,40	35,90	153,38
Nafta	0,87	0,84	0,46	54,90
Propano/butano	2,02	4,14	5,30	127,99
Fuel gas	1,99	3,64	4,59	126,00
Azúfre	1,97	0,08	0,10	125,00

2.4 Asignación a partir de datos de refinerías europeas (Dones et al. 2007) y extrapolación másica en base a la producción

Para realizar esta asignación se han teniendo en cuenta los valores calculados del consumo energético relativo por producto de la tabla 4. Considerando los datos de inventario de la refinería se ha realizado una extrapolación másica en base a estos valores de producción. La tabla 5 muestra los resultados del porcentaje de asignación de las entradas y salidas para cada productos considerado tras estas operaciones, los cuales posteriormente se introdujeron en el programa informático de evaluación SimaPro v.7.1 (PRé, 2007).

Tabla 5. Factores de asignación energética de productos principales (Dones et al., 2007)

Producto	Porcentaje de producción (%)	Asignación energét. (%)
Betún y coque	4,70	0,69
Fuel-oil ligero	1,92	5,68
Diésel	53,39	41,61
Keroseno	5,13	3,64
Gasolina	15,52	47,67

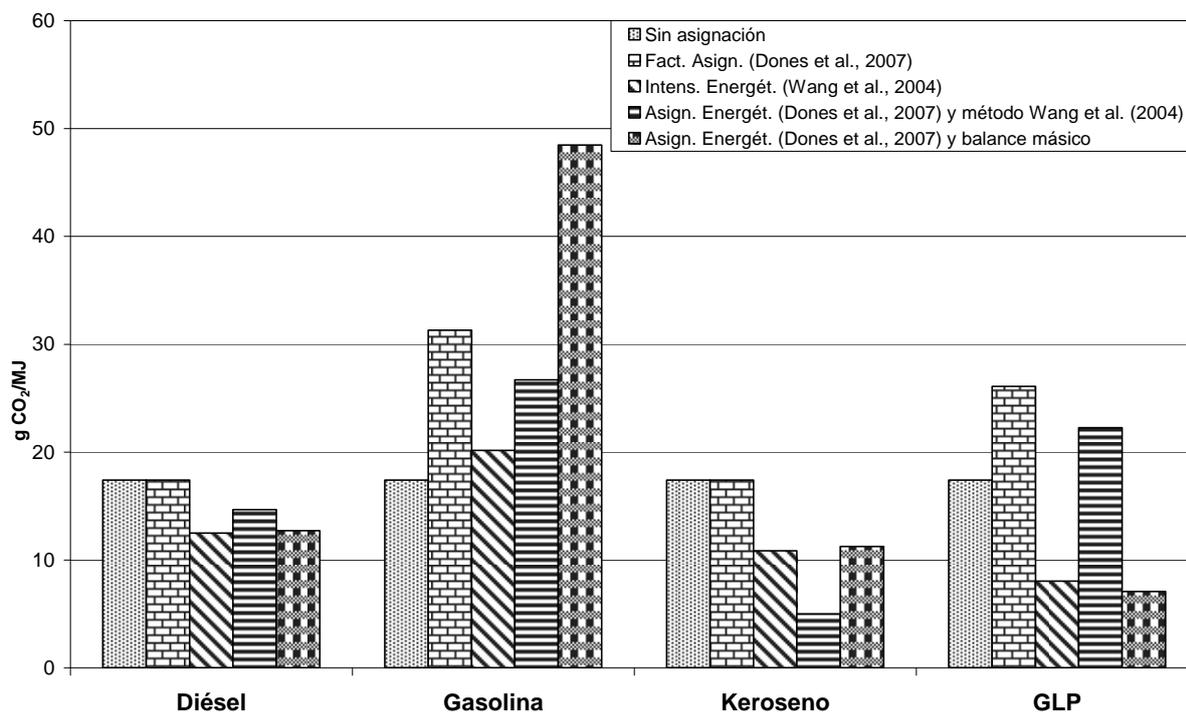
Nafta	0,26	0,01
Propano/butano (GLP)	1,55	0,70
Azufre	1,27	0,01
Otros	16,25	-

3. Resultados y discusión

A partir de los datos de inventario de la refinería se ha realizado un ACV desde la extracción del crudo hasta el producto en refinería por cada MJ producido, considerando de esta forma a la refinería en global como una caja negra. Para su cálculo se ha utilizado el programa SimaPro v.7.1 (PRé, 2007) con el método de caracterización de CML 2 baseline 2000, obteniendo unos valores aproximados a 17 gramos de CO₂ equivalentes y 1,3 MJ equivalentes por cada MJ producido en la categorías de calentamiento global y agotamiento de recursos fósiles no renovables respectivamente.

A estos valores se les asignó los correspondientes valores calculados según los distintos métodos y factores. La figura 2 muestra los resultados correspondientes a las emisiones de GEI en la categoría de calentamiento global. Los resultados para el agotamiento de recursos fósiles son similares a fines comparativos en cuanto a relaciones entre un método y otro.

Figura 2: Emisiones de GEI de los productos principales de la refinería considerando los diferentes valores de asignación en base energética



A la vista de los resultados se puede afirmar que existe una gran disparidad en las emisiones y consumos en función del método y factores utilizados para la asignación. El producto principal en la refinería de estudio es el diésel, por lo que el uso de factores y eficiencias extrapoladas de refinerías en las que el producto principal es la gasolina provoca estas diferencias en los resultados finales, como queda reflejado en el último caso, en la que se realiza la extrapolación másica.

No obstante, si se tuviera que tomar una decisión para la asignación en el caso de estudio, los factores de Dones et al. (2007) ó los valores de los mismo autores con el método de Wang et al. (2004) podrían ser los más adecuados debido a que los datos del estudio de Dones et al. (2007) surgen como resultado de la media entre diversas refinerías europeas. Esto hecho hace que las condiciones de contorno de la refinería española bajo estudio sean adaptables, aún considerando que la producción está enfocada en otro producto diferente.

4. Conclusiones y recomendaciones

La extrapolación de factores o asignaciones energéticas de otros estudios para un caso específico no aporta resultados fiables sobre los consumos y emisiones específicas por categoría de producto. Únicamente sería conveniente realizar este tipo de extrapolaciones en el caso en el que la refinería en estudio tenga procesos y datos de producción similares.

En el caso de la refinería de estudio, la obtención de datos de consumos energéticos (eléctricos y térmicos) reales es necesaria para proceder a realizar una asignación más adecuada que aporte información sobre los consumos y emisiones de cada producto. Pero como se ha relatado anteriormente, este proceso puede llegar a ser muy dificultoso e incluso, a veces imposible, dependiendo de las características de la refinería.

Debido a la complejidad de la toma de datos de estos procesos denominados como cajas negras, la Comisión Europea propone en su guía de referencia internacional para la realización de ACV (EC-JRC-IES, 2010) que si el estudio está enfocado en la asignación a un determinado producto de la refinería, se puede realizar el procedimiento con una subdivisión parcial del sistema.

En el caso de la refinería española bajo estudio en la que se quisiera determinar, como aproximación, el impacto real del producto diésel (ver figura 1), se conseguiría separando del sistema este subproceso específico con la consecución de los datos de inventario de la columna de destilación, los procesos de hidrotreatmento (HDS) y los procesos de mezcla. El resto de productos se tratarían como subproductos pertenecientes a la caja negra que conformaría el resto de la refinería. Pero para este cometido se vuelve a incidir de nuevo en la necesidad de disponer de datos reales ya que si no, se volvería a depender de factores o métodos de asignación de otros autores, lo que llevaría a la obtención de resultados dispares y no ajustados al impacto real.

Finalmente, cabe remarcar que el cálculo de las emisiones de GEI imputables a los combustibles fósiles, cobra una gran importancia en la actualidad, ya que dentro del marco global de lucha contra el cambio climático, los ahorros de emisiones imputables a los combustibles alternativos, dependen en gran medida, del dato de referencia para los combustibles fósiles. Por ello, las diferencias existentes en las emisiones de las refinerías, según el método de asignación usado, pueden influir en el desarrollo de las futuras políticas energéticas, según el dato que se asuma para los combustibles fósiles.

5. Referencias

Babusiaux, D., Pierru, A. (2007). Modelling and allocation of CO₂ emissions in a multiproduct industry: The case of oil refining. *Applied Energy* 84, 828-841.

de la Rúa, C. (2009). *Desarrollo de la herramienta integrada 'Análisis de Ciclo de Vida – Input Output' para España y aplicación a tecnologías energéticas avanzadas*. Tesis doctoral, Colección Documentos CIEMAT, ISBN: 978-84-7834-632-5, Madrid, España.

Dones, R., Bauer, C., Bollinger, R., Burger, B., Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R., Heck, T., Jungbluth, N., Röder, A., Tuschsmid, M. (2007). *Life cycle inventories of energy systems: Results for current systems in Switzerland and other UCTE countries*. Ecoinvent

- report No. 5, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suiza.
- EC-JRC-IES (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. First Edition, European Commission-Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italia.
- Ekwall, T., Tillman, A.M. (1997). Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2 (3) 155-162.
- EPD (2007). *Revision of the EPD System into an International EPD*. Draft Version, Swedish Environmental Management Council (<http://www.environdec.com>).
- Furuholt, E. (1995). Life cycle assessment of gasoline and diesel. *Resources, Conservation and Recycling* 14, 251-263.
- ISO 14040:2006. *Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia*.
- ISO 14044:2006. *Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Requisitos y directrices*.
- Kim, S., Dale, B.E. (2002). Allocation procedure in ethanol production system for corn grain. I. System expansion. *International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (4) 237-243.
- Kim, S., Overcash, M. (2000). Allocation procedure in multi-output process: An illustration of ISO 14041. *International Journal of Life Cycle Assessment* 5 (4) 221-228.
- Lechón, Y., Cabal, H., Lago, C., de la Rúa, C., Sáez, R., Fernández, M. (2005). *Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase I: Análisis del ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina*. Centro de Publicaciones – Secretaría Gral. Técnica – Ministerio de Medio Ambiente, ISBN: 84-8320-312-X, Madrid, España.
- Lechón, Y., Cabal, H., de la Rúa, C., Lago, C., Izquierdo, L., Sáez, R., Fernández, M. (2006). *Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase II: Análisis del ciclo de vida comparativo del biodiésel y del diésel*. Centro de Publicaciones – Secretaría Gral. Técnica – Ministerio de Medio Ambiente, ISBN: 84-8320-376-6, Madrid, España.
- Luo, L., van der Voet, E., Huppes, G., Udo de Haes, H.A. (2009). Allocation issues in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14:529-539.
- Malça, J., Freire, F. (2006). Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy* 31, 3362-3380.
- MMA. (2004). *Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector refino de petróleo*. Centro de Publicaciones – Secretaría Gral. Técnica – Ministerio de Medio Ambiente, DGCEA, ISBN: 84-8320-259-X, Madrid, España.
- Ozalp, N., Hyman, B. (2007). Allocation of energy inputs among the end-uses in the US petroleum and coal products industry. *Energy* 32, 1460-1470.
- Pierru, A. (2007). Allocating the CO₂ emissions of an oil refinery with Aumann-Shapley prices. *Energy Economics* 29, 563-577.
- PRé (2007). SimaPro ® 7.1. PRé Consultants, Amersfoort, Holanda (<http://www.pre.nl>).
- Szklo, A., Schaeffer, R. (2007). Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries. *Energy* 32, 1075-1092.

- Tehrani Nehad M., A. (2007a). Allocation of CO₂ emissions in joint product industries via linear programming: a refinery example. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 62, No. 5, pp.653-662.
- Tehrani Nehad M., A. (2007b). Allocation of CO₂ emissions in petroleum refineries to petroleum products: A linear programming model for practical application. *Energy Economics* 29, 974-997.
- Tillman, A.M. (2000). Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review* (20) 113-123.
- Wang, M., Lee, H., Molburg, J. (2004). Allocation of energy use in petroleum refineries to petroleum products. Implications for life-cycle energy use and emission inventory of petroleum transportation fuels. *International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (1) 34-44.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Daniel Garraín Cordero
Ministerio de Ciencia e Innovación
CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)
Departamento de Energía – Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos
Av. Complutense, 22 – E28040 Madrid (España)
Tel: +34 913466091
Fax: +34 913466005
E-mail: daniel.garrain@ciemat.es
URL: <http://www.ciemat.es>