

## VII. Vectores energéticos químicos basados en carbono: Combustibles sintéticos y biocarburantes

JOAQUÍN PÉREZ PARIENTE



Doctor en Ciencias Químicas. Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Es el actual Director del Centro de Catálisis y Petroquímica del CSIC. Académico Correspondiente de la Real Academia Nacional de Farmacia.

### EL ESCENARIO HISTÓRICO

La humanidad ha dependido esencialmente de recursos energéticos de origen biológico a lo largo de su historia, como lo muestra el empleo de madera como combustible, o el uso de energía humana y animal. Habría que añadir, no obstante, el aprovechamiento del viento a través de molinos y su uso en el transporte fluvial y marítimo, así como el empleo de la energía potencial de las corrientes de agua. La biomasa ha sido prácticamente la única fuente de energía primaria química durante milenios, y sólo se han producido mejoras en la eficacia del uso de esa energía, como por ejemplo en la invención de los hornos de cocción de cerámica alrededor del VIII milenio a.C. También se introdujeron mejoras en los sistemas de tracción animal en época medieval, o en el desarrollo e implementación de distintos tipos de velamen que podían aprovechar con más eficacia la fuerza del viento.

La primera gran revolución tecnológica en el campo de la energía se produce con la invención de la máquina de vapor en el siglo XVIII. Esencialmente, se trata de un sistema de transformación de energía térmica de origen químico procedente de la combustión del carbón mineral, en energía mecánica. El empleo eficaz de ese sistema lleva consigo simultáneamente el uso de una fuente de energía primaria con mayor densidad de energía por unidad de masa y de volumen, el carbón mineral, en lugar de la madera usada tradicionalmente. Por primera vez

en la historia, la humanidad dispuso de un sistema de producción de energía mecánica independiente de la tracción animal o humana, o de factores medioambientales. Sin embargo, en virtud de su capacidad de producir una energía muy superior a la de aquéllas, requiere una cantidad de energía primaria muy superior a la que se había necesitado hasta entonces. Además, hay que destacar otro aspecto importante: la máquina de vapor produce mucha mayor densidad de energía, no sólo en términos de energía producida por unidad de tiempo, sino también en lo que se refiere a energía producida por dispositivo o por unidad de volumen del dispositivo. Esta última propiedad, la densidad de energía, permite realizar tareas que anteriormente sólo se podían abordar con gran dificultad empleando tracción animal. Esta circunstancia revolucionó los métodos de transporte, y produjo el surgimiento de uno totalmente nuevo, el ferrocarril, además de transformar radicalmente el transporte marítimo y fluvial al independizar el mismo de la existencia de viento, dando lugar a la construcción de buques de un tonelaje muy superior al conocido hasta entonces.

La implementación masiva de la máquina de vapor en numerosos procesos industriales constituyó el factor esencial en lo que se denominó Revolución Industrial, que se desarrolla a lo largo del siglo XIX. El otro aspecto relevante en la historia de la tecnología energética introducido durante el siglo XIX fue el descubrimiento y aplicación industrial de sistemas de transformación de la energía mecánica producida en las máquinas de vapor en energía eléctrica. La energía eléctrica puede considerarse como un sistema eficaz de transporte de la energía producida en las máquinas de vapor, que además podía reconvertirse en energía mecánica a pequeña escala mediante los motores adecuados, o podía transformarse de nuevo directamente en energía térmica o luminosa. La introducción masiva de la energía eléctrica constituyó por sí misma una enorme revolución tecnológica, que hizo posible con el correr del tiempo la introducción de numerosos equipamientos tecnológicos en los hogares. No obstante, este hecho no debe hacernos olvidar que prácticamente la principal fuente de energía primaria empleada durante todo el siglo XIX y los comienzos del siglo XX fue el carbón fósil. El gas, que se comenzó a usar en las ciudades europeas en el alumbrado público y privado desde comienzos del siglo XIX, también se obtenía del carbón mineral mediante procesos de gasificación, a la vez que el residuo (coque) encontraba aplicaciones importantes en la industria siderúrgica, alrededor de la cual giró la revolución industrial.

En la última década del siglo XIX se producen varios descubrimientos científicos e invenciones tecnológicas que constituyen los fundamentos de las nuevas tecnologías energéticas del siglo XX. En 1892, Diesel inventa el motor de explosión que lleva su nombre, que se unió al de gasolina inventado en la década de los ochenta. Al igual que ocurrió anteriormente con la máquina de vapor, el nuevo motor térmico requería el empleo de ingentes cantidades de un nuevo combustible, esta vez el petróleo. Este producto se conocía en la antigüedad, siendo mencionado en tablillas asirias del siglo VII a.C., pero los comienzos de la moderna industria del petróleo datan de 1859, con la apertura de los campos

petrolíferos de Pensilvania, en Estados Unidos. El petróleo crudo se destilaba para obtener queroseno, aceites lubricantes y ceras parafínicas. Sin embargo, fue el enorme desarrollo que experimentaron los vehículos de transporte el que impulsó el nacimiento de la industria petrolera. La incorporación de un motor de explosión a un vehículo provisto de alas por parte de los hermanos Wright en 1903 condujo al desarrollo de la aviación, el medio de transporte característico del siglo XX. El petróleo por lo tanto es junto con el carbón la principal fuente de energía primaria hasta la primera mitad del siglo XX, y constituye una marca característica de nuestra civilización a escala planetaria.

En el mes de febrero de 1896, el científico francés Henry Becquerel reporta la primera prueba experimental de la existencia de la radioactividad. Las investigaciones cerca de las propiedades del núcleo atómico que se desarrollaron a lo largo de la primera mitad del siglo XX, condujeron finalmente en 1957 a la puesta en funcionamiento en los Estados Unidos de la primera planta comercial de generación nuclear de energía eléctrica, con una potencia de 60 megavatios. A esta primera central nuclear siguieron otros varios centenares distribuidas en diferentes países, pero a pesar de este desarrollo, los combustibles fósiles sigue siendo la principal fuente de energía primaria para la producción de energía eléctrica, aunque su grado de contribución varía notablemente de un país a otro. En la figura 1 se representa la evolución en el consumo de los distintos tipos de energías primarias en los últimos 150 años.

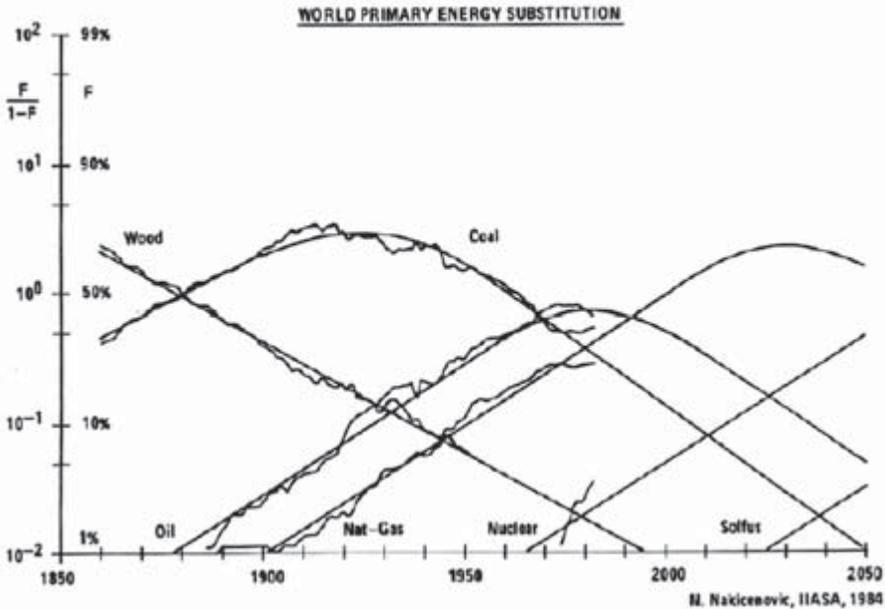


FIGURA 1. Evolución de los distintos tipos de energías (1).

En la Figura 2 se muestra el enorme incremento que ha experimentado el consumo de energía desde mediados del siglo XIX, mientras que en la Figura 3 se muestra el aumento de población mundial en aproximadamente el mismo período. Se observa en las figuras que el aumento del consumo de energía ha sido muy superior al incremento de población. En otras palabras, se asiste a un aumento continuo de la cantidad de energía per cápita, que puede considerarse como una característica básica del desarrollo económico, aunque existen grandes diferencias en el consumo de energía por habitante entre distintos países desarrollados. Es decir, el consumo de energía por habitante no siempre está directamente relacionado con el Producto Interior Bruto también por habitante, y ello es una consecuencia de las diferencias en los respectivos modelos socioeconómicos.

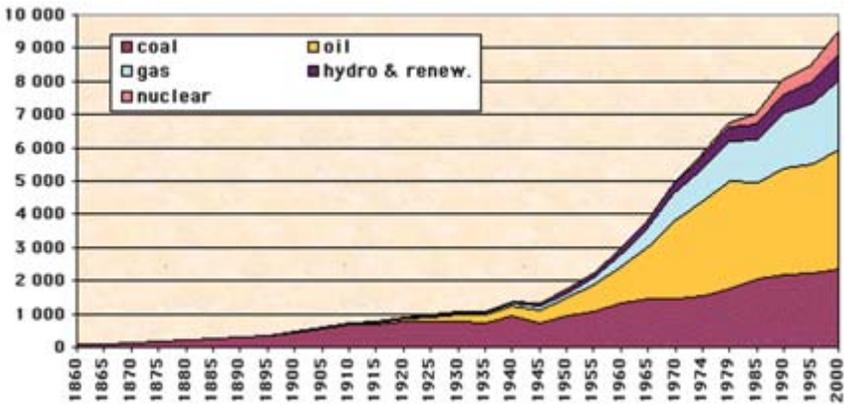


FIGURA 2. Evolución del consumo de los distintos tipos de energías (2).

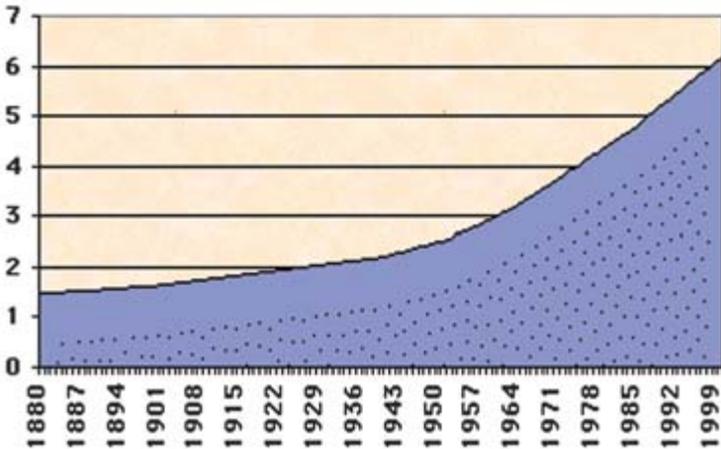


FIGURA 3. Variación de la población mundial ( $\times 10^9$ ) desde 1880 (2).

## FACTORES BÁSICOS QUE CONDICIONAN EL DESARROLLO DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVAS

### 1. El escenario energético en España y en la UE

Para poder comprender la necesidad de introducir cambios drásticos en la naturaleza de las fuentes de energía utilizadas hasta el momento, es necesario previamente conocer con detalle la estructura del consumo energético en nuestro entorno, a saber, en nuestro país y en la Unión Europea. Los datos que se presentan a continuación se basan casi en su totalidad en el Informe de Primavera sobre Sostenibilidad en España 2005, publicado por el Observatorio de la Sostenibilidad en España (3), ya que ofrecen un panorama muy completo y detallado de los distintos indicadores energéticos de España.

#### *Estructura y evolución del consumo de energía primaria y final*

Se denomina *energía primaria* a la cantidad total de recursos energéticos consumidos para cualquier uso, ya sea directamente o para su transformación en otra forma de energía. El consumo interior bruto de energía primaria mide el aprovisionamiento de fuentes energéticas tanto propias como importadas, y es igual a la suma de la producción más las importaciones, a lo que habría que restar las exportaciones. El consumo se expresa generalmente en ktep ( $10^3$  toneladas equivalentes de petróleo), o Mtep ( $10^6$  toneladas equivalente de petróleo). Estrechamente relacionado con el consumo de energía primaria, está el consumo de *energía final*, es decir, «la energía consumida en los procesos que utilizan energía para obtener un servicio o un bien específico de uso final». Así, la energía consumida por un aparato electrodoméstico sería energía final, pero la energía empleada para

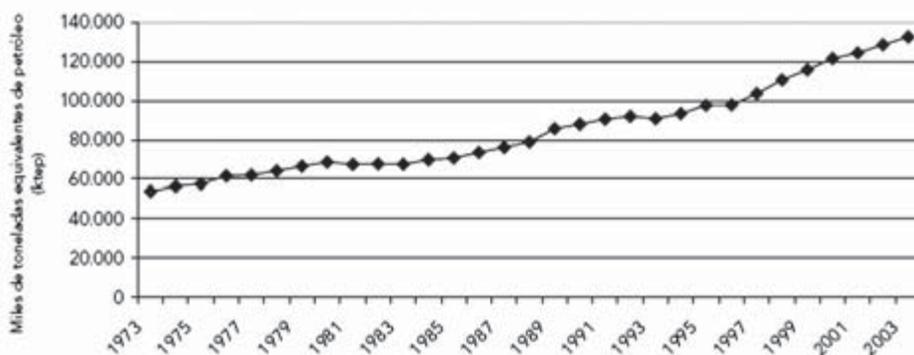
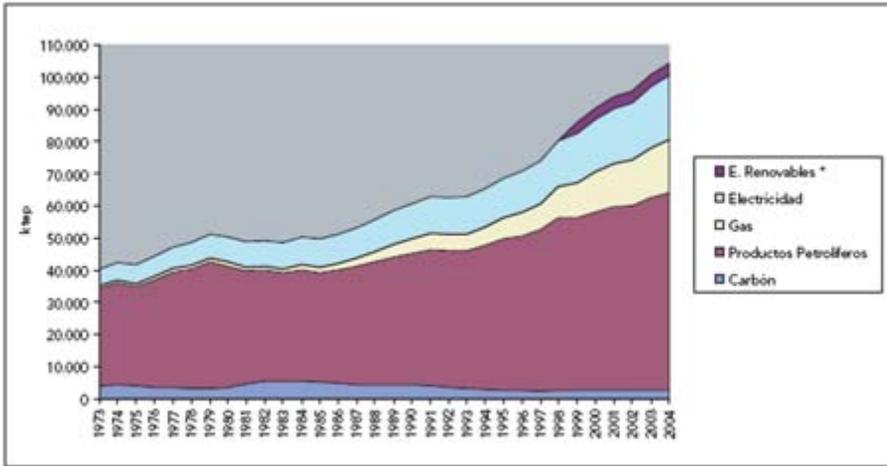


FIGURA 4. Consumo de energía primaria total en España (ktep) 1973-2003. Fuente: Dirección General de Política Energética (DGPE), 2004.

generar esa electricidad sería energía primaria. El consumo de energía final es siempre menor que el consumo de energía primaria, debido a las pérdidas que se producen en los procesos de transformación de la energía primaria en energía final. La energía final, al igual que la primaria, puede definirse de modo que incluya o no la energía consumida en usos no energéticos, como el consumo de derivados del petróleo en la industria química.



Nota: Sólo se muestran datos de energías renovables desde 1999.

FIGURA 5. Consumo de energía final total en España. Fuente: DGPE.

Las Figuras 4 y 5 representan, respectivamente, la evolución del consumo de energía primaria total y de energía final total en España en los últimos 30 años. Según se observa en las figuras, el consumo se ha multiplicado por 2,5 en ese período, con un ritmo de crecimiento anual medio en los últimos cinco años del 3,5%, alcanzando un valor de 141 Mtp e y 104 Mtp e para el consumo de energía primaria y final, respectivamente. Es decir, sólo se recupera como energía final aproximadamente un 60% de la energía primaria total, lo que da una idea elocuente de la importancia que tiene la mejora continua de la eficiencia de los sistemas de transformación energética. El ritmo de crecimiento en el conjunto de la Unión Europea en el período 1990-2002 fue muy inferior, el 1,1% anual. Las Tablas 1 y 2 recogen, respectivamente, la contribución de las distintas fuentes de energía primaria al consumo total, y la demanda de energías finales en España y en la UE, lo que representa esencialmente nuestro modelo energético. Las energías renovables (incluyendo la hidroeléctrica) suponen en España menos del 7% del total de energía primaria, una cifra similar a la de la media de la UE, aunque se detecta un ritmo de crecimiento de la energía eólica muy superior al de la media de nuestros socios europeos. Se está produciendo en España un crecimiento continuo del consumo de gas natural, en detrimento del petróleo, y se prevé una pérdida progresiva de la contribución del carbón.

TABLA 1. Estructura del consumo de energía primaria en España (2004) y en la UE (2003). Consumo total en España en 2004: 141.565 ktep

<i>Energía primaria (%)</i>		
<i>Energía</i>	<i>España</i>	<i>UE</i>
Petróleo	50	40,3
Gas natural	17,3	23,1
Carbón	14,9	14,7
Nuclear	11,7	15,5
Hidráulica	1,9	2,0
Biomasa	3,1	3,8
Eólica	0,9	0,2
Otras	0,4	0,23 *

\* Incluye 0,2% de geotérmica y 0,03% de solar térmica.

TABLA 2. Estructura del consumo de energía final en España (2004) y en la UE (2002). Consumo total en España en 2004: 104.358 ktep

<i>Energía final (%)</i>		
<i>Energía</i>	<i>España</i>	<i>UE</i>
Petróleo	58,8	45,9
Gas natural	16,1	24,1
Carbón	2,4	3,6
Electricidad	19	20,7
Energías renovables	3,7	4
Calor	-	1,7

La energía final de mayor tasa de crecimiento en España en el período 1999-2004 fue el gas natural (53,8%), seguido de la electricidad (29,7%), petróleo (14,2%) y energías renovables (7,9%), registrándose una disminución del consumo de carbón del 3,7%. Por sectores, y considerando consumos energéticos y no energéticos, en el año 2003 el sector del transporte consumió un 37,2% de la energía final, el sector industrial el 36,8% y usos diversos el 26%. Si exceptuamos del cálculo los consumos no energéticos, como los productos petrolíferos consumidos por la industria química, un 39% de la energía final se destina al transporte, frente al 31% de la industria. La participación del transporte por carretera en el consumo de petróleo ha pasado del 18% al 50% entre 1973 y 2000. Además, la contribución del transporte respecto al total de energía final ha creci-

do a mayor ritmo que la de los otros dos sectores, multiplicándose por 2,5 en el período 1980-2003, mientras que sólo lo hizo por 1,5 en el sector industrial, y por 2,2 en el sector de usos diversos. Ese aumento se debe esencialmente al notable incremento del parque automovilístico, a la mejora de infraestructuras viarias, y, en lo que se refiere al sector de usos diversos, a la mejora del equipamiento residencial y terciario. Todos esos factores son una consecuencia del aumento de la renta per cápita en nuestro país, que ha crecido a un ritmo superior al de la media de la UE.

Otra de las características del modelo energético de nuestro país es su fuerte dependencia exterior. La producción interior de energía primaria, es decir, la energía obtenida de recursos energéticos existentes en el interior del país, fue de 29.234 ktep en el año 2004, que representa sólo alrededor del 20% del total de la energía primaria que consumimos. La mayor parte de esa energía, un 57% correspondió a la energía nuclear; un 24% al carbón, un 9,3% a la energía hidráulica, y el 8,4% a otras energías renovables, mientras que la producción de petróleo y gas natural sólo supuso el 1,9% del total. Además, sólo la energía nuclear y las energías renovables (sin incluir la hidroeléctrica) muestran tasas de crecimiento positivas. Las energías renovables crecieron un 21,8% entre el año 2003 y el 2004, gracias sobre todo a la energía eólica.

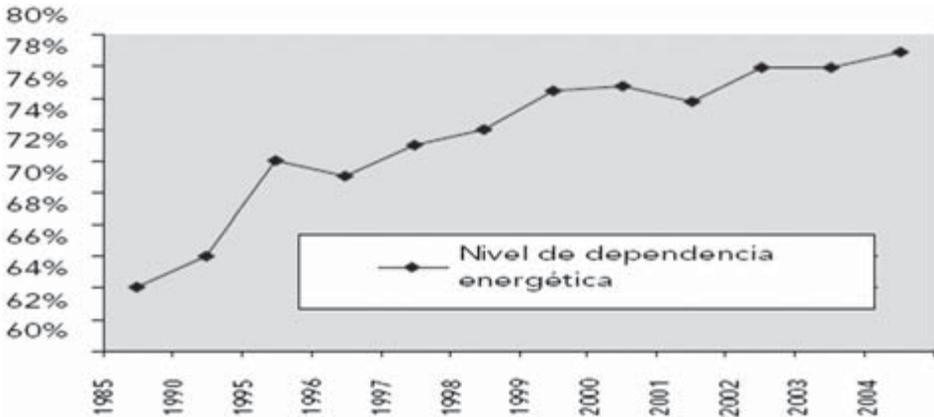


FIGURA 6. Nivel de dependencia energética en España (3).

Tal y como muestra la Figura 6, el nivel de dependencia energética en España ha seguido una tendencia creciente en las últimas dos décadas, hasta situarse en el 79% en el año 2004, es decir, importamos las cuatro quintas partes de la energía primaria que consumimos. Nuestro grado de autoabastecimiento es por lo tanto de sólo el 21%, cuando en la UE-15 alcanza el 50%. Este hecho tiene como consecuencia que nuestro país es mucho más sensible que la media de la UE ante variaciones en el aprovisionamiento de recursos energéticos

exteriores, lo que puede suponer una seria amenaza para nuestro desarrollo económico. Teniendo en cuenta nuestro ritmo de crecimiento del consumo de energía primaria, un 3,5% anual, y el estancamiento e incluso ligero descenso de la producción interior, cabe vaticinar que seguirá aumentando nuestra dependencia energética. Además, si bien nuestro aprovisionamiento de petróleo está relativamente diversificado, no ocurre lo mismo con el de gas natural, que en sus dos terceras partes proviene de Argelia y Libia.

Como se ha indicado anteriormente, el consumo de energía viene determinado en buena medida por la actividad económica, de tal manera que se define el indicador *intensidad energética de la economía*, que mide «la cantidad de energía necesaria para movilizar un volumen de actividad económica (en términos de PIB)». La unidad de medida de este indicador es toneladas equivalentes de petróleo (tep) por 1.000 euros de PIB (a precios constantes de 1995), y se puede referir a energía primaria o final. Este indicador muestra esencialmente la eficiencia en el uso de la energía para crear riqueza. La Figura 7 muestra un aumento continuo de la intensidad energética desde comienzos de los noventa, es decir, cada incremento del PIB requiere cada vez mayor consumo de energía, en otras palabras, estamos aumentando nuestro consumo de energía a un ritmo mayor que el del PIB. Nuestra comparación con la UE de nuevo nos desfavorece, ya que en la UE la tendencia es justo la opuesta, es decir, el PIB crece a mayor ritmo que el consumo de energía. Como consecuencia de esa evolución, en el año 2002 nuestra intensidad energética fue entre un 20 y un 25% superior a la de la UE-15, una brecha energética que muestra una clara tendencia a agrandarse, y que, en un escenario en el que son previsibles aumentos continuos en el precio de los recursos energéticos primarios de origen fósil, sobre todo del petróleo, va a repercutir de manera negativa en nuestra economía con mucha mayor intensidad de lo que va a hacerlo en las economías de nuestros socios de la UE, es decir, nuestra economía será cada vez menos competitiva.

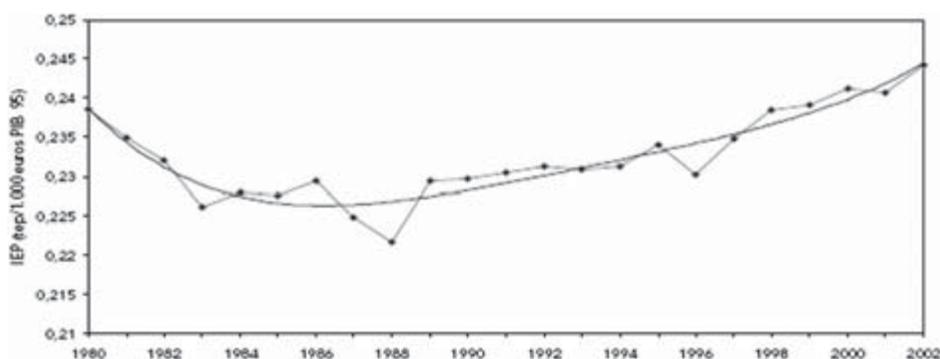


FIGURA 7. Evolución de la intensidad energética en España (3).

## 2. El agotamiento del petróleo

No es aventurado señalar, como lo vienen haciendo distintas voces desde hace ya algunas décadas, que nos acercamos rápidamente y de manera acelerada a lo que sin duda se puede calificar de crisis energética a escala planetaria, a cuyo origen contribuyen varios factores. En primer lugar, el agotamiento de los combustibles fósiles, entre los que se cuentan el petróleo, el carbón y el gas natural. Con un aumento continuo tanto de la población como del consumo por habitante de esos combustibles, nos hemos visto obligados a tomar conciencia de un hecho bien conocido pero que, sorprendentemente, nunca se ha considerado como un factor determinante en ninguno de los varios modelos de desarrollo económico que se han experimentado en el siglo XX, incluido el que domina actualmente: el planeta alberga una cantidad limitada de arqueocarbono, es decir, de carbono fósil procedente de los seres vivos que poblaron el planeta hace millones de años. Mientras sólo una muy pequeña parte de la población del planeta consumía energía fósil de manera poco intensiva, las reservas de esos combustibles parecían ciertamente ilimitadas. El enorme incremento en el consumo de esas energías primarias al que hemos asistido en las últimas décadas, propiciado por un desarrollo económico desigual pero continuo, nos sitúa en un escenario dominado una la escasez creciente de de los combustibles fósiles, y el consecuente e imparable incremento de precios. De esos tres vectores energéticos, es precisamente el petróleo el que se está agotando a mayor velocidad. Si el consumo de petróleo no hace más que aumentar incesantemente, el descubrimiento de nuevas reservas no hace sino seguir la tendencia opuesta. En la Figura 8 se muestra la evolución de ambos, reservas y producción, a lo largo del tiempo (4).

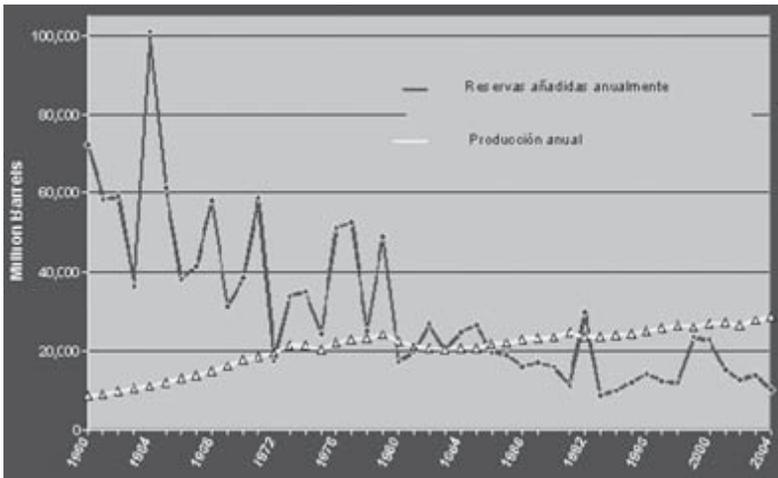


FIGURA 8. Reservas y producción de petróleo a escala mundial (4).

Se observa en la figura que la evolución opuesta de ambas produjo en los años ochenta un cruce de ambas curvas, de tal manera que a partir de entonces, la producción es muy superior a las nuevas reservas de crudo descubiertas anualmente. En esta situación, los expertos pronostican que alcanzaremos un cenit en la extracción de crudo, lo que se denomina «peak-oil» (5). A partir de ese momento, asistiremos a una irreversible y continua disminución en la producción de petróleo, y en consecuencia a su encarecimiento. Las previsiones en cuanto a la fecha en la que alcanzaremos el «peak-oil» dependen del escenario de crecimiento de la demanda. Para los expertos de la Agencia Internacional de la Energía, el cenit de la extracción de crudo podría situarse entre el 2018 y el 2027, aunque otros expertos anticipan esa fecha para los primeros años de la próxima década. En el último trimestre del año 2005, el consumo fue de  $86,1 \times 10^6$  barriles de petróleo por día (bpd), unos  $31 \times 10^9$  barriles anuales, mientras que las reservas estimadas se sitúan en  $1.200 \times 10^9$  de barriles, a los que se añaden entre  $10 \times 10^9$  y  $20 \times 10^9$  barriles por año de las nuevas reservas descubiertas. Además, es necesario tener en cuenta el fuerte ritmo de crecimiento de las economías china e india, que sin duda van a conducir a consumos reales de petróleo superiores a los previstos en la mayoría de los escenarios.

A las reservas de petróleo estimadas habría que añadir las reservas no convencionales, tales como petróleos extra-pesados, arenas asfálticas y bituminosas, arcillas ricas en materia orgánica, cuya extracción requiere el empleo de tecnologías de extracción avanzadas, y se realizará en todo caso a un coste muy superior al de extracción de las reservas convencionales.

El gas natural aparece como la segunda fuente de carbono fósil de importancia, por delante del carbón, y con una marcada tendencia a incrementar su consumo en todo el mundo. La producción mundial actual de gas natural se estima en alrededor de  $95 \times 10^{12}$  pies cúbicos por año, mientras que las reservas se estiman en unos  $6.500 \times 10^{12}$  pies cúbicos., equivalentes a unos  $1.400 \times 10^9$  barriles de petróleo, una cifra ligeramente superior al total de reservas de petróleo probadas actualmente. Al ritmo de consumo actual de gas natural, las reservas probadas se acabarían antes de un siglo. Aunque se está registrando un fuerte incremento del consumo de gas natural en todo el mundo, el descubrimiento de nuevas reservas puede compensar en parte esta tendencia, y podríamos decir que la disponibilidad de gas natural en las próximas décadas va a ser superior a la del petróleo.

### 3. Emisiones de gases de efecto invernadero

El progresivo agotamiento de las fuentes de carbono fósil, sobre las que se sustenta nuestro modelo de civilización, es uno de los factores desencadenante de la crisis energética a cuyas puertas nos encontramos. No es, sin embargo, el único. El segundo factor determinante de esta situación es la emisión de gases

de efecto invernadero. Se ha constatado a lo largo del siglo XX un incremento de la temperatura media del planeta de unos  $0,6^{\circ}$  C. Aunque aún existe un debate científico acerca de este fenómeno, hay no obstante un amplio consenso sobre las causas del calentamiento global, que lo atribuye a las emisiones masivas a la atmósfera de los denominados *gases de efecto invernadero* (GEI) producidos por la actividad humana. En este punto es necesario señalar que este efecto, al que contribuyen mayoritariamente el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua presentes en la atmósfera terrestre, hace posible que la temperatura media de la superficie del planeta sea adecuada para el mantenimiento de la Vida. En efecto, los gases presentes en la atmósfera son transparentes a la radiación solar incidente en las regiones visible e infrarroja cercana, que representan la mayor de la energía del espectro solar. Esa radiación por lo tanto penetra en el aire y calienta la superficie terrestre. Sin embargo, la radiación infrarroja emitida por la superficie del planeta tiene una longitud de onda más larga, y esos gases de efecto invernadero absorben justamente esa radiación infrarroja de onda larga, con lo que se calientan y mantienen las capas bajas de la atmósfera y el suelo a una temperatura moderada.

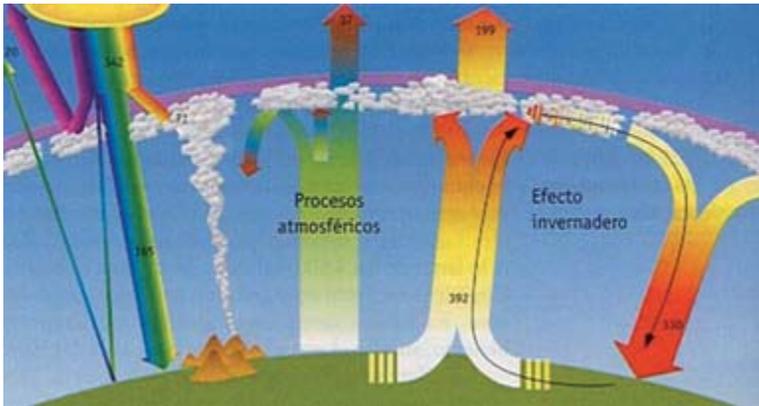


FIGURA 9. Descripción del «efecto invernadero» (6).

La concentración de esos gases en la atmósfera ha variado notablemente desde la formación del planeta, disminuyendo marcadamente la concentración de  $\text{CO}_2$ , de tal manera que la temperatura media se estima que ha variado desde unos  $28^{\circ}$  C en los inicios del Arcaico, hasta los  $15^{\circ}$  C actuales. Aunque a escalas geológicas la concentración de  $\text{CO}_2$  ha disminuido, se puede asegurar que en tiempos históricos anteriores a la Revolución Industrial permaneció constante en torno a 275 ppm, aumentando de manera continuada desde entonces por efecto de la actividad humana (Figuras 10 y 11).

Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los hidrofluorocarbonos (HFC), los

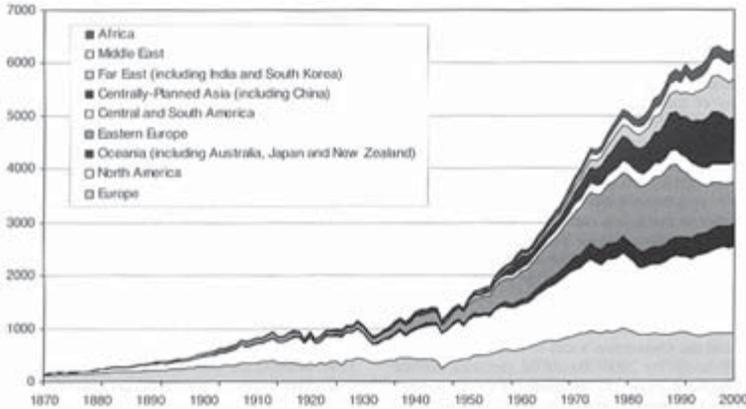


FIGURA 10. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles con el tiempo, en millones de toneladas equivalentes de carbón (2).

perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). No se considera la influencia del agua, ya que su concentración promedio permanece aproximadamente constante. La contribución relativa de cada uno de esos compuestos químicos no es la misma, y se mide con un parámetro denominado *potencial de calentamiento global*. El valor de este parámetro es de 1 para el CO<sub>2</sub>, 11 para el CH<sub>4</sub>, 270 para el N<sub>2</sub>O, y superior a 3.000 para los hidrocarburos perfluorados (7). Es decir, para igual concentración de CO<sub>2</sub> y de N<sub>2</sub>O, éste último contribuye 270 veces más que el primero al calentamiento global. Por lo tanto, el efecto de cada gas es función de su potencial de calentamiento y de su concentración en la atmósfera, y el producto de ambos factores convierte al CO<sub>2</sub> en el mayor contribuidor al calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero (Figura 11), con aproximadamente un 70%.

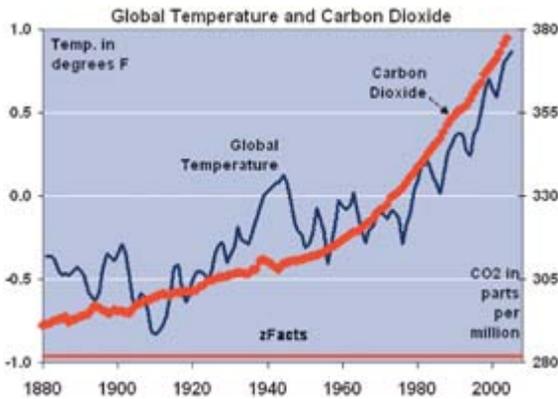


FIGURA 11. Variación de la temperatura global y de la Concentración de CO<sub>2</sub> en el aire en los últimos 100 años.

La Figura 12 recoge la contribución de cada uno de ellos, y muestra en particular que las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de los combustibles fósiles representan aproximadamente sólo el 60% del total, destacando las emisiones de este gas debidas a las actividades relacionadas con la deforestación, y las de N<sub>2</sub>O y metano provenientes de prácticas agrícolas, cuya suma es del 25% del total, es decir, casi la mitad del CO<sub>2</sub> emitido de origen fósil.

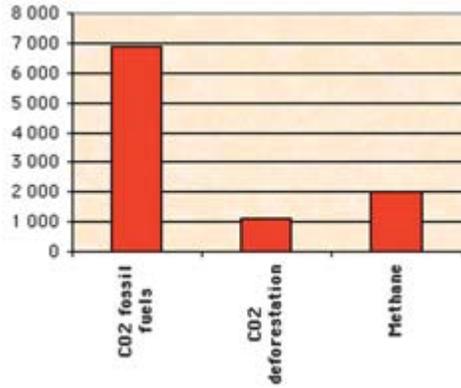


FIGURA 12. Distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2000 a escala mundial, en millones de toneladas equivalentes de carbón (2).

La Figura 13 compara las emisiones de gases de efecto invernadero por países, en la que se observa que EE.UU., Rusia y China son responsables de la

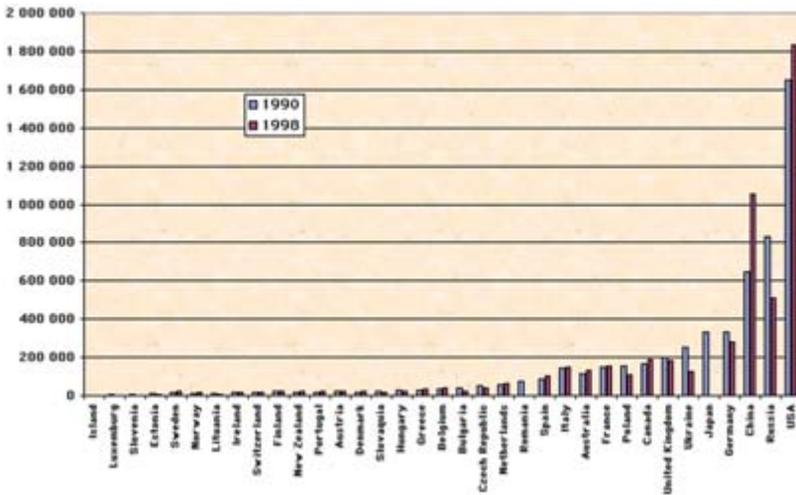


FIGURA 13. Emisiones de gases de efecto invernadero de distintos países (2), en miles de toneladas equivalentes de carbón. Las emisiones de China corresponden sólo a CO<sub>2</sub>.

mayoría de ellas. Por otra parte, las emisiones por habitante varían considerablemente de un país a otro, y no sólo debido a diferencias en renta per cápita (Figura 14). Dentro del grupo de países más desarrollados, las diferencias pueden llegar a ser de 1 a 3.

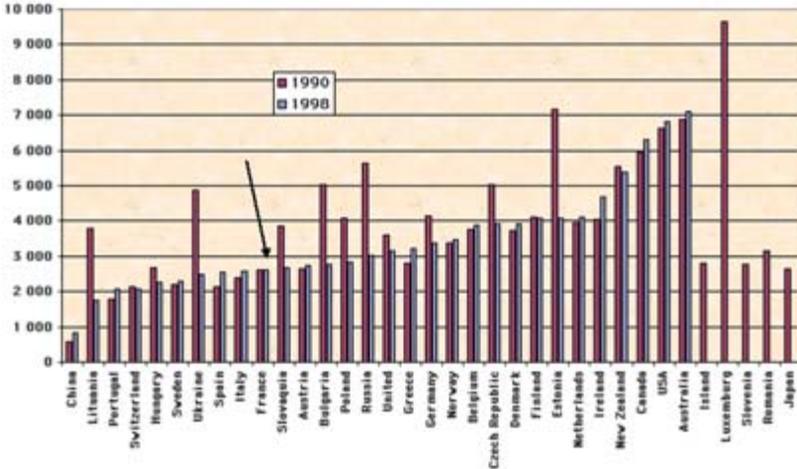


FIGURA 14. Emisiones de gases de efecto invernadero por persona y año, en kg de carbón equivalente (2).

¿Cuál es la contribución relativa a nivel mundial de los distintos sectores de actividad a las emisiones de gases de efecto invernadero? Según se muestra en la Figura 15, un tercio aproximadamente de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de las plantas generadoras de electricidad, y un 25% del transporte. Destacan también las refinerías, que consumen en los procesos de refinación alrededor del 8% del petróleo bruto que procesan.

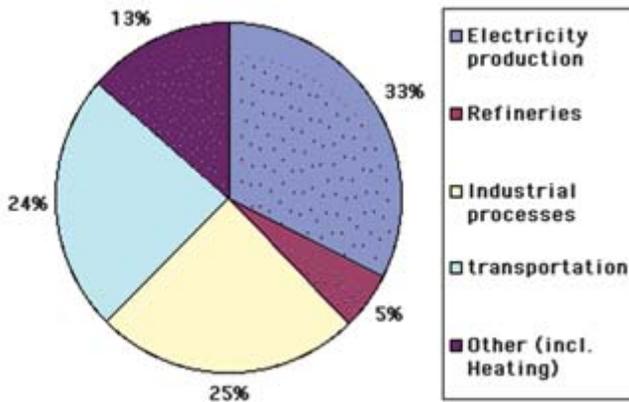


FIGURA 15. Distribución por actividad de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo en 1999 (2).

Si tenemos en cuenta las emisiones de todos los gases que contribuyen al calentamiento por «efecto invernadero» en un país desarrollado como Francia, que obtiene la mayor parte de su electricidad mediante generación nuclear, el panorama es diferente. La Figura 16 muestra que entonces la mayor contribución proviene de las actividades agrícolas, con aproximadamente un 25% del total, debido a la emisión de CH<sub>4</sub> de la ganadería, y de N<sub>2</sub>O de los fertilizantes agrícolas. Ambos representan en Francia entre un 25% y un 30% del total de gases emitidos. En ese país, el transporte por carretera contribuye con un 22% al total de emisiones.

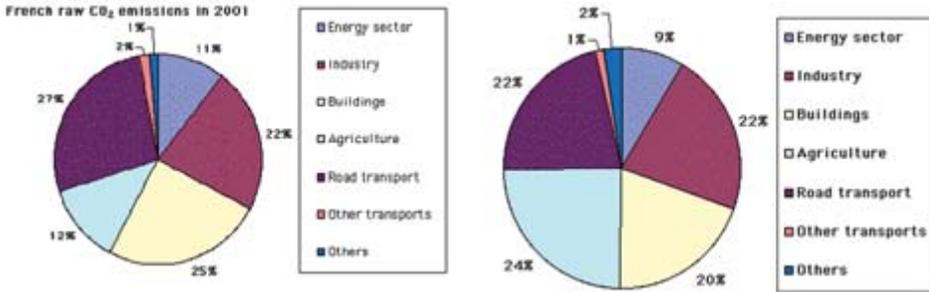


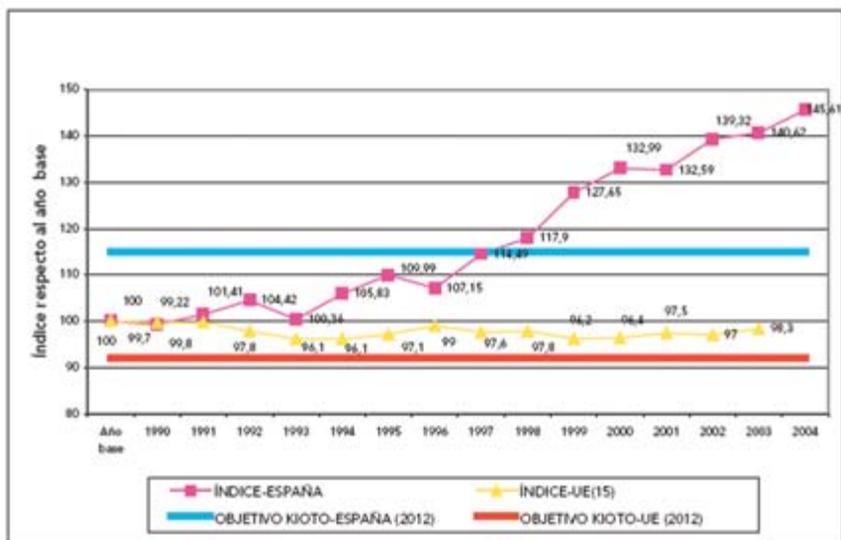
FIGURA 16. *Izquierda: Distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Francia en 2001 por sectores de actividad. Derecha: Distribución de las emisiones de todos los gases de efecto invernadero en Francia en 2001 por sectores de actividad (2).*

El examen del caso francés es de interés, ya que nos sitúa en un escenario que sería similar al del resto de países de la UE, incluida España, si obtuviesen su energía eléctrica de fuentes distintas al de los combustibles fósiles, como ocurre en Francia. En este caso, el sector agropecuario aparece como el principal responsable de las emisiones, una conclusión que también sería válida, dentro de ciertos rangos, para la mayoría de países que cumplan con esa condición. Como se verá más adelante, si unimos a la contribución de esos dos gases la del CO<sub>2</sub> proveniente de la deforestación, que avanza a pasos agigantados en la mayoría de los países en vías de desarrollo situados en las regiones ecuatoriales y tropicales del planeta, las más ricas en biomasa, entonces disponemos de un panorama mucho más realista para evaluar las propuestas de uso masivo de biocarburantes, es decir, de combustibles obtenidos a partir de plantas cultivadas, como el bioetanol o el biodiésel, tal y como se discutirá más adelante.

El reconocimiento de la alteración climática que la inyección masiva de estos gases en la atmósfera puede provocar a corto y medio plazo, ha llevado al lanzamiento de distintas iniciativas intergubernamentales, la última de las cuales es la conocida como Protocolo de Kioto, un acuerdo multinacional firmado por la mayoría de los países del planeta en 1997, entre los que no se encontraba EE.UU., y que entró en vigor en el año 2005. Este acuerdo establece una reducción de las emisiones mundiales de GEI para el año 2012 del 5,1%, con relación a los niveles

de 1990. El Protocolo de Kioto establece diferencias del porcentaje de emisiones de GEI entre distintos países, y en el caso de España autoriza un aumento del 15% de las emisiones, mientras que para el conjunto de la UE-15 fija una disminución del 8% de las emisiones globales.

¿Hasta qué punto los países signatarios del protocolo se han atenido a los objetivos del mismo? La Figura 17 presenta la evolución de las emisiones de GEI de España y de la UE-15. Hasta el año 2003, España había aumentado sus emisiones un 40,6%, y en el 2004 alcanzó ya el 46%, es decir, casi el triple de lo acordado en Kioto. Ha aumentado la emisión de todos los gases, excepto las de PFC, en porcentajes distintos según el tipo de GEI. Las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron un 45,3%, debido sobre todo a las actividades de producción de energía (su contribución al total de emisiones de este gas es del 31,7%) y el transporte por carretera (que contribuye con un 26,3% al total de emisiones). Los mayores incrementos se han producido en el transporte por carretera (73%), y en las plantas de combustión industrial (51%). Las emisiones de metano crecieron el 28,9%, cuyas emisiones provienen en un 63% de las actividades agrícolas, y el 37% restante del tratamiento y eliminación de residuos. Las emisiones de N<sub>2</sub>O, el 60% de las cuales provienen de la agricultura, debido a la aplicación de fertilizantes en los suelos agrícolas, crecieron un 14,9%, aunque el mayor incremento lo experimentó el sector del transporte, un 229%. Las emisiones de HFC y SF<sub>6</sub> se han disparado experimentando incrementos del 315% y 179%, respectivamente, en comparación con el año de referencia de 1995 para estos gases.



Nota: El año base se compone de las emisiones de 1990 de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, y las emisiones de 1995 de PFC, HFC y SF<sub>6</sub>.

FIGURA 17. Evolución de las emisiones de GEI en España y en la UE-15 (3).

## FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVAS

La amenaza de un cambio climático brusco en el planeta provocado por las emisiones masivas de gases de efecto invernadero, y las previsiones de agotamiento de los combustibles fósiles, sobre todo del petróleo, condicionan las políticas energéticas a escala planetaria. Como se acaba de exponer, la mayoría de los combustibles fósiles se utilizan para la generación de energía eléctrica y para el transporte. La sustitución de fuentes de carbono fósil por otras fuentes de energía primaria en la producción de energía eléctrica, reduce sin duda las emisiones de CO<sub>2</sub>, y contribuye por lo tanto a mitigar el calentamiento global. Por este motivo, asistimos a un gran desarrollo de energías alternativas o emergentes para la generación de electricidad. Una buena parte de ellas corresponden a lo que se denomina energías renovables, en particular la energía eólica, solar y la derivada de la biomasa. En nuestro país, el Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER) prevé que en el año 2010 las energías renovables deben suministrar el 12% de la energía primaria, el 29,4% de la producción eléctrica, y el 5,75% de la energía empleada en el transporte (Tabla 3). Si se comparan estas previsiones con los datos recogidos en la Tabla 2, ello supondría triplicar la contribución de estas energías al consumo final de energía en el plazo de seis años.

TABLA 3. *Previsiones respecto a las energías renovables contempladas en el PER*

Tipo de energía	Potencia instalada (MW)		Energía generada 2004 (GWH)
	2004	2010	
Gran hidráulica	2.897	3.257	5.794
Mínihidráulica	1.749	2.199	5.421
Biomasa	344	2.039	2.193
Eólica	8.155	20.155	19.571
Sola fotovoltaica	37	400	56
Solar termoeléctrica	–	500	–
Biogás	141	235	825
Biocarburantes *	–	–	–

El PER prevé que los biocarburantes deben suponer en el año 2010 el 5,75% del total de carburantes de automoción.

La Tabla 3 indica que se apuesta decididamente por la energía eólica como la principal suministradora de electricidad en lo que respecta a energías renovables. Cabe destacar también el bajo cociente entre energía producida y energía instalada de todos los sistemas de producción de energía que no hacen uso de la combustión, debido al reducido número de horas/año de funcionamiento. Se

estima que un parque eólico medio funciona un número de horas al año que es la tercera parte del tiempo de funcionamiento de una central nuclear.

Si bien se están produciendo avances significativos en la implementación de energías renovables para cubrir las necesidades energéticas del país en lo que se refiere esencialmente a la producción de energía eléctrica, es necesario abordar de manera específica las necesidades energéticas del sector del transporte, que en su mayoría depende casi exclusivamente del petróleo. Las previsiones que anuncian que alcanzaremos en un plazo no superior a 20 años el cénit en la producción de petróleo, aconsejan buscar alternativas urgentes con el fin de asegurar las necesidades del transporte. Por otra parte, la contribución del transporte al total de emisiones de CO<sub>2</sub>, con aproximadamente un 25% del total, aconseja también la sustitución de los combustibles tradicionales por otros sistemas y/o productos que eliminen totalmente o al menos mitiguen esas emisiones. Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurre con los sistemas de generación de energía eléctrica a gran escala, no se han encontrado todavía fuentes de energía primaria distintas a los combustibles basados en compuestos de carbono que proporcionen la alta densidad de energía y la autonomía que necesita un vehículo de transporte por carretera. Las soluciones propuestas consisten básicamente en el empleo de vehículos de motor eléctrico que usan como fuente de energía baterías eléctricas, o que emplean hidrógeno almacenado en depósitos en el propio vehículo, para generar energía eléctrica mediante un dispositivo que se conoce como pila de combustible. El problema de ambas alternativas es que se necesitan fuentes de energía primaria para obtener tanto la energía eléctrica almacenada en la batería, como el hidrógeno consumido en la pila de combustible, ya que no existen en la Tierra fuentes naturales de este elemento químico altamente reactivo.

La mayoría de los expertos están de acuerdo en que la estrategia más adecuada para hacer frente tanto a la cercana escasez de combustibles fósiles como al calentamiento global del planeta derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo en cuenta la naturaleza de los sistemas de producción, transporte y consumo de energía actuales, consiste en una diversificación de las fuentes de energía primaria, reduciendo progresivamente el empleo de fuentes de carbono fósil en la producción de electricidad, hasta llegar a abandonar completamente su uso en este sector, y en el empleo de combustibles alternativos que, aún basándose en compuestos de carbono, no dependan del petróleo.

## COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

### 1. Combustibles derivados del petróleo

Los carburantes consumidos en los distintos medios de transporte poseen características específicas para cada uno de ellos, y todos se producen en las refi-

nerías, en las que se transforma el petróleo crudo en productos aptos para el consumo (Figura 18). El propósito del refino del petróleo es por lo tanto la producción de combustibles, lubricantes y productos básicos para la industria petroquímica a partir del crudo. Para ello se emplean procesos de naturaleza física (destilaciones, extracciones y separaciones) y procesos de transformación química. Estos últimos son una consecuencia de que la demanda del mercado no puede satisfacerse sólo con los productos que provienen de la destilación.

En la Figura 19 se representa los distintos productos obtenidos a partir de un barril de petróleo crudo mediante los procesos que tiene lugar en las refinarias. La mayoría de ellos corresponde a carburantes para distintos vehículos de transporte, desde automóviles hasta aviación, entre los que destaca la gasolina, que representa aproximadamente el 50% del barril. Una pequeña parte son productos pesados como asfaltos, parafinas de alto peso molecular, y coque, residuos carbonosos con muy baja relación atómica H/C. Los productos ligeros son los constituidos por la gasolina para automóviles, y los gases licuados del petróleo (LPG, en inglés); los productos intermedios son queroseno, carburante para aviación y diésel, gasóleo de calefacción, y los productos pesados corresponden a asfaltos, parafinas y coque. Además, se obtienen productos como olefinas ligeras, etileno y propileno, que sirven como materia prima para la industria petroquímica en la producción de polímeros.

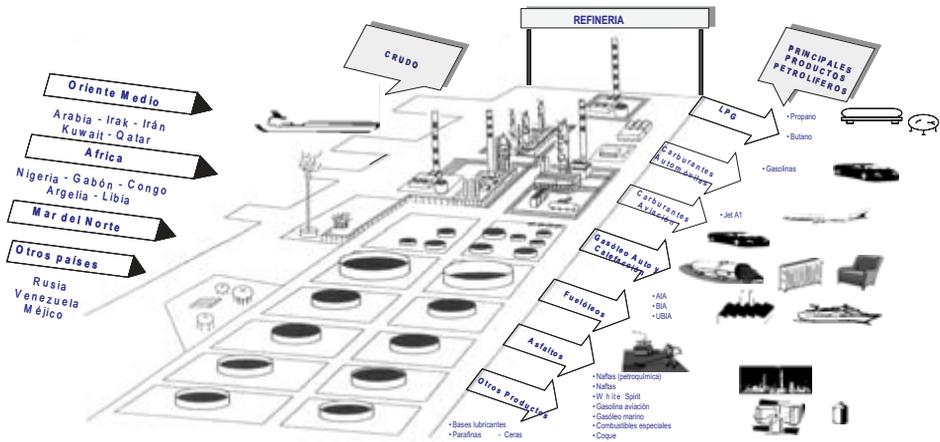


FIGURA 18. Esquema de una refinería (8).

La estructura de la demanda mundial de distintos productos petrolíferos experimenta cambios notables con el tiempo, como lo refleja la Figura 20, en la que se observa la demanda creciente de productos ligeros e intermedios, en detrimento de los pesados.

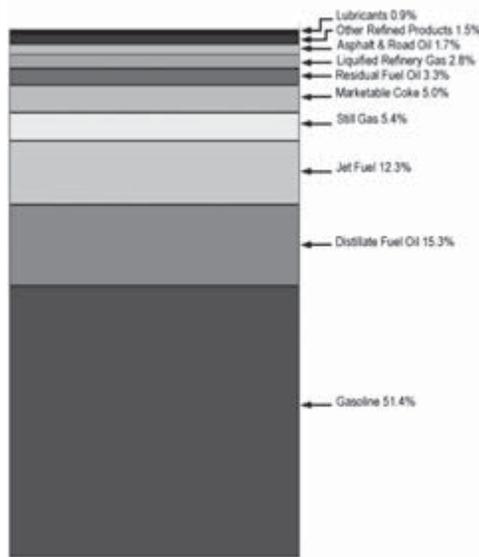


FIGURA 19. Distribución de productos obtenidos a partir de un barril de petróleo en California (EE.UU).

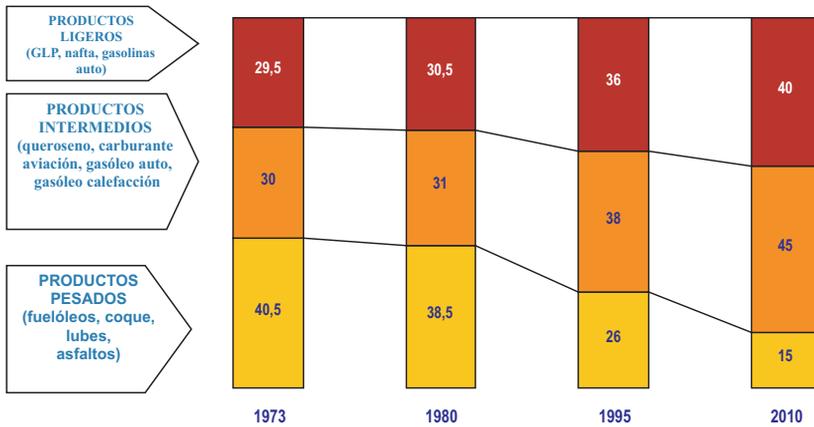


FIGURA 20. Estructura de la demanda mundial de productos petrolíferos (%) (8).

La combustión de los carburantes en los motores de combustión interna no sólo genera CO<sub>2</sub>, sino también produce emisiones de CO e hidrocarburos, resultantes de una combustión incompleta, óxidos de nitrógeno, partículas pequeñas, sobre todo en los motores diésel, y compuestos de azufre. Se han implementado a lo largo del tiempo diversas medidas con el fin de reducir las

emisiones de contaminantes de los vehículos de combustión interna, en dos vertientes. Por una parte, mejorando la eficiencia de los motores, lo que ha conlleva también un ahorro de combustible, y por otra empleando combustibles de mejor calidad, que en general contienen cada vez menos azufre y compuestos aromáticos, sobre todo benceno, Tablas 4 y 5.

TABLA 4. *Calidad de la gasolina en la Unión Europea (8)*

GASOLINA	1996	2000	2005	2009
Azufre	500 ppm	150 ppm	50 ppm*	10 ppm
Benceno	5%	1% máx.	1% máx.	**
Aromáticos	-	42% máx.	35% máx.	**
Olefinas	-	18%	18% máx.	**
Oxigenados	2,5-3,7 máx.	2,7 máx.	-	-
RON/MON	95/85	95/85	95/85	
RVP, kPa	70 máx.	60 máx.		**
E100° C, %	40 mín.	46 mín.		**
E150° C, %		75 mín.		**

TABLA 5. *Calidad del Diésel en la Unión Europea (8)*

DIÉSEL	1996	2000	2005	2009
Azufre	500 ppm	350 ppm	50 ppm*	10 ppm
Cetano	49	51	51	**
Poliaromáticos	-	11% máx.	11% máx.	**
Densidad	860 kg/m <sup>3</sup>	845 kg/m <sup>3</sup>	45 kg/m <sup>3</sup>	**

## 2. Obtención de combustibles sintéticos a partir de vectores energéticos químicos basados en el carbono

La sustitución de los combustibles actuales utilizados en el sector del transporte, manteniendo al mismo tiempo el empleo de motores de combustión interna, requiere la síntesis de distintos tipos de hidrocarburos cuyas características necesariamente tienen que ser similares a las de los combustibles consumidos actualmente en cada subsector del transporte producidos en las refinerías, igualando al mismo tiempo, si no incluso mejorando, su calidad desde el punto

de vista medioambiental. Además, los nuevos combustibles deberían tener un coste bajo.

El esquema de la Figura 21 recoge de manera general las distintas alternativas que se han propuesto para obtener combustibles basados en carbono a partir de fuentes primarias distintas al petróleo.

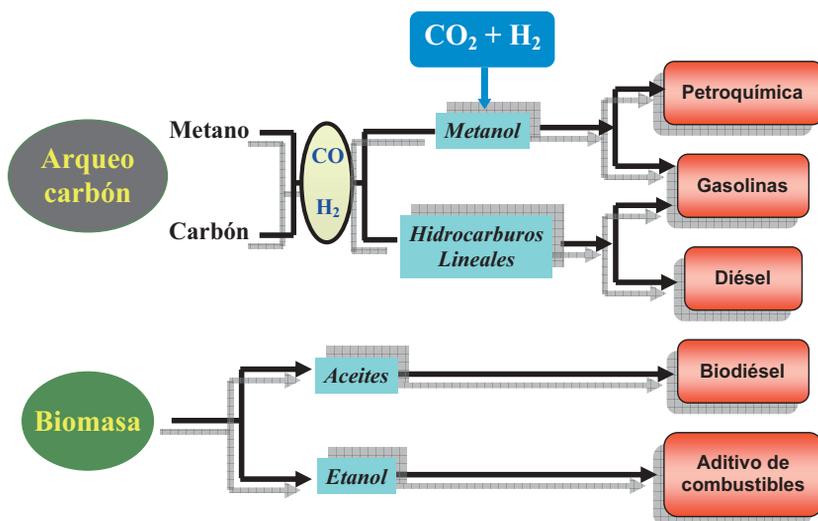


FIGURA 21. Producción de combustibles líquidos a partir de fuentes distintas del petróleo.

Dos de las rutas requieren el empleo de fuentes de carbono fósil, el gas natural y el carbón; y las otras dos emplean las fuentes de carbono existentes actualmente en la biosfera, una de ellas utiliza el carbono fijado en la biomasa, y la otra parte del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Las dos primeras suponen continuar con las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, pero emplean tecnologías relativamente bien conocidas que pueden implementarse de manera masiva en poco tiempo, y además tienen un rendimiento energético positivo, es decir, el combustible final produce más energía que la utilizada en su elaboración industrial, por lo que podemos considerarlas como fuentes de energía primaria.

La ruta de transformación de gas natural, que en su mayor parte es metano, en hidrocarburos más pesados incluida en la Figura 21 es indirecta. No obstante, también se han investigado distintos procesos para la conversión directa del gas natural en compuestos orgánicos de mayor valor añadido, tales como su oxidación parcial a metanol o formaldehído, su aromatización a benceno, y la pirólisis a alta temperatura, entre otras. Sin embargo, los rendimientos en todos estos procesos son muy bajos, por lo que ninguna de ellos resulta de momento viable desde un punto de vista industrial.

### 3. Combustibles a partir de gas natural y carbón. El proceso Fischer-Tropsch

La transformación tanto de gas natural como de carbón en combustibles líquidos requiere una etapa intermedia en la que ambos se hacen reaccionar con vapor de agua a alta temperatura, un proceso que se conoce como reformado, para obtener una mezcla de CO e H<sub>2</sub> denominada gas de síntesis. Este gas de síntesis se puede transformar en hidrocarburos líquidos a través de dos rutas alternativas. Una de ellas es la conocida como síntesis Fischer-Tropsch, en la que el gas de síntesis se hace reaccionar a presiones y temperaturas elevadas en presencia de un catalizador sólido, constituidos por metales de transición del grupo VIII, generalmente Fe o Co. La síntesis de Fischer-Tropsch es una reacción de hidrogenación catalítica de CO muy exotérmica, en la que se obtienen hidrocarburos lineales en un rango amplio de pesos moleculares, que en su mayor parte son n-parafinas y  $\alpha$ -olefinas, pequeñas cantidades de alcoholes lineales primarios de cadena corta y otros compuestos oxigenados como subproductos, además de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Paul Sabatier y Senderens descubrieron en 1902 que era posible obtener metano a partir de una mezcla de CO e H<sub>2</sub>, pero fueron el químico alemán Franz Fischer y el ingeniero industrial Hans Tropsch quienes descubrieron en 1922 el proceso que lleva el nombre de ambos (9). Este proceso se ha utilizado históricamente para obtener combustibles líquidos a partir de



FIGURA 22. Fotografía de Fischer en su laboratorio en 1918.

carbón en países que por distintas razones no tenían suministro de petróleo, como el caso de Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, o la República de Sudáfrica en tiempos del régimen racista que estableció el «apartheid». En este último país, aún se sigue empleando el proceso para obtener combustibles en las plantas industriales del complejo SASOL.

El proceso Fischer-Tropsch da lugar a una mezcla de hidrocarburos lineales saturados que tienen en su mayoría entre 2 y 35 átomos de carbono (Figura 23). Estos hidrocarburos lineales tienen un octanaje muy pequeño, por lo que hay que transformarlos en hidrocarburos ramificados mediante procesos de isomerización. Finalmente, se obtienen combustibles de muy buena calidad análogos a los producidos en las refinerías, pero sin apenas azufre y, en el caso del diésel, con un buen índice de cetano.

Cuando se emplea gas natural como materia prima, el conjunto del proceso se conoce como tecnología GTL (Gas-To-Liquids). Dada la relativa abundancia de gas natural y las redes de transporte y distribución existentes, su tecnología de extracción y su menor contenido de azufre, se le prefiere antes que al carbón como materia prima.

### *Aspectos químicos de la síntesis Fischer-Tropsch*

La reacción de Fischer-Tropsch es muy compleja, habiéndose propuesto varios modelos para explicar su mecanismo. La mayoría de los autores proponen tres etapas que describen de manera general el proceso de formación de los hidrocarburos:

1. **Iniciación.** En esta etapa el  $H_2$  y el  $CO$  se adsorben disociativamente sobre los átomos metálicos presentes en el catalizador.
2. **Propagación.** Se forman especies  $CH_2$  adsorbidas sobre los centros activos del catalizador. Estas unidades inician un proceso de polimerización, en el que se van añadiendo consecutivamente nuevas unidades  $CH_2$ . Esas cadenas en crecimiento permanecen aún adsorbidas, y este proceso explica la formación de hidrocarburos lineales.
3. **Terminación.** En esta etapa las cadenas se desorben del centro activo, y en función del mecanismo a través del cual se desorben se forman hidrocarburos saturados,  $\alpha$ -olefinas o productos oxigenados.

De acuerdo con ese mecanismo general, el peso molecular promedio de los productos formados dependerá de la velocidad relativa de los procesos de polimerización y de desorción. Ello se expresa mediante el parámetro  $\alpha$ , denominado probabilidad de crecimiento de la cadena, cuyo valor está comprendido entre 0 y 1. En la Figura 23 se observa cómo aumenta la proporción de hidrocarburos de alto peso molecular a medida que lo hace el valor de  $\alpha$ .

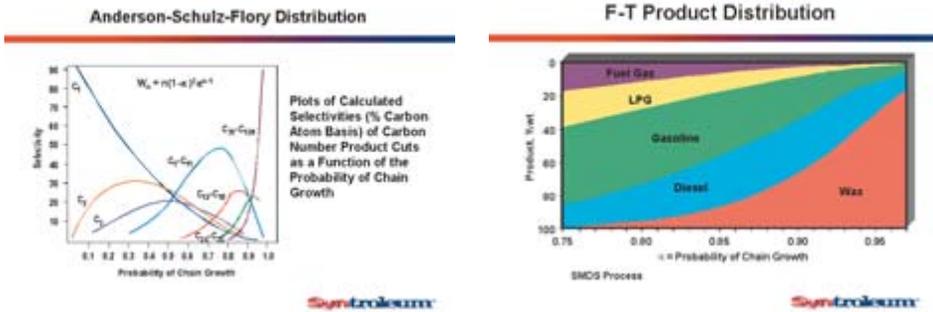


FIGURA 23. Distribución de productos en la síntesis Fischer-Tropsch.

Como se ha dicho anteriormente, el proceso de Fischer-Tropsch requiere la utilización de catalizadores metálicos, y en función de la naturaleza de estos catalizadores y de las condiciones de operación, varía la selectividad a los distintos productos de reacción. Los metales más activos son el Ni, Fe, Co y Ru, todos ellos del Grupo VIII de la Tabla Periódica, pero solamente el Fe y el Co tienen interés industrial, ya que el Ni forma mucho metano, y el Ru es excesivamente costoso.

Los catalizadores de hierro se emplean generalmente en forma másica, y además contienen una cierta cantidad de elementos alcalinos que actúan como promotores. Según el tipo de promotor, los catalizadores son más selectivos a olefinas o a ceras. Además, los promotores aumentan la estabilidad del catalizador, es decir, su resistencia a la desactivación o pérdida de actividad con el tiempo de uso.

Los catalizadores de cobalto se emplean generalmente soportados sobre óxidos refractarios de elevada área superficial, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{TiO}_2$  con el objeto de aumentar la dispersión del metal sobre la superficie del óxido. En esas condiciones, el metal se encuentra formando pequeñas partículas, que ofrecen una elevada superficie de contacto entre el metal y los gases que van a reaccionar sobre ella, el CO y el  $\text{H}_2$ . La superficie de esas pequeñas partículas soportadas o dispersas sobre el óxido refractario es muy superior a la del metal no soportado por gramo de metal, con lo que hay que emplear menos peso de metal para tener la misma superficie, un aspecto muy importante dado que el precio del cobalto es muy superior al del hierro. El contenido de cobalto de esos catalizadores varía generalmente entre el 10% y el 25% en peso, y su comportamiento catalítico está fuertemente condicionado por el tipo de soporte utilizado, el método de preparación del catalizador, o los promotores añadidos.

#### 4. Obtención de gasolina a partir de metanol

La segunda ruta de conversión del gas de síntesis en combustibles requiere su conversión inicial en metanol, empleando condiciones de reacción y catalizadores diferentes a los utilizados en la síntesis Fischer-Tropsch. El metanol es un compuesto químico intermedio muy valioso, que puede intervenir en distintos procesos de importancia en el sector de los combustibles sintéticos. En el esquema de la Figura 24 se presentan las dos rutas básicas de transformación del metanol en hidrocarburos.

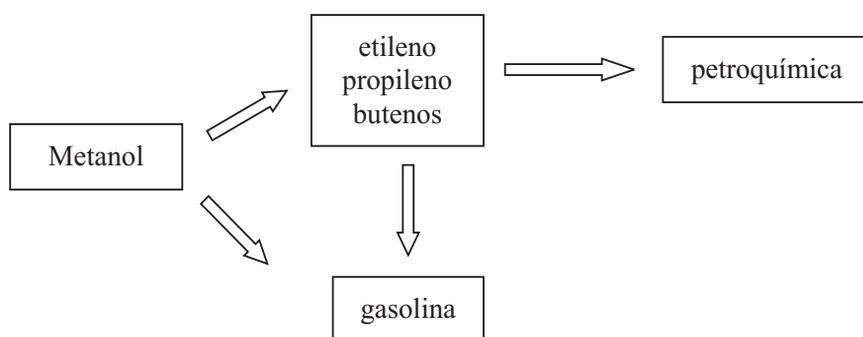


FIGURA 24. Rutas de obtención de gasolina y olefinas a partir de metanol.

En primer lugar, puede transformarse en gasolinas mediante el proceso MTG (Metanol-To-Gasoline) desarrollado por la compañía norteamericana Mobil Oil en los años ochenta. La primera planta comercial de conversión de gas natural en gasolina mediante el proceso MTG se puso en marcha en Nueva Zelanda en 1985. El proceso tiene lugar mediante la formación de olefinas ligeras como productos intermedios, que son transformadas *in situ* sobre el catalizador en los correspondientes hidrocarburos. Cuando la conversión es alta, cercana al 100%, se obtiene en general una mezcla de hidrocarburos parafínicos y aromáticos, en la que los hidrocarburos con un número de átomos de carbono de 5 o mayor, es decir, en el rango de la gasolina, y los compuestos aromáticos suman al menos un 80% del total de productos obtenidos.

La naturaleza de los productos obtenidos en el proceso MTG es muy dependiente de las condiciones específicas de operación, en particular de la temperatura y de la presión, así como del catalizador utilizado. En el proceso convencional, la presión a la que operan los reactores está comprendida en el rango 10-25 atm, y la temperatura dentro del rango 350° C-400° C. Sin embargo, empleando catalizadores y condiciones de reacción adecuadas, se pueden obtener como productos mayoritarios mezclas de etileno y propileno, que pueden servir como materias primas para procesos de petroquímica, en particular para la síntesis de polímeros.

Así pues, ajustando las condiciones de operación y los catalizadores, se pueden obtener hidrocarburos con propiedades muy similares a los que se obtienen en las refinerías a partir del crudo de petróleo.

### *Catalizadores del proceso MTG*

La transformación del metanol en hidrocarburos del tipo de los que constituyen la gasolina tiene lugar gracias al empleo de una variedad específica de un aluminosilicato cristalino sintético que pertenece a la familia de aluminosilicatos denominados zeolitas. Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos que poseen una estructura formada por la unión de tetraedros del tipo  $TO_4$ , en donde  $T = Si$  o  $Al$ , a través de los átomos de oxígeno de los vértices. La conexión de unos tetraedros con otros tiene lugar de tal manera, que en la estructura están presentes una serie de cavidades de tamaño molecular, en las que se alojan cationes y moléculas de agua. El tamaño de esas cavidades es función de la estructura cristalina de cada zeolita en particular, es específico para cada una de ellas, y está comprendido entre 3 y 10 Å para las estructuras conocidas actualmente, unas 170 (10). En la Figura 25 se muestra la estructura de la zeolita sintética faujasita, que es el componente principal de los catalizadores de craqueo catalítico utilizados en las refinerías para obtener gasolina a partir de gasoil de muy alto peso molecular, que es el residuo que queda después de destilar el crudo petrolífero a alta temperatura y presión reducida.

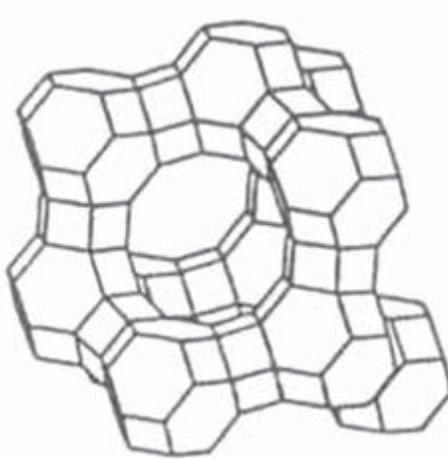


FIGURA 25. Estructura de la zeolita faujasita. En cada vértice se encuentra un átomo de Si o Al, conectados entre sí a través de un átomo de oxígeno (11).

La presencia de cationes en la estructura se debe a que la existencia de aluminio en la red genera un exceso de una carga negativa por cada átomo de aluminio,

que ha de ser compensada por la carga positiva del catión para mantener la neutralidad eléctrica del sistema. Estos cationes, que generalmente son iones  $\text{Na}^+$ , pueden en general intercambiarse por otros, como por ejemplo  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , lo que hace posible su empleo masivo en la industria de los detergentes, en la que han desplazado progresivamente a los polifosfatos como agentes secuestrantes de cationes alcalinotérreos destinados a disminuir la dureza del agua. La mayoría de los detergentes de uso doméstico contienen una zeolita sintética, la zeolita A, con esa finalidad. Por otra parte, el agua que se aloja en las cavidades puede eliminarse reversiblemente mediante calentamiento. Además, si se elimina el agua, las zeolitas pueden adsorber una gran cantidad de compuestos volátiles, con tal de que cumplan una única condición: deben tener un tamaño menor que las aperturas de tamaño molecular que dan acceso al interior de la estructura. Por este motivo, las zeolitas también son conocidas como tamices moleculares, ya que son capaces de adsorber selectivamente moléculas en función de su tamaño.

Si el catión que contiene inicialmente la zeolita se intercambia por un catión  $\text{H}^+$ , bien directamente o preferiblemente mediante intercambio con iones  $\text{NH}_4^+$  seguido de una calcinación a unos  $450^\circ\text{C}$  con el fin de descomponer este catión en  $\text{NH}_3$ , que se desprende, y dejar el protón en el sólido. De esta manera se obtienen zeolitas que tienen un carácter de ácido Brönsted, y son capaces de catalizar el mismo tipo de reacciones que los ácidos minerales en disolución, como el ácido sulfúrico. Pero, a diferencia de estos últimos, las zeolitas son capaces de llevar a cabo reacciones de catálisis ácida de manera muy selectiva, ya que las dimensiones del interior de las cavidades en las que tiene lugar la reacción catalítica, limitan el tamaño de los productos que pueden formarse. Esta propiedad se denomina selectividad de forma, y es la clave que permite la formación de productos en el rango de las gasolinas a partir de metanol. El catalizador que se emplea en el proceso es una zeolita denominada ZSM-5, que fue sintetizada por investigadores de la compañía norteamericana Mobil Oil en 1972, y cuya estructura se muestra en la Figura 26.

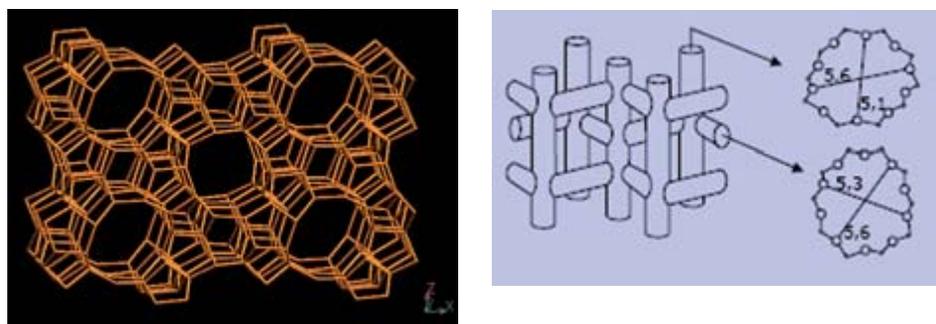


FIGURA 26. Estructura de la zeolita ZSM-5, en la que se muestra la configuración y tamaño de los dos sistemas de canales (11).

La zeolita ZSM-5 tiene dos conjuntos de canales que se cortan entre sí delimitados por anillos de 10 tetraedros. Su sección transversal, ligeramente elíptica, tiene un tamaño aproximado de 5,5 Å.

Los centros ácidos presentes en la zeolita son capaces de provocar una serie de reacciones consecutivas del metanol, tal y como se ilustra en la Figura 27.

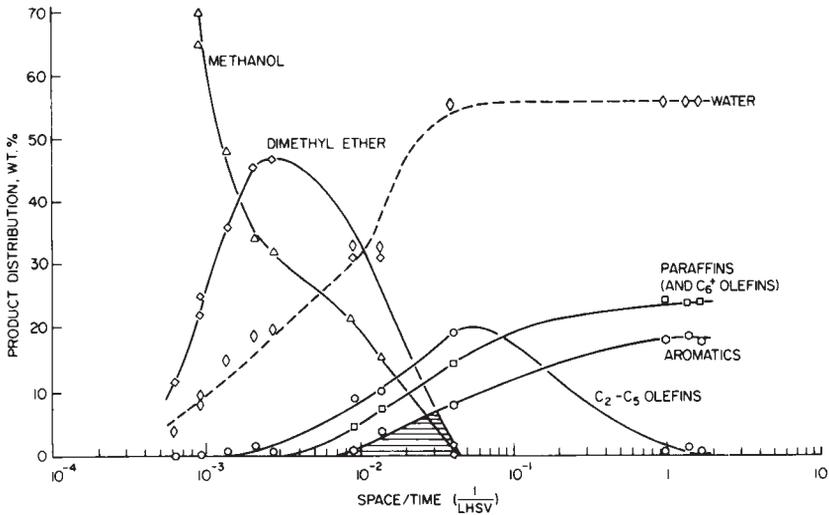


FIGURA 27. Distribución de productos obtenidos en la reacción de metanol sobre un catalizador ZSM-5 en función de la conversión.  $T = 375^{\circ} \text{C}$  (12).

En primer lugar, se forma dimetiléter, que se descompone *in situ* para dar olefinas, fundamentalmente etileno, que se transforma a continuación mediante un mecanismo complejo en parafinas e hidrocarburos aromáticos de mayor peso molecular. El tamaño relativamente pequeño de los canales de la zeolita limita el proceso de polimerización de las olefinas intermedias, que sólo llega hasta la formación de hidrocarburos del tipo gasolina e hidrocarburos con un número de átomos de carbono inferior a 11. Además, la existencia de los dos sistemas de canales facilita la desorción de los productos formados en su interior, y reduce marcadamente la deposición de productos de muy alto peso molecular que acabarían finalmente envenenando el catalizador. Otras zeolitas que tienen poros de mayor diámetro que los de la ZSM-5, como la mordenita o la ZSM-4, también catalizan la reacción del metanol para dar hidrocarburos, pero, debido a su tamaño de poro ( $\sim 6,5 \text{ \AA}$ ), superior al de la ZSM-5, conducen a la formación de hidrocarburos de alto peso molecular, y sufren una rápida desactivación (Figura 28).

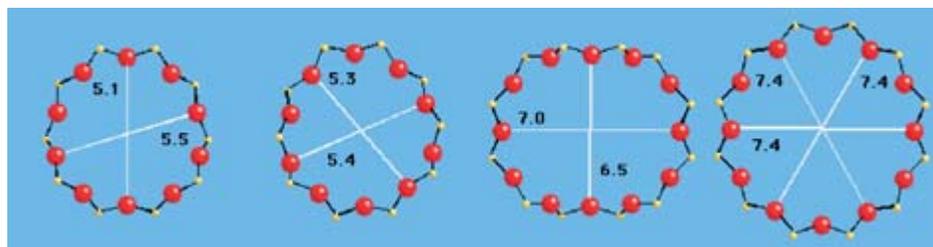
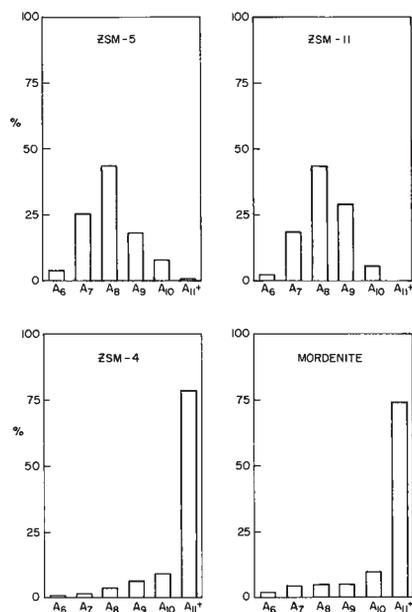
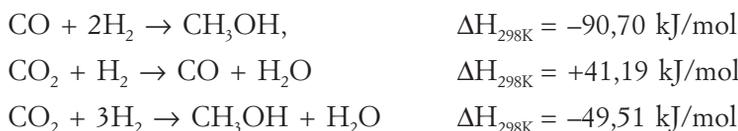


FIGURA 28. Distribución de productos aromáticos en la reacción de metanol sobre las zeolitas ZSM-5, ZSM-11, mordenita y ZSM-4, y su tamaño de poro (12).

## 5. Transformación del CO<sub>2</sub> en combustibles

La viabilidad técnica y comercial del proceso de obtención de gasolinas y olefinas ligeras a partir de metanol, hace posible pensar en el uso de CO<sub>2</sub> como fuente de metanol. En efecto, se conocen catalizadores capaces de catalizar la reacción entre el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> para dar CO y H<sub>2</sub>, cuya reacción posterior para dar metanol es un proceso industrial bien conocido, o bien dan lugar directamente a metanol (13):



La reacción entre el CO y el H<sub>2</sub> se lleva a cabo industrialmente a unos 250° C y alrededor de 5 MPa de presión. En el caso del CO<sub>2</sub>, en esas condiciones, la conversión de equilibrio del CO<sub>2</sub> sería de 27%, y la selectividad a metanol del 68%, con lo que hay que proceder al reciclado de la alimentación, tras separar los productos formados. Los catalizadores comerciales para la síntesis de metanol están basados generalmente en Cu/ZnO soportados sobre una matriz refractaria, generalmente alúmina.

Aunque el proceso de síntesis del metanol es exotérmico, hay que tener en cuenta que es necesario emplear energía para obtener hidrógeno a partir de la disociación electrolítica del agua, por lo que el balance total de energía es negativo, es decir, el proceso global de síntesis de metanol requiere más energía que la liberada por el metanol en su combustión, bien directa, o bien a través de su transformación en otros productos, como hidrocarburos. Además, hay que tener en cuenta que el dióxido de carbono provendría de los gases emitidos por centrales térmicas, o bien de la atmósfera, por lo que, sobre todo en el último caso, habría que realizar costosos procesos de separación para aumentar su concentración en esas mezclas gaseosas antes de proceder a su alimentación a los reactores catalíticos. Por lo tanto, podemos considerar el metanol obtenido mediante este proceso como un vector de transporte de energía, pero no como una fuente primaria de energía. La energía consumida en el proceso debe provenir de alguna otra fuente. Teniendo en cuenta esta condición, existe actualmente la tecnología básica para utilizar el carbono atmosférico como fuente tanto de combustibles líquidos como de distintos hidrocarburos demandados por la industria química.

## **6. La biomasa como fuente de energía. Biocombustibles: Bioetanol y biodiésel**

La necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del uso de combustibles fósiles, ha llevado a considerar el uso de la biomasa como fuente de energía primaria alternativa. Se denomina biomasa al conjunto de la masa o materia de origen biológico presente en la biosfera. A efectos prácticos, sólo se considera la biomasa de naturaleza vegetal como combustible. Desde el punto de vista de su uso como combustible, la biomasa engloba una amplia variedad de materias orgánicas, que se pueden utilizar de distintas maneras según su naturaleza. La Figura 29 ilustra las distintas rutas de transformación de la biomasa en combustibles.

El principio básico que impulsa el empleo de biocombustibles es que, aunque obviamente éstos emiten CO<sub>2</sub> en la combustión, no emiten más que el CO<sub>2</sub> previamente tomado de la atmósfera y fijado por la planta en sus tejidos durante su proceso de crecimiento. De esta manera, el balance global de emisiones de CO<sub>2</sub> sería cero, aunque más adelante se mostrará que aún la combustión de biocarburantes, en las condiciones actuales de producción y procesado de los mismos para

convertirlos en combustibles, produce emisiones netas de CO<sub>2</sub>, aunque inferiores a las que produce la combustión de combustibles fósiles. Otros beneficios de los biocarburos son su carácter renovable, su nulo contenido de azufre y de compuestos aromáticos; en algunos casos, mejoran incluso algunas propiedades de los carburantes clásicos, como la combustión, en el caso de que se utilice etilterbutil éter derivado del bioetanol, o el mayor poder lubricante del biodiésel en comparación con el diésel obtenido del petróleo. Se aduce también su efecto promotor de la economía rural, y su capacidad par aprovechar excedentes agrícolas.

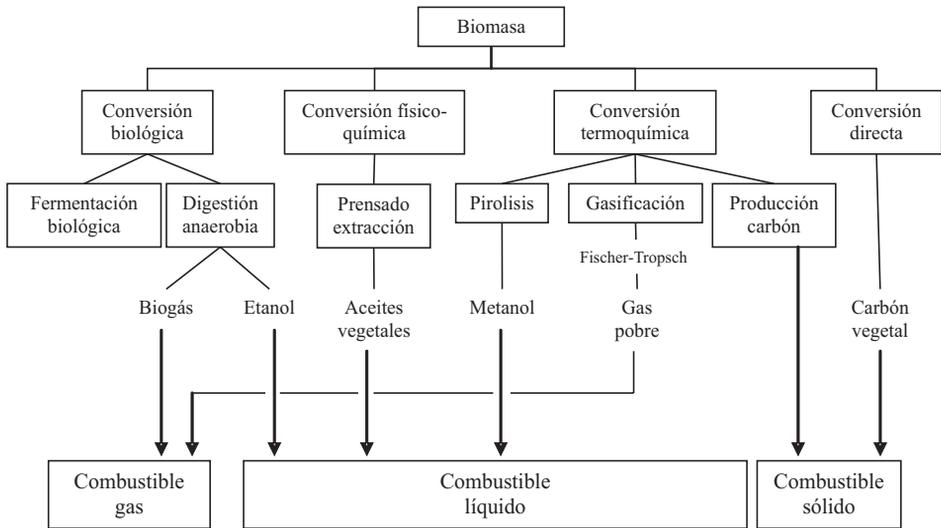


FIGURA 29. Transformaciones y aplicaciones energéticas de la biomasa.

### 6.1. Biocarburos. Bioetanol y biodiésel

Los biocarburos son combustibles líquidos o gaseosos, producidos a partir de la biomasa. Los tres biocarburos más importantes son el gas producido mediante fermentación de materia orgánica, denominado por ese motivo biogás, el bioetanol y el biodiésel. El interés de los biocarburos radica en que pueden sustituir a los combustibles fósiles empleados actualmente en el sector del transporte, y por este motivo los dos más importantes son el bioetanol y el biodiésel.

El esquema de la Figura 30 muestra las rutas básicas para la obtención de ambos biocarburos.

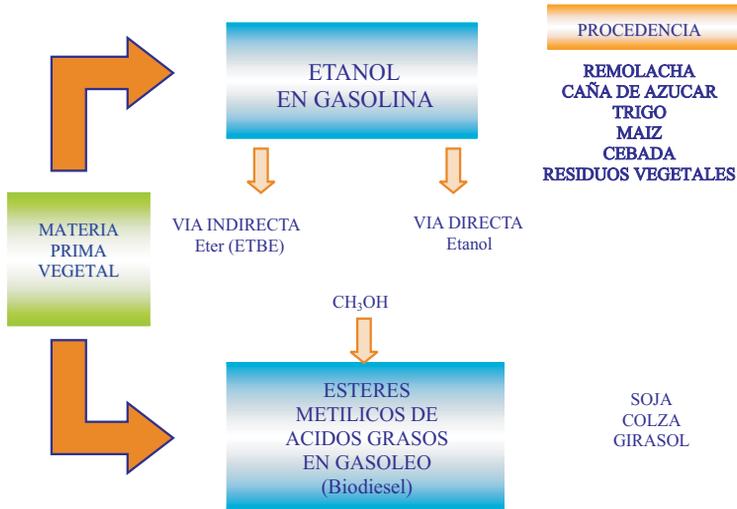


FIGURA 30. Esquema de conversión de materias primas vegetales en biocarburantes (8).

Se denomina bioetanol al etanol obtenido mediante la fermentación de materias primas de origen vegetal, entre las que destacan la remolacha, la caña de azúcar, el trigo, el maíz, la cebada o distintos tipos de residuos vegetales. El empleo de una u otra materia prima depende de factores específicos de cada país. Así, en Brasil, líder mundial en el empleo de biocarburantes, se emplea el etanol obtenido a partir de la caña de azúcar en vehículos de combustión interna desde hace más de 25 años, mientras que en Europa, con condiciones climatológicas muy distintas a las de Brasil, se obtiene sobre todo a partir de la remolacha azucarera y el trigo.

Existen dos maneras de utilizar el etanol en motores de combustión interna: se puede simplemente mezclar con la gasolina en distintas proporciones (una mezcla 25% de alcohol y 75% de gasolina suele ser bastante común), o incluso utilizarlo prácticamente puro (95% de etanol) en vehículos adaptados. Sin embargo, resulta incluso más conveniente transformar el etanol en etilterbutileter (ETBE). Este compuesto tiene unas propiedades muy adecuadas para su empleo en motores, posee en particular un octanaje muy elevado, y una tensión de vapor en verano de 45 KPa, por debajo del máximo de 60 exigido por la normativa vigente en 2005. El etanol sin embargo, posee una tensión de vapor de 200, lo que inevitablemente provoca emisiones indeseables de este compuesto a la atmósfera. Otras ventajas añadidas del ETBE son que se incorpora al nivel de las refinerías, en la formulación de las gasolinas, y que no necesita un sistema propio de distribución al usuario, a diferencia del etanol o sus mezclas.

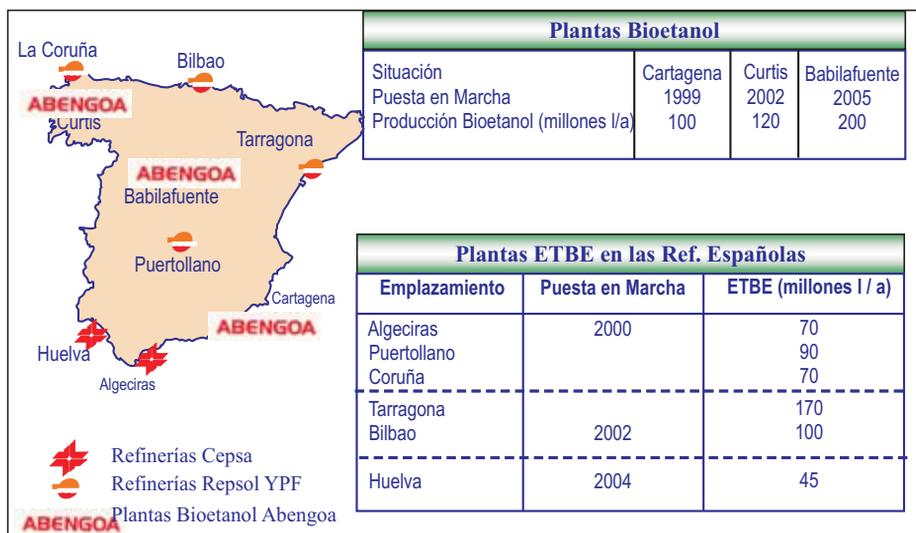


FIGURA 31. Producción de bioetanol y ETBE en España (8).

En España existen varias plantas de fabricación de bioetanol, con una capacidad total de producción instalada de alrededor de 330.00 Tm, así como de síntesis de ETBE en varias refinerías (Figura 31). Las tres plantas de bioetanol en funcionamiento actualmente pertenecen al grupo Abengoa, que tiene otras en construcción en Vizcaya, Andalucía, y Cataluña, al igual que otros grupos industriales, como Sniace y Acciona, en diversas Comunidades Autónomas.

## 6.2. Biodiésel

Se denomina biodiésel a los ésteres metílicos de los ácidos grasos que se obtienen a partir de grasas animales y aceites vegetales, aunque por el volumen de biodiésel requerido para su uso en el sector del transporte, sólo los aceites vegetales tienen interés práctico. La reacción entre aceites vegetales, que son triésteres de ácidos grasos y glicerina y metanol da lugar a la formación de los correspondientes ésteres metílicos y de glicerina (Figura 32), que se obtiene como subproducto en una proporción que varía en función de la composición química exacta del aceite vegetal de partida, pero que puede estimarse en cerca de 200 kg por cada tonelada de éster metílico.

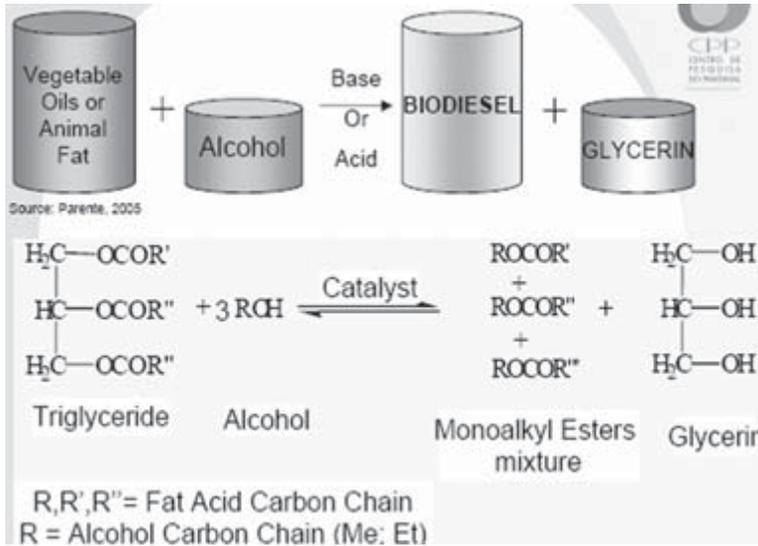


FIGURA 32. Obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales.

La reacción requiere el empleo de un catalizador básico, como hidróxido o metóxido de potasio, que una vez finalizada la reacción hay que neutralizar y separar de la mezcla resultante. El biodiésel pueden utilizarse solo o bien mezclado en proporciones variables con gasóleo convencional.

El aceite de cacahuete ya se utilizó como combustible en la primera demostración pública del funcionamiento del motor diésel en la Feria Internacional de París de 1889, y los aceites vegetales siguieron utilizándose en ese tipo de vehículos hasta que fueron desplazados por el diésel obtenido del petróleo, a medida que la industria petrolera se desarrollaba a gran escala en la década de los veinte del siglo pasado.

Las propiedades del biodiésel dependen de la composición química del aceite vegetal de partida, en particular del número de átomos de carbono de los ácidos grasos que contienen y del grado de instauración de los mismos. En la Tabla 6 se recoge el índice de cetano de distintos tipos de biodiésel obtenidos a partir de diferentes aceites vegetales. El índice de cetano es una de las características más importantes del diésel, que expresa su tendencia a entrar en ignición por efecto de la compresión, tomando el cetano o n-hexadecano como referencia. Se observa en la tabla que, en general, varía de manera inversa con el grado de instauración del biodiésel, medido mediante el índice de yodo.

TABLA 6. *Características de distintos tipos de biodiésel*

<i>Materia prima</i>	<i>Composición (%)</i>					<i>Índice de iodo</i>	<i>N.º cetano</i>
	<i>C12</i>	<i>C14</i>	<i>C16</i>	<i>C18</i>	<i>C18 Insat.</i>		
Colza	–	1	3	2	40*	110-115	58
Girasol-	–	10	–	85	125-135	52	
Oliva	–	1	10	3	85	77-94	60
Soja	–	–	–	–	85-90	125-114	53
Coco	47	15	9	2	9	8-10	70
Palma	–	2	38	5	54	44-58	65
Babassu	45	15	7	4	16	–	–

\* El aceite de colza contiene entre un 40 y un 60% de C22 monoinsaturado.

Se observa en la Tabla 6 que la mayoría del biodiésel procede de aceites vegetales muy insaturados, en los que la gran mayoría de los grupos grasos tienen 18 o más átomos de carbono. En Europa, el 70% del biodiésel se obtiene del aceite de colza, sobre todo en Alemania, el 20% del girasol, y el resto de otros aceites y de aceites usados. En España se produjeron 14.000 Tm de biodiésel en 2004.

### 6.3. *Políticas comunitarias sobre biocarburantes*

La Unión Europea está desarrollando una decidida política de estímulo del empleo de biocarburantes para el transporte, tal y como recogen diversas directrices de las autoridades comunitarias. La producción actual de biocarburantes líquidos en la EU 25 es de unos 2 Mtm aproximadamente, lo que supone menos del 1% del total. Aproximadamente un 20% de esa cifra corresponde al bioetanol, y el resto al biodiésel. Fruto de la política comunitaria es el aumento de la producción de biocarburantes, que se ha multiplicado por 4 entre 1999 y 2004, cuyo objetivo es lograr que en el año 2010 los biocarburantes supongan un 5,75% del total empleado en el transporte, un 8% en el 2020, proponiéndose alcanzar un 25% en el 2030. La Tabla 7 recoge la previsión de demanda de energía para los tres principales combustibles empleados en el sector del transporte, en el período 1990-2030.

TABLA 7. *Previsión de demanda de energía (en Mtm) para los tres combustibles líquidos principales (14)*

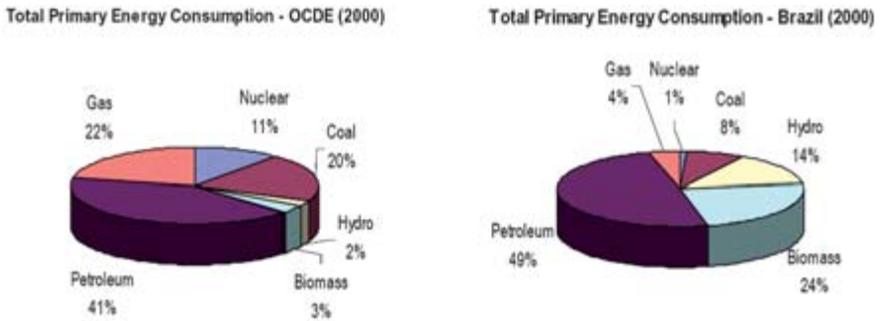
	1990	2000	2010	2020	2030
Gasolina	132,1	129,8	142,1	145,4	141,6
Keroseno	29,2	45,1	53,0	63,3	72,0
Diésel	103,0	147,7	182,1	207,6	223,6
Total	264,3	322,6	377,2	416,3	437,2

La aplicación de esa norma comunitaria supone que serán necesarios 18 Mtm de biocarburantes en el sector del transporte en el año 2010, y alrededor de 33 Mtm en el 2020. Los informes de la UE afirman que Europa posee un potencial significativo en la producción de biocombustibles, a los que habrá que dedicar nada menos que entre el 4 y el 13% del total de tierras agrícolas para cubrir esa demanda con la producción interna. Para el año 2030 se requerirían alrededor de 100 Mtm, una cifra que sólo se podría alcanzar recurriendo a importaciones masivas de biocarburantes. Incluso hoy en día, ya se están produciendo importaciones de aceites vegetales destinados a la fabricación de biodiésel. No obstante, los informes elaborados por la UE sostienen que al menos la mitad de esas necesidades podrían provenir de biocarburantes obtenidos a partir de los residuos lignocelulósicos generados en las actividades agrícolas, incluida la explotación de madera, y en el procesado de alimentos. Esos residuos se convertirían en gas de síntesis (mezcla de CO y H<sub>2</sub>), que suministrarían combustibles líquidos mediante los procesos F-T y MTG descritos anteriormente.

#### 6.4. *Los biocarburantes en Brasil*

Brasil es sin lugar a duda el país en el que se utilizan en mayor cantidad los biocarburantes, esencialmente bioetanol, para el sector del transporte por carretera (Figura 33). Teniendo esto en cuenta, y las previsiones de la UE en lo que se refiere a la necesidad de recurrir a importaciones de biocarburantes para abastecer el mercado interior, es conveniente examinar con algún detalle la situación de los biocarburantes en ese país.

Brasil inició en la década de 1970 un ambicioso programa de fomento del uso masivo de bioetanol, y en mucha menor medida, de biodiésel. Ello estuvo motivado por distintos factores. En primer lugar, por la doctrina de la seguridad nacional de la dictadura entonces gobernante, con la finalidad de reducir la dependencia energética del exterior. A ello se unió la estrecha relación entre los grandes propietarios agrícolas productores de caña de azúcar y la dictadura militar, el bajo coste de la mano de obra, las inversiones en infraestructuras viarias, los bajos precios del azúcar en el mercado internacional, y los subsidios para el cultivo de la caña de azúcar destinada a la producción de etanol, entre otros.



Source: Goldberg, 2003.

FIGURA 33. Distribución del consumo de energía en Brasil y OCDE (15).

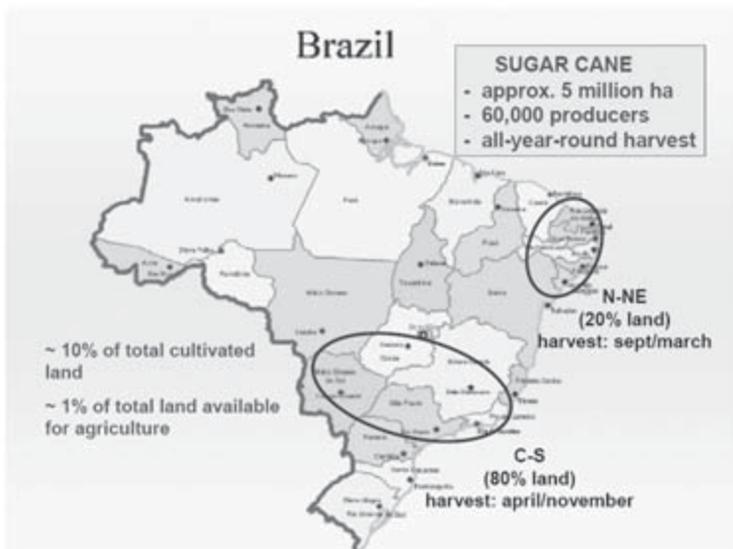


FIGURA 34. Producción de bioetanol en Brasil (16).

Según se muestra en la Figura 34, se dedican a la producción de caña de azúcar aproximadamente 50.000 Km<sup>2</sup>, alrededor del 10% del total de tierra cultivada del país, produciéndose alrededor de  $13 \times 10^9$  litros de etanol. Los subsidios finalizaron en 1997, lo que supuso un cierto estancamiento del uso de este biocombustible. Sin embargo, las políticas medioambientales tendientes a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han supuesto un nuevo impulso para la producción de biocombustibles en Brasil, en los que esta vez parece ocupar un lugar destacado el biodiésel.

Desde enero de 2005, se autoriza la venta del combustible tipo B2, que contiene un 2% de biodiésel, que será fijo a partir del 2008, y a partir del año 2013 será obligatorio el tipo B5, que contiene un 5% de biodiésel. La introducción de estos combustibles se impulsa mediante una política fiscal que prima la producción de biodiésel con hasta 90 US\$ por metro cúbico. La introducción del B2 supone la necesidad de obtener  $800 \times 10^6$  litros/año de biodiésel, a partir de  $1,5 \times 10^6$  hectáreas de terreno cultivado, es decir, aproximadamente 500 litros de biodiésel por hectárea, que se obtiene casi en su totalidad del aceite de soja. Brasil posee una gran variedad de plantas productoras de aceites vegetales, entre las que destacan la palma *dendé*, que puede llegar a producir hasta 6.000 litros de aceite por hectárea; el babassu, otro tipo de palma, con un rendimiento de 1.600 litros de aceite/ha; el árbol castor, con 2.000 l/ha; y la soja, con un rendimiento aproximado de entre 400 y 500 litros por hectárea, o incluso algo superior, en función de las condiciones climáticas y del suelo. Aunque el rendimiento de aceite de las palmas es muy elevado, éstas requieren una gran cantidad de mano de obra, que se estima en unas veinte veces superior a la que necesita la recolección de la soja (17). Aunque este factor es ciertamente muy beneficioso para el desarrollo socioeconómico de las comunidades locales de regiones que poseen una renta muy baja, parece ser que el gobierno brasileño se ha inclinado por la soja como principal suministrador del aceite del que se obtiene el biodiésel, que requiere mucha menor mano de obra, y de la que Brasil es uno de los principales productores mundiales. Los planes gubernamentales establecen como principal zona destinada a los cultivos de soja para la producción de biodiésel la región conocida como *Cerrado*, una región de sabana que se extiende en forma de arco a lo largo de la frontera sur y sureste del Amazonas, con una gran riqueza desde el punto de vista de la biodiversidad (Figura 35).



FIGURA 35. Área de expansión de la producción de biodiésel en Brasil (16).

### 6.5. Producción de biodiésel y deforestación

La razón básica para impulsar el consumo de biocarburos es mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, fundamentalmente CO<sub>2</sub>. En efecto, se estima que el biodiésel produce aproximadamente un 80% menos de emisiones de este gas que el diésel obtenido del petróleo. Parecería que el biodiésel no produce emisiones netas de CO<sub>2</sub>, ya que al quemarse emite a la atmósfera el gas previamente fijado en la planta durante su crecimiento, pero hay que tener en cuenta que la producción de biodiésel requiere un gran consumo de energía, que en su mayoría es de origen fósil, y además requiere metanol, que se obtiene a partir de fuentes de carbono fósil. Sin embargo, cuando se realiza un análisis del ciclo de vida completo de la producción de este biocarburo, lo que se denomina en inglés «well-to-wheel», es decir, desde el lugar donde se extrae originalmente (el pozo de petróleo, cuando se aplica a este combustible) hasta el vehículo en el que se consume, las conclusiones acerca de las supuestas ventajas del biodiésel sobre el diésel convencional son muy distintas.

En primer lugar, hay que tener en cuenta las grandes cantidades de biodiésel que se van a tener que producir de acuerdo con las previsiones de la UE, a las que muy probablemente se sumen otros países, como el caso de Brasil. El biodiésel que se consuma en Europa a corto/medio plazo no puede provenir de fuentes autóctonas, sino que va a requerir la importación masiva del aceite o aceites vegetales de los que se obtenga, como lo reconocen los propios documentos comunitarios. En este escenario, Brasil aparece como el principal suministrador de la materia prima necesaria, que no es otra que el aceite de soja. Tal y como se indicó anteriormente, el gobierno brasileño ya ha elaborado planes de expansión del cultivo de soja con este fin, y prevé satisfacer no sólo la demanda interna, sino también el mercado exterior (18). La elección de este aceite no es casual, ya que Brasil produjo en el año 2004, 49,79 millones de toneladas de grano de soja, un 26% de la producción mundial, de los que se exportaron el 72.8%, alrededor de 36 millones de toneladas, principalmente a Europa y China. Esto supuso para Brasil unos ingresos equivalentes al 12% del total de sus exportaciones, lo que indica la importancia estratégica que tiene este cultivo para el país. La soja se destina sobre todo a alimentación humana y animal, como los pollos de granja, siendo éste el destino principal de la soja importada por los países europeos. Brasil ya dedica al cultivo de soja 230.000 Km<sup>2</sup>, una superficie que se incrementó sólo entre el 2004 y 2005 en 20.000 Km<sup>2</sup> con el fin de satisfacer una demanda en rápido crecimiento (19). Es en este escenario en el que se sitúa la demanda de soja para la producción de biodiésel, siguiendo los planes aprobados por el gobierno brasileño.

En efecto, los millones de toneladas de soja adicionales destinadas a la producción de biodiésel van a requerir nuevos terrenos de cultivo, y es aquí dónde se sitúa el problema medioambiental ligado a la producción de este biocarburo, ya que esas nuevas áreas de cultivo van a provenir de la deforestación de la selva

amazónica y del *Cerrado*. En efecto, actualmente ya existen en la Amazonía brasileña alrededor de 30.000 Km<sup>2</sup> de plantaciones de soja, aumentando cada año la superficie que se destina a este fin. Pero el mayor impacto se produce en la biota conocida como el *Cerrado*, que se ha establecido como zona de expansión de los cultivos de soja destinados a la producción de biodiésel. Esta es una región de alrededor de  $2 \times 10^6$  Km<sup>2</sup> de sabana tropical extraordinariamente rica en biodiversidad. En esta área, se encuentran unas 10.000 especies de plantas, 161 especies de mamíferos, 837 especies de pájaros, 150 especies de reptiles, y 150 de anfibios (20). De la superficie original, el 55% ya ha sido deforestado para destinarlo a pasto para ganado (42%) o a usos agrícolas (11%). Además, la deforestación avanza a un ritmo anual de entre 22.000 y 30.000 Km<sup>2</sup>, (21) y es previsible que ese ritmo se incremente sustancialmente con la expansión de los cultivos energéticos (soja para biodiésel). Sólo el 2% de la superficie del *Cerrado* está protegida legalmente.

Si la deforestación en el *Cerrado* tiene un impacto medioambiental muy negativo sobre el que están llamando la atención recientemente diversos especialistas, es aún peor la deforestación de la región del Amazonas. En esta zona, se deforestaron entre agosto de 2003 y el mismo mes de 2004, 26.000 Km<sup>2</sup>, un 6% más que el año anterior, la mitad de ellos en el estado de Matto Grosso. En la última década, la deforestación ha avanzado a un ritmo de unos 25.000 Km<sup>2</sup> anuales (22). El estímulo a la producción de soja para biodiésel va a incrementar sin duda estas cifras. En primer lugar, porque esos cultivos no se circunscriben a la región del Cerrado, sino que como se acaba de señalar la soja es un cultivo en expansión en la región del Amazonas. Se deforesta para dedicar la superficie deforestada a cultivos agrícolas, entre ellos la soja, y a pasto para el ganado. En segundo lugar, a medida que se dediquen terrenos de pasto en las zonas ya deforestadas del Cerrado, los ganaderos se desplazarán hacia las regiones amazónicas fronterizas para deforestarlas y obtener así nuevos suelos para pasto, siguiendo una tendencia ya establecida en la región. Además de la deforestación, el cultivo de soja a gran escala crea problemas de contaminación de las aguas, debido al uso de herbicidas y plaguicidas, pérdida de suelo fértil arrastrado en la estación de las lluvias, y reducción severa de la biodiversidad. A ello hay que añadir su impacto indirecto debido a la construcción de toda la red de infraestructuras necesaria para la producción de la soja y su traslado a los centros de exportación.

Aunque el impacto medioambiental de la producción masiva de soja es muy severo, en el caso de la deforestación de la selva amazónica produce un enorme incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, que es el motivo aducido para su cultivo. La causa de este efecto radica en el contenido en carbono de la biomasa de la selva amazónica, y en menor medida también del *Cerrado*. La selva amazónica contiene de media unas 463 toneladas de masa vegetal seca por hectárea, de las que aproximadamente el 50% corresponden a carbono, es decir, unas 230 toneladas de este elemento (23). Esas cifras muestran que las selvas tropicales del planeta constituyen un enorme depósito de carbono de la bio-

esfera, y su destrucción inevitablemente traslada ese carbono bajo la forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. El ritmo de la destrucción de selvas tropicales en todo el mundo es de tal magnitud que se estima que, como media en el período 1981-1990, las emisiones netas de gases de efecto invernadero debido al incendio intencionado de selvas tropicales para su reconversión en otros usos, supuso aproximadamente un 30% del total de emisiones antropogénicas de esos gases (24). Sólo las emisiones debidas a la deforestación en Brasil supuso el 5% del total.

Fearnside ha estudiado con detalle el impacto de la deforestación de la selva amazónica sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo en cuenta no sólo los gases emitidos en el proceso de combustión, sino también el carbono fijado por los nuevos usos agrícolas o ganaderos del terreno quemado (23-24). Tomando como referencia el año 1990, durante el que se quemaron 13.800 Km<sup>2</sup> de selva amazónica, y la contribución relativa de cada gas emitido, el análisis exhaustivo del proceso de deforestación realizado por ese autor conduce a estimar que el incendio de cada kilómetro cuadrado de selva y su reconversión en usos agropecuarios produce unas emisiones netas de GEF de 70.000 Tm de CO<sub>2</sub> equivalente. Es decir, unas 700 Tm por hectárea. Sin embargo, por cada hectárea deforestada que se dedique al cultivo de soja, sólo se obtienen entre 400 y 500 litros de aceite por cosecha, que pueden transformarse en una cantidad aproximadamente equivalente de biodiésel. La combustión de ese biodiésel evita la emisión de aproximadamente 1,5 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de origen fósil, es decir, alrededor de 450 veces menos que los gases emitidos en el proceso de reconversión de una hectárea de selva en una hectárea de plantación de soja. Un análisis similar realizado por el mismo autor sobre las áreas de sabana o *cerrado* existentes en la región amazónica indica unas emisiones netas alrededor de ocho veces inferiores a las de las regiones selváticas, que en todo caso supone unas emisiones netas de GEF en el proceso de deforestación.

El análisis global que se acaba de exponer indica claramente que la estrategia de uso masivo de biodiésel como sustituto del diésel de origen fósil va a incrementar notablemente tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como la amenaza sobre los bosques húmedos del planeta, cuya superficie se reduce en varios millones de hectáreas anualmente. Además, no hay que olvidar que el cultivo de soja para su uso como combustible compite directamente con el uso de la tierra para producir alimentos, y ese factor debe ser necesariamente tenido en cuenta en cualquier estrategia que contemple el empleo de cultivos energéticos para satisfacer una cantidad significativa de la demanda de combustibles líquidos.

A los dos graves inconvenientes que se acaban de mencionar, se añade otro factor que cuestiona también de manera decisiva el empleo masivo de biocarburos, y que es frecuentemente ignorado: la producción tanto de etanol mediante procesos de fermentación de productos vegetales ricos en carbohidratos, como la producción de biodiésel a partir de aceite de soja y de girasol, tienen un balance de energía negativo, es decir, se necesita más energía para producir

un litro de etanol y de biodiésel que la energía que liberan mediante combustión. Pimentel y Pazek (25) han reportado recientemente los resultados de un estudio exhaustivo acerca del balance energético de la producción de etanol a partir de maíz y madera, y de la de biodiésel a partir de aceite de soja y de girasol. Esos autores concluyen que la producción de etanol requiere un 29% más de energía fósil que la que libera el etanol mediante combustión, mientras que en el caso de la madera esa cifra se eleva hasta el 57%. Los autores señalan que, en el caso de Brasil, a pesar de que la caña de azúcar es una materia prima más eficiente que el maíz para la producción de etanol, el balance de energía también es negativo. La producción de biodiésel a partir de aceites de soja y de girasol requiere un 27% y un 118% más, respectivamente, de energía fósil, que la que contiene el biodiésel obtenido. Esos datos confirman los reportados anteriormente por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (26). Además, el biodiésel obtenido es entre 3 y 5 veces más caro que el diésel proveniente del petróleo, en función del aceite vegetal de partida. Esos datos ponen claramente de manifiesto que ni el etanol ni el biodiésel son una fuente de energía primaria, sino que, por el contrario, su producción requiere un consumo considerable de energía.

**Agradecimientos.** El autor agradece al Doctor Jesús Lázaro Muñoz (CEPSA) por el permiso para reproducir aquí parte de las figuras de la referencia 8, y a M. Grande y A. B. Pinar por la ayuda prestada en la elaboración de este documento.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Actas de las XV Jornadas del CUEPE (Centre Universitaire d'étude des problèmes de l'énergie), Universidad de Ginebra (Suiza), mayo de 2005.
- (2) JANCOVICI, JEAN-MARC. <http://www.manicore.com>
- (3) Sostenibilidad en España, 2005. Informe de Primavera. Observatorio de la Sostenibilidad en España. Universidad de Alcalá. Madrid.
- (4) MARTÍNEZ DEL OLMO, Wenceslao (Repsol-YPF). ¿Llegó el fin del petróleo? Análisis madri + d, 16 de febrero de 2006. <http://www.madridmasd.org>
- (5) HUBBERT, M. KING (1956): Nuclear energy and the fossil fuels, Spring Meeting of the Southern District Division of Production. American Petroleum Institute.
- (6) Ingeniería ambiental, Gerard Kiely, McGrawHill (1999).
- (7) DOADRIO VILLAREJO, A. L. (2005): *Contaminación y Energía*. Instituto de España, Madrid.
- (8) LÁZARO MUÑOZ, J. (2006): *La mejora de la calidad ambiental de los combustibles*. IV Congreso Andaluz de Ingeniería Química, Málaga.
- (9) FISCHER, F., TROPSCH, H. (1922): Patente alemana 411.216.
- (10) *Zeolitas: síntesis, propiedades y aplicaciones*. Pérez-Pariente, J. y García, J. (editores). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante (2003).
- (11) [www.iza-structure.org](http://www.iza-structure.org)
- (12) CHANG, C. D., SILVESTRI, A. J. (1977): The conversion of methanol and Other O-Compounds to Hydrocarbons over Zeolite Catalysts. *J. Catal.* **47**: 249-259.

- (13) (a) LEE, S. (1990): *Metanol Synthesis and Technology*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA; (b) JOO, O. S.; JUNG, K. D.; MOON, I.; ROZOVSKII, A. YA; LIN, G. L.; HAN, S. H., UHM, S. J. (1999): *Ind. Eng. Chem. Res.* **38** (5), 1808; (c) MAHAJAN, D.; GOLAND, A. (2003): *N. Catal. Today* **84**: 71-81; (d) GALLUCCI, F.; PATURZO, L., BASILE, A. (2004): *Chem. Eng. Process.* **43**: 1029-1036.
- (14) *Biofuels in the European Union. A Vision for 2030 and Beyond.* 2006.
- (15) SOUZA, P. T. DA. UFMT-UNU Pantanal Regional Environmental Programme. Brasil.
- (16) SZWARC, A. (2004): Ministry of Science and Technology (Brasil). Use of Biofuels in Brazil. Workshop on Mitigation. SBSTA 21/COP 10. Buenos Aires (Argentina).
- (17) MEIRELLES FILHO, J. (2004): *O Livro de Ouro da Amazonia*. Rio de Janeiro. Ediuoro.
- (18) [www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br)
- (19) (a) SCHLESINGER, S. Soy in Brazil. Documento de trabajo preparado por el autor en representación de FASE (Brasil), para la reunión EU NGO sobre la soja, celebrada en los días 19-20 de septiembre de 2005. (b) FEARNSIDE, P. M. (2001): Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. *Environmental Conservation* **28** (1), 23-38.
- (20) SILVA, J. M.; C. DA, BATES, J. M. (2002): Biogeographic Patterns and conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot. *BioScience* **52** (3), 225-23.
- (21) KLINK, C. A., MACHADO, R. B. (2005): Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology* **19** (3), 707-713.
- (22) FEARNSIDE, P. M. (2005): Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates and Consequences. *Conservation Biology* **19** (3), 680-688.
- (23) FEARNSIDE, P. M. (2000): Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change* **46**: 115-158.
- (24) FEARNSIDE, P. M. (1997): Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Climate Change* **35**: 321-360.
- (25) PIMENTEL, D., PATZEK, T. W. (2005): Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. *Natural Resources Research*, **14** (1) 65-76.
- (26) SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRAQBOSKI, M., SHAPOURI, H. (1998): An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles: Nrel/tp-590-24772. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Dep. of Energy.