

TECNOLOGÍAS PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE

JOSÉ LUIS SOTELO SANCHO *

* Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Químicas de la U.C.M. Ciudad Universitaria 28040 Madrid

La especie humana se diferencia de los restantes seres vivos en los fuertes efectos que tiene su actividad sobre todas las especies animales o vegetales y sobre el medio natural en general. A fines del siglo XVIII, la revolución industrial supuso un fuerte incremento en la demanda de materias primas y de energía. La fuente de energía más empleada hasta entonces, la madera, procedente de materias primas renovables, fué desplazada por los combustibles fósiles, primero por el carbón (siglo XIX) y posteriormente por el petróleo y el gas natural (siglo XX). Estas fuentes se han complementado en todo tiempo con las contribuciones de la energía hidráulica y, en la segunda mitad del siglo XX, con la energía nuclear.

La sociedad industrial ha tenido como paradigma producir más para tener mayores beneficios. Sin embargo, durante el siglo XX los efectos sobre el medio ambiente han sido muy fuertes, tanto en zonas localizadas (grandes áreas industriales o aglomeraciones urbanas), como afectando a regiones cada vez más extensas, que llegan ya a abarcar todo el planeta, por ejemplo, por la emisión de gases con efecto invernadero o las lluvias ácidas. Estos efectos se han debido tanto a la actividad ordinaria como a accidentes fortuitos que en ocasiones han tenido graves consecuencias. Por otra parte, el crecimiento de la población y las mayores demandas han dado lugar a un agotamiento importante de muchos recursos naturales no renovables, tales como el petróleo o ciertos minerales.

Por estas razones, el último tercio del siglo XX ha contemplado dos movimientos para tratar de contrarrestar estos efectos que afectan por primera vez a toda

la Tierra: En primer lugar la preocupación por **el medio ambiente**, que se inicia a finales de la década de los 60 y que ha crecido continuamente desde entonces, de modo que prácticamente se contempla en todas las actividades domésticas o industriales. Posteriormente, en 1986 el denominado informe Brundtland introduce el concepto de **desarrollo sostenible**, que toma carta de naturaleza en la conferencia de Río (1992) pasando a constituir uno de los paradigmas actuales. Según las Naciones Unidas, el desarrollo sostenible puede definirse como “El crecimiento que satisface las necesidades actuales sin comprometer las de las generaciones futuras”.

Así pues, en la última década el concepto de **sostenibilidad** se ha ido introduciendo progresivamente, de modo que cada vez aparecen con más frecuencia términos asociados al adjetivo **sostenible**, tales como tecnologías sostenibles, usos sostenibles del agua, etc. De este modo, en el futuro la sociedad en general y la industria, como gestora de gran parte de las actividades humanas relacionadas con el ambiente y las materias primas, además de los parámetros de calidad, economía y productividad, deberá obtener su beneficio o sus menores costes teniendo en consideración que sus efectos sobre el medio natural y sobre la población sean mínimos, si no nulos.

Las industrias, bien individualmente o de forma asociada, están tomando medidas y acciones encaminadas en esta dirección, y que se han reflejado en compromisos conjuntos como el **compromiso de progreso** (*Responsible Care*), de modo que su actividad se aproxime a los principios de la **gestión**

natural, que deben guiar la búsqueda de un equilibrio en las decisiones sobre el uso global de los recursos y que se resumen en:

1. **Las sustancias extraídas de la corteza de la Tierra** (como petróleo, carbón, metales y otros minerales, etc.) **no pueden acumularse sistemáticamente en la ecosfera**. Es decir, la velocidad de extracción de los recursos naturales no puede ser superior a la velocidad con que estas sustancias se redepositan o reintegran en la corteza.

2. **Las sustancias producidas por la sociedad no pueden acumularse continuamente en la ecosfera**. Las sustancias sintéticas no se pueden producir con una velocidad superior a la de ruptura y reintegro de las mismas en los ciclos naturales.

3. **La capacidad natural del ecosistema para absorber y asimilar las sustancias o residuos generados no puede disminuir continuamente**. La disminución de capacidad está vinculada a la destrucción de bosques, humedales, plantas y animales.

4. **Los recursos son limitados**. Deben buscarse los métodos más eficientes para disminuir el consumo de materias primas (y como consecuencia, la tasa de generación de residuos) y, si es posible, reducir el consumo de productos finales. Las naciones industrializadas deberían restringir la utilización de recursos con fines no esenciales, considerando que en muchos países no desarrollados no se cubren siquiera las necesidades básicas.

En los últimos años se han tomado varias iniciativas colectivas para tratar de contener la generación de ciertos residuos especialmente perjudiciales para el medio ambiente, como el protocolo de Montreal para la eliminación de los clorofluorocarburos (CFC), compuestos responsables de la destrucción de la capa de ozono, y los acuerdos derivados de la conferencia de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo y reuniones posteriores, principalmente el protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento de la Tierra.

La consecución de la sostenibilidad resulta difícil a causa del carácter holístico de este concepto, que no solamente afecta geográficamente a todo el planeta, sino que implica múltiples facetas de la actividad humana: industria, economía, materias primas, actividad urbana, nivel de desarrollo, etc. Por ello la búsqueda

de soluciones resulta compleja y solamente se llegará a ellas por aproximaciones sucesivas, con la participación de especialistas de áreas muy diversas: científicos, ingenieros, economistas, sociólogos, etc.

La generación de energía, la producción de residuos y el consumo de materias primas para la fabricación de bienes, están directamente relacionados con los problemas mencionados y con la consecución del desarrollo sostenible. A continuación se analiza primeramente la situación actual de la producción de energía y las previsiones sobre su evolución futura, que permiten examinar en qué forma pueden alcanzarse las condiciones que requiere el desarrollo sostenible, principalmente mediante el uso de tecnologías más eficaces. Finalmente se comentarán como ejemplo algunas mejoras en la tecnología química que contribuyen a la reducción del consumo de materias primas, a la obtención de productos más eficaces y a la generación de menores cantidades de residuos.

ENERGÍA

La producción y transformación artificial de energía distingue a la especie humana de las restantes especies vivas y ha sido una constante desde épocas pretéritas para lograr en primer lugar unas condiciones de vida más confortables y posteriormente para facilitar los desplazamientos y producir masivamente bienes en la industria. Como consecuencia de la creciente demanda, la generación de energía es responsable de un agotamiento de algunas materias primas esenciales (combustibles fósiles), de una buena parte de la modificación de las condiciones ambientales (gases de efecto invernadero, contaminación de la atmósfera) y de la generación de un volumen considerable de residuos, algunos de ellos de difícil gestión.

Consumo de energía

La demanda de energía ha crecido continuamente, muy particularmente desde la aparición de las sociedades urbanas, aunque el cambio más notable ha tenido lugar durante los dos últimos siglos, asociado con la revolución industrial. Así, como se muestra en la Figura 1, se ha pasado de un consumo de unos 40 GJ/(hab.año) en el siglo XV a unos 120 GJ a finales

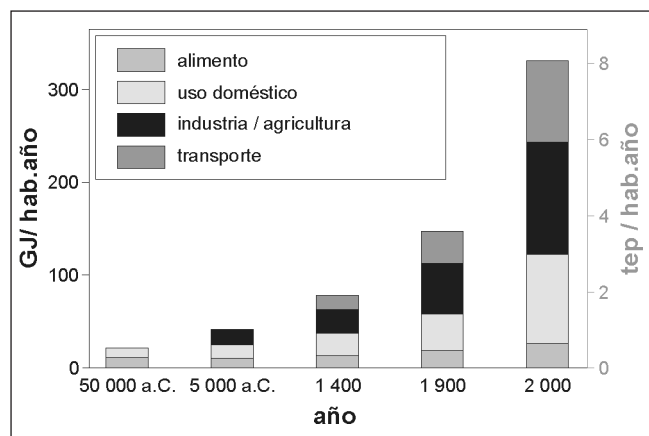


Figura 1. Evolución del consumo de energía per cápita.

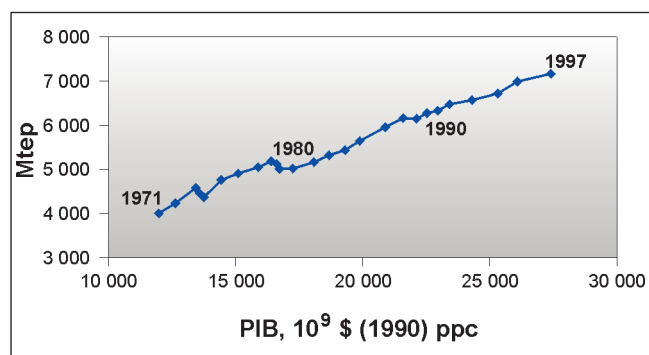


Figura 2. Variación del consumo de energía primaria y del producto interior bruto mundiales entre 1971 y 1997.

del siglo XIX, estimándose que hoy se superan los 300 GJ en los países más avanzados, lo que equivale a alrededor de 8 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por habitante y año.

El consumo está fuertemente unido al desarrollo económico. En la Figura 2 se representa el consumo mundial de energía primaria, expresado como Mtep, frente al producto interior bruto total, expresado en G\$ (1990) corregido por la paridad de poder de compra (ppc), para el periodo 1970-1997. Se aprecia como el consumo de energía se correlaciona con el PIB, aumentando continuamente a excepción de dos pequeñas discontinuidades coincidentes con las crisis energéticas de 1973 y 1982, en las que se produjo un fuerte incremento en los precios del petróleo.

En este mismo sentido, el consumo de energía y los efectos derivados de él, como la emisión de dióxido de carbono, son muy dispares entre los países o regiones del mundo, en función del nivel de desarrollo. En la Tabla 1 se muestran datos para algunos países y regiones del mundo, referidos a 1997. Los países desarrollados, que forman parte de la OCDE, que representan menos del 20 % de la población mundial, consumen el 58 % de la energía primaria y emiten 54 % del dióxido de carbono que se incorpora a la atmósfera.

Varias organizaciones (Naciones Unidas, Agencia Internacional de la Energía) llevan a cabo estudios periódicos para estimar la evolución futura del consumo energético. Aunque estas evaluaciones están muy fundamentadas también están sometidas a múltiples factores imprevisibles, de tipo político o económico, que pueden modificar sustancialmente los resultados. Por esta razón, estos estudios incluyen fre-

	Población		PIB	Energía		Emisión de CO2		Energía
	Mhab	%	%	Mtep	%	Mt	%	tep/(hab.a)
Estados Unidos	270	4,7	27,7	2146	25,3	5535	23,7	8,1
América Norte	395	6,8	31	2491	29,4	6408	27,4	6,4
UE 15	370	6,4	24,4	1409	16,6	3360	14,4	3,8
España	40	0,7	2	114	1,3	271	1,2	2,7
OCDE (29 países)	1096	18,9	81,5	4947	58,4	12644	54,1	4,6
Japón	125	2,2	17	499	5,9	1232	5,3	4,1
China	1230	21,2	3,8	844	10,0	3384	14,5	0,7
Mundo	5800			8477		23390		1,5

Datos referidos a 1997 o último año disponible

Tabla 1. Consumo energético, emisiones de dióxido de carbono, PIB y población en diferentes países y regiones económicas.

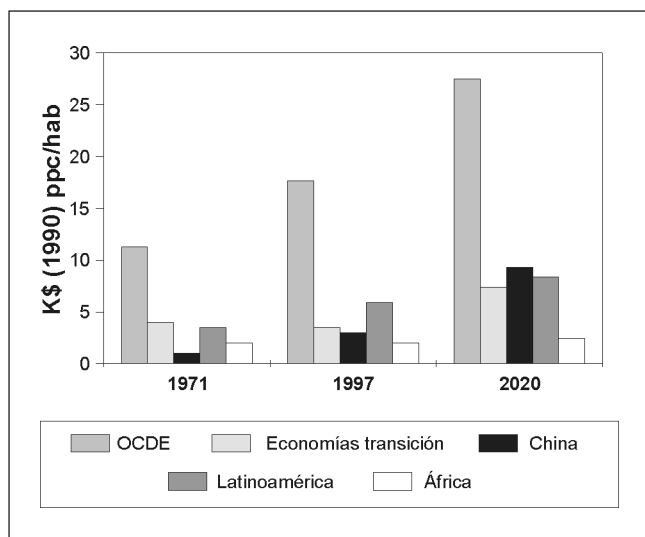


Figura 3. Evolución del PIB por habitante en varias regiones del mundo.

cuentemente varios escenarios para predecir el consumo total y de cada tipo de energía primaria.

En un reciente estudio de la Agencia Internacional de la Energía se predice la evolución del consumo de energía hasta el año 2020. El crecimiento de la población, que se estima pasará de los 6000 millones actuales a 7400 (28 % de aumento), unido al de la economía, que se refleja en los datos estimados para el PIB por habitante en diferentes regiones del mundo que se muestran en la Figura 3, permiten evaluar el consumo de energía primaria en 2020 en 13500 Mtep, un 57 % superior al correspondiente a 1997. El crecimiento más acusado tendrá lugar en China y en los

países menos desarrollados, especialmente Latinoamérica, que pasarán de consumir 34 % del total en 1997 a 45 % en 2020. Por su parte, los países de la OCDE reducirán su participación del 54 al 44 %.

En la Tabla 2 se muestra la distribución actual y prevista para 2020 de las diferentes fuentes de energía primaria. Los combustibles fósiles seguirán constituyendo la base del consumo, con más del 80 % del total. El incremento del consumo previsto se sustenta sobre todo en el gas natural y en el petróleo. También se incrementan a más del doble las energías renovables, pero representando todavía una fracción reducida del total (6 %). En cuanto a la energía nuclear, se prevé incluso un ligero descenso, admitiendo que se mantienen las políticas de los países desarrollados respecto a esta energía, que hasta la fecha mostraban una tendencia hacia la paralización de la construcción de nuevas centrales. Sin embargo, recientemente se detecta un cambio en dicha tendencia, apoyado principalmente en el argumento de la nula aportación de gases de efecto invernadero por las centrales nucleares, de modo que si se construyeran nuevas centrales podría incrementarse la producción de energía sin incumplir los objetivos de los acuerdos de Kyoto. En la misma tabla se incluye una previsión de los precios de los combustibles fósiles. Para el año 2020 se pronostica un incremento del precio del petróleo y del gas natural, que contempla en el primer caso la mayor dificultad de extracción, al agotarse progresivamente los yacimientos más accesibles y ser necesaria la explotación de yacimientos marinos situados en aguas cada vez más profundas.

FUENTE	Mtep		Coste, \$ (1990)			Unidad
	1997	2020	1999	2010	2020	
Petróleo	3300	5400	13,9	16,5	22,5	barril
Carbón	2250	3200	29,3	37,4	37,4	t
Gas natural	2000	3500	67,3	80,9	132,8	tep (Europa)
Nuclear	600	550				
Hidráulica	250	350				
Otras renov	200	500				
TOTAL	8600	13500				

Tabla 2. Fuentes de energía primaria.

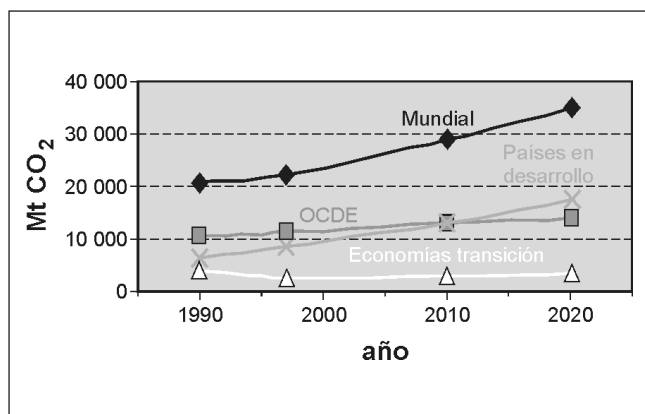


Figura 4. Emisiones de dióxido de carbono.

Por último, en la Figura 4 se muestra la evolución prevista para las emisiones de dióxido de carbono, con un crecimiento superior al 50 % respecto a los niveles de 1990, debido sobre todo a la expansión que experimentarán las economías de los países en desarrollo.

Acciones en el sector energético encaminadas hacia un desarrollo sostenible

Son numerosas las propuestas políticas o tecnológicas encaminadas a contribuir a un desarrollo sostenible, bien tratando de controlar el consumo de ciertas formas de energía (principalmente la procedente de los combustibles fósiles), bien reduciendo la **intensidad energética** (consumo de energía por unidad de PIB) o la **intensidad de carbono o de dióxido de carbono** (kg de C ó CO₂ emitidos por kWh generado).

Entre las primeras se encuentra el protocolo de Kyoto, dirigido al control de las emisiones de gases de efecto invernadero, acuerdo político que implica tanto acciones encaminadas a la reducción del consumo como acciones tecnológicas orientadas bien a la mejora del rendimiento de los sistemas de generación de energía basados en los combustibles fósiles (sustitución de combustibles, aumento del rendimiento termodinámico en los sistemas de generación de energía eléctrica) o a la utilización de energías renovables. También, se encuentran en fase de desarrollo nuevas tecnologías que pueden contribuir a la sostenibilidad, entre las que mencionaremos las pilas de combustible y la energía nuclear de fusión.

El Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto surge como un compromiso global para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global del planeta. Es un magnífico ejemplo, junto con el protocolo de Montreal referente a la prohibición de los gases CFC responsables de la destrucción de la capa de ozono, de los intentos para abordar los problemas globales que afectan al desarrollo sostenible, y también de las dificultades que surgen al intentar aplicarlo.

El origen del protocolo está en la Conferencia de Río (1992) sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, promovida por las Naciones Unidas. En ella se establece un Convenio Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) que da lugar a varias Conferencias para definir las medidas que pueden adoptarse para corregir las tendencias observadas en el clima. En Kyoto se celebra en 1997 la tercera conferencia entre las partes, seguida posteriormente por otras en Buenos Aires, La Haya y muy recientemente en Marraquech.

En resumen, el protocolo pretende reducir la emisión de los seis gases principales responsables del efecto invernadero: dióxido de carbono (el más importante por su relación directa con los combustibles fósiles), metano, óxido nitroso, clorofluorocarburos, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre, fijando como primer objetivo que en 2000 se mantuvieran los niveles de emisión de 1990, objetivo incumplido por la mayor parte de los países desarrollados (solo los países del Este, debido a su recesión económica, han tenido reducciones reales de emisión). Asimismo, para el periodo 2008-2012 se fija una reducción global del 5,2 % en las emisiones, respecto a las de 1990, en los países desarrollados incluidos en el Anexo I del protocolo. La UE 15 ha aceptado en la última reunión una reducción conjunta del 8 %. En el caso de España, por su menor desarrollo dentro de la Unión, se le permite incrementar sus emisiones en un 15 % respecto al nivel de 1990.

Existe un fuerte debate por parte de los países más desarrollados para evitar reducciones drásticas, que van desde la negativa de Estados Unidos a firmar el protocolo (ya aceptado por más de 160 países, entre ellos todos los de la UE 15), a la búsqueda de fórmulas compensatorias como los cupos de reducción, la com-

praventa de emisiones entre países o la petición de compensaciones por parte de los países productores de petróleo. Todo esto da idea de la dificultad que entraña el desarrollo sostenible en cuanto que supone reducciones en los estándares de vida de los países desarrollados.

Sustitución de combustibles

La incidencia de los diversos combustibles fósiles sobre el medio ambiente es muy diferente debido tanto a su contenido variable de elementos específicos como el azufre o el nitrógeno que dan lugar a contaminantes como los óxidos de azufre o nitrógeno, como a la proporción en que se encuentran los elementos propiamente combustibles, carbono e hidrógeno. La razón efectiva hidrógeno/carbono (razón que tiene en cuenta además el contenido de oxígeno) varía desde prácticamente cero en la madera, combustible característico del periodo preindustrial, a 0,4-0,8 en los carbones, 2 en los combustibles líquidos derivados del petróleo (gasóleos, gasolinas) y un valor máximo de 4 en el gas natural. De este modo, el uso de combustibles fósiles ha evolucionado en las dos últimas décadas hacia productos con una proporción creciente de hidrógeno. La disponibilidad actual de grandes cantidades de gas natural, constituido mayoritariamente por metano, accesible desde los yacimientos a través de redes de gasoductos, permite reducir las emisiones de dióxido de carbono por unidad de energía producida, es decir, la intensidad de dióxido de carbono, en un factor próximo a 2 respecto a los carbones y a 1,4 respecto a los combustibles líquidos derivados del petróleo (gasolina y gasóleo). Conviene además recordar que el gas natural constituye, después del agua, la mayor reserva de hidrógeno en el mundo. Por otra parte, el tratamiento a que es sometido el gas natural antes de su uso elimina la mayor parte del azufre y del nitrógeno, dando lugar así a un combustible más limpio, en cuanto se refiere a la contaminación de la atmósfera.

Mejora de rendimiento en la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Cogeneración. Gasificación en ciclo combinado

La generación convencional de energía eléctrica mediante la producción de vapor a partir de combus-

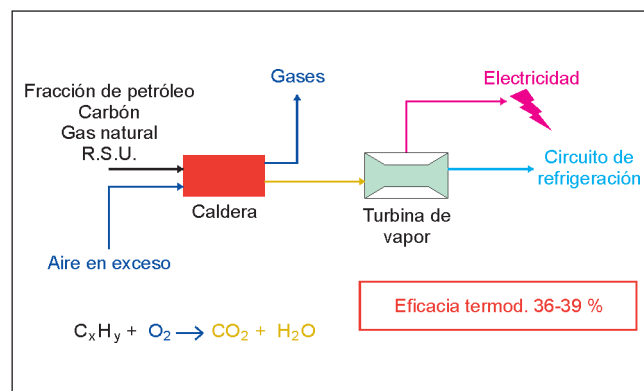


Figura 5. Esquema de una central térmica convencional.

tibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural) y el accionamiento de un generador en una turbina de vapor (Figura 5) presenta una eficiencia energética baja, que con las mejoras introducidas en los últimos años en las turbinas puede llegar al 39 % del contenido energético total del combustible. En las últimas décadas se han introducido dos variantes que permiten mejorar el rendimiento energético global, además de incorporar sistemas modernos de control de otros problemas asociados, tales como la emisión de dióxido de azufre o de óxidos de nitrógeno o la generación de residuos sólidos: la cogeneración de calor y electricidad y la gasificación con ciclo combinado gas-vapor.

Los sistemas de cogeneración se basan en el aprovechamiento del vapor que se utiliza en la industria como agente de calefacción para la generación previa de electricidad, que puede aplicarse para las necesidades internas de la propia planta o bien, si existe excedente, incorporarse a la red eléctrica. En la Figura 6 se muestra un esquema de un sistema de cogeneración, donde a partir de un combustible se genera

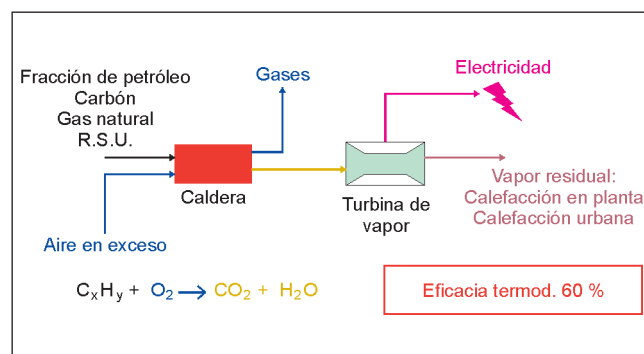


Figura 6. Esquema de una planta de cogeneración.

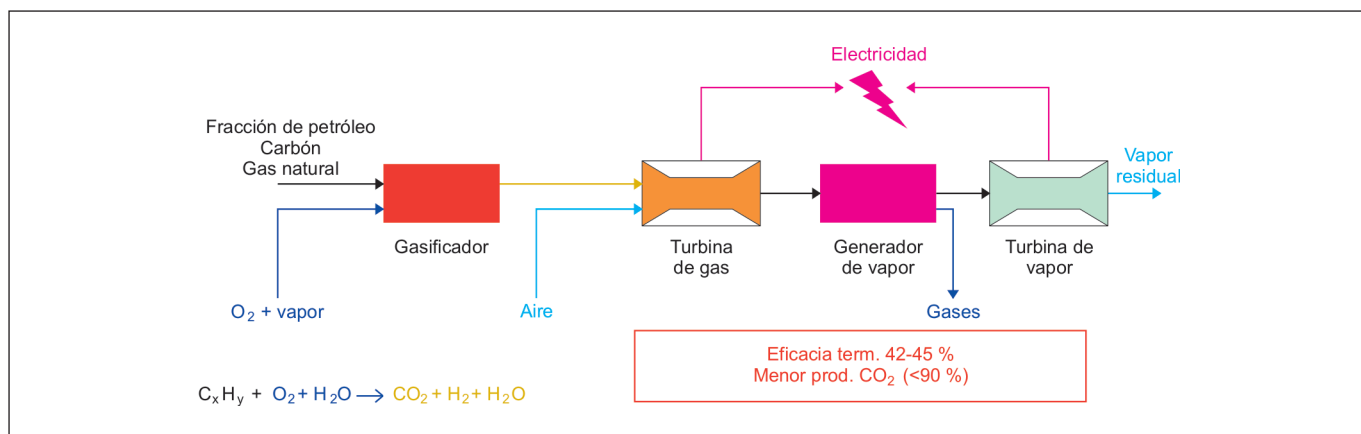


Figura 7. Esquema de una planta de gasificación con ciclo combinado.

vapor a alta presión en una caldera; éste acciona una turbina para generar electricidad y el vapor residual se emplea como agente de calefacción. Los sistemas de cogeneración alcanzan eficiencias próximas al 60 % y se han implantado profusamente en industrias que requieren vapor en sus plantas, como es el caso de las industrias químicas o alimentarias.

Por último, la gasificación en ciclo combinado gas-vapor aprovecha las mejoras alcanzadas en los últimos años en el diseño de turbinas de gas, principalmente debidas a los avances experimentados en la industria aeronáutica. En la Figura 7 se muestra un esquema de una planta de gasificación en ciclo combinado. A partir de un combustible, que puede ser carbón, gas natural, residuos sólidos o fracciones pesadas de petróleo, por reacción con aire y vapor de agua en un gasificador se obtiene un gas constituido por monóxido de carbono e hidrógeno que actúa en una turbina de gas, produciendo electricidad. El gas se quema posteriormente y genera vapor, que acciona una segunda turbina para producir cantidades adicionales de electricidad. De este modo se consiguen eficacias termodinámicas próximas al 45 %, reduciéndose las emisiones de dióxido de carbono en más de un 10 % y además, de forma muy notable, las de óxidos de azufre y nitrógeno, gracias al diseño avanzado de estas plantas para el control de dichos contaminantes.

Energías renovables

Las energías renovables, vinculadas directamente con la energía recibida del Sol, fueron las utilizadas

primeramente por el hombre, sobre todo la asociada con la biomasa (madera), y la hidráulica y la eólica para mover artificios mecánicos (molinos, norias, etc.).

Son muchas las formas en que la energía radiante que recibimos del Sol puede aprovecharse de forma directa o indirecta: solar (térmica y fotovoltaica), hidráulica, eólica, geotérmica, mareas, olas, diferencias de temperatura en el océano o biomasa.

Las energías renovables no consumen recursos naturales de forma neta, y, salvo en la fase de construcción y montaje de los equipos necesarios, son prácticamente inocuas en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono, aunque no están exentas de otros efectos negativos sobre el medio ambiente (impacto visual, alteración del hábitat de otras especies, etc.).

El potencial energético asociado con las fuentes renovables es enorme; en la Tabla 3 se indican las cantidades totales estimadas para cada una de las formas de energía, así como las que se consideran potencialmente aprovechables de forma económica, que representan siempre una fracción muy pequeña del total. A pesar de ello cubrirían sobradamente las necesidades energéticas mundiales, que actualmente se cifran en 5 terawattios, equivalentes a unas 10 Gtep/año.

Las características de las energías renovables las sitúan como una de los principales instrumentos para avanzar en la dirección del desarrollo sostenible. Sin embargo, son varios los factores que dificultan su mayor participación en el balance energético. Entre

POTENCIA, TW

	<u>TOTAL</u>	<u>ÚTIL</u>
Solar	112 000	25
Hidráulica	39 000	3
Eólica	2 500	3
Mareas	1	0,01
Térmica (océanos)	10	-
Térmica (tierra)	1	-
Biomasa	1,5	0,65

Tabla 3. Potencia total y aprovechable de las energías renovables, teravatios.

ellos destacan su baja intensidad por unidad de superficie, que obliga a una fuerte inversión de capital inmovilizado, y su variabilidad, dependiente de los fenómenos meteorológicos, que obliga a disponer sistemas de acumulación y a redes de distribución capaces de absorber aportaciones fluctuantes.

Desde el punto de vista de la situación de las tecnologías para su aplicación, las energías renovables pueden dividirse en tres grupos:

- Tecnología desarrollada: Hidráulica, Solar térmica, Eólica, Combustión de biomasa, Geotérmica (vapor).
- Tecnología en desarrollo: Centrales solares térmicas, Solar fotovoltaica.
- Tecnología incipiente: Mareomotriz, Olas, Diferencia de temperatura oceánica.

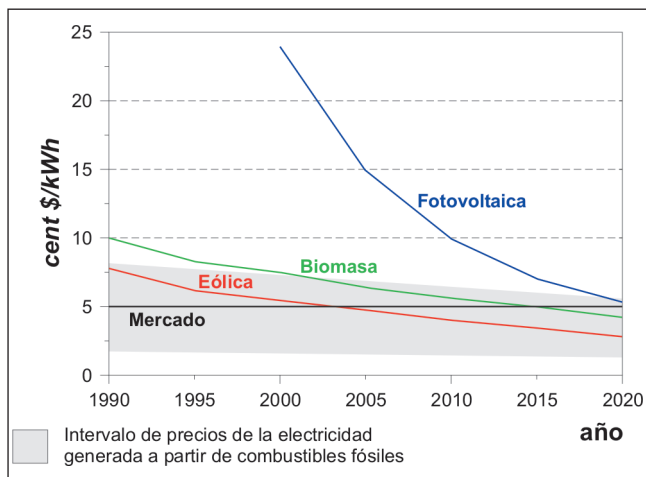


Figura 8. Costes de producción de energías renovables.



Figura 9. Molinos eólicos.

Las energías correspondientes al primer grupo permiten actualmente producir electricidad con costes similares a los correspondientes a los combustibles fósiles, tal como se muestra en la Figura 8 para la energía eólica y para la biomasa. Las energías en desarrollo están experimentando avances muy notables, en particular la fotovoltaica, una de las más prometedoras, ya utilizada para aportar energía eléctrica en lugares apartados. Su desarrollo y aplicación depende fundamentalmente de la tecnología y costes de fabricación de láminas de silicio semiconductor. Como se aprecia en la figura, los costes están disminuyendo rápidamente, de modo que actualmente se encuentran paneles comerciales con un coste de 4 \$/kW instalado; a pesar de ello, el coste de la electricidad generada es aún elevado, estimándose que no serán competitivos con otras formas de energía antes de 10-15 años.

También deben mencionarse las centrales solares térmicas, basadas en la concentración de la radiación en un colector mediante espejos o lentes. En el colector un agente transmisor de calor, agua o sales

fundidas, alcanza elevadas temperaturas y puede aplicarse para la generación de electricidad por vía convencional. También es posible aplicar la energía solar recibida para otros fines, como, por ejemplo, la promoción de reacciones de degradación de contaminantes. En España existe una Plataforma Solar en Almería, con una central solar de torre con una potencia de 7 MW térmicos que permite generar vapor a 500°C para la producción de electricidad, así como otras instalaciones que permiten llevar a cabo estudios de materiales y procesos metalúrgicos o químicos.

Datos en ktep	1999	2010
Usos eléctricos		
Minihidráulica	400	594
Hidráulica	1999	2 677
Eólica	253	1 852
Biomasa	169	5 269
Residuos sólidos	247	683
Otros	6	349
Total uso eléctrico	3 074	11 424
Usos térmicos		
Biomasa	3 500	4 376
Otros	33	839
Total uso térmico	3 533	5 215
TOTAL RENOVABLE	6 607	16 639
CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA	113 986	134 971
Incremento consumo energía primaria		18%
Renovable / Total primaria, %	5,80%	12,30%

Tabla 4. Plan nacional de energías renovables 1999-2010.

La participación actual de las energías renovables en el consumo total de energía es modesta, entre 5-6 %, principalmente como energía hidráulica y de la biomasa. Sin embargo, los países avanzados programan incrementos notables para los próximos años. Así en la Tabla 4 se resume el Programa de Energías Renovables en España para el periodo 1999-2010. Se prevé que las energías renovables pasen de un 5,8 % del consumo total de energía primaria en 1999 al 12,3 % en 2010 (incluyéndose en estas cifras el incremento previsto de un 18 % para el consumo total de energía). Las acciones principales se centran en la biomasa y en la energía eólica, siendo ya muy notables las realizaciones en este último caso.

Nuevas tecnologías en la generación de energía

La importancia de la energía en el mundo actual hace que se inviertan sumas enormes para investi-

gación y desarrollo de todas las formas de energía, que incluyen mejoras en la eficacia de los procesos comerciales ya existentes y nuevos procesos, potencialmente aprovechables. Además de las mejoras ya citadas en el rendimiento de los procesos convencionales de generación a partir de combustibles fósiles y de las energías renovables, citaremos como ejemplo dos tecnologías a las que se dedica un gran esfuerzo de I+D y que presentan un diferente grado de avance: las pilas de combustible y la energía nuclear de fusión. A ellas podrían añadirse otras muchas, como el estudio de la superconductividad, para mejorar el transporte o aplicación de la electricidad o la magnetohidrodinámica.

Pilas de combustible

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de convertir directamente la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica, sin pasar por una etapa intermedia de combustión. Con ello se logra una eficiencia energética muy superior a la de los métodos convencionales de generación de electricidad por vía térmica. El proceso de una pila de combustible es similar al que tiene lugar en las pilas y baterías convencionales, diferenciándose principalmente en el tipo de reactivo (una sustancia combustible en aquellas) y en que las pilas de combustible pueden operar con alimentación continua de los reactivos (combustible y oxígeno) con la consiguiente producción estacionaria de electricidad, a diferencia de las pilas y baterías convencionales, que contienen una cantidad limitada de reactivos y por tanto de energía disponible.

Conocidas desde el siglo XIX, la tecnología de las pilas de combustible progresó con rapidez impulsada por el programa espacial de Estados Unidos, iniciado hace cuatro décadas.

Básicamente, una pila de combustible consta de una alimentación de combustible y comburente, de un ánodo y un cátodo y de un electrolito que separa ambos en cuyo conjunto se producen las reacciones electroquímicas. El oxígeno del aire es el comburente habitual. Sin embargo, son varios los combustibles aplicables, bien de forma directa o indirecta: hidrógeno, monóxido de carbono, amoniaco, hidrocarburos (metano, fracciones petrolíferas) o metanol. De

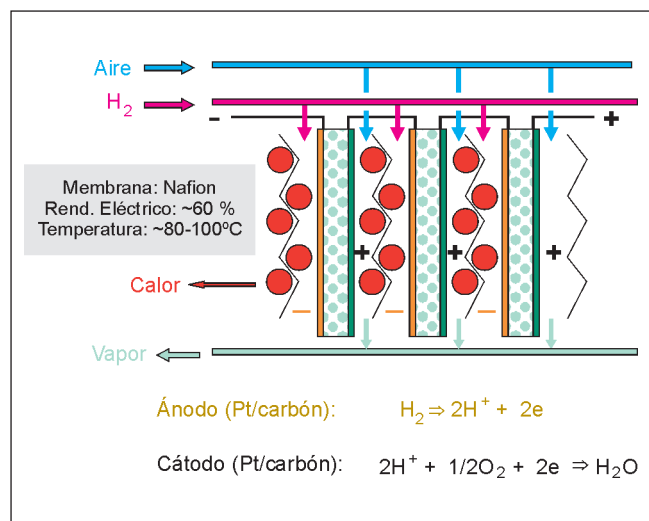


Figura 10. Esquema de una pila de combustible de membrana polimérica.

todos ellos, el hidrógeno, y en algunos casos el monóxido de carbono (pilas de carbonatos fundidos) son los únicos que pueden convertirse de forma eficaz en el ánodo de las pilas, con los electrocatalizadores actualmente disponibles. Algunos de los restantes combustibles, como el metanol se han alimentado directamente a pilas de combustible experimentales, aunque presentan todavía deficiencias en cuanto a la eficacia de conversión. Por ello, para su uso, han de transformarse previamente en hidrógeno a través de un proceso de reformado, que implica la instalación de un reactor catalítico adicional.

Se han desarrollado diferentes tipos de pilas que se diferencian tanto en el tipo de combustible (hidrógeno, monóxido de carbono, amoníaco) como en el electrolito (membranas poliméricas, carbonatos fundidos, alcalinas, ácido fosfórico, óxidos sólidos).

Como ejemplo, en la Figura 10 se muestra el esquema de una pila de membrana polimérica, en la que los electrodos, de carbón activado conteniendo una pequeña proporción de platino o de otros metales nobles que intervienen como electrocatalizadores, están unidos por una membrana de un polímero fluorado que actúa como electrolito y permite el paso de los iones entre los electrodos.

Una de las principales ventajas de las pilas de combustible es su elevada eficiencia energética con un aprovechamiento eléctrico del 40-60 % del poder calo-

rífico inferior del combustible, según los tipos de pilas. Además, en las pilas que operan a temperaturas elevadas (carbonatos fundidos y óxidos sólidos) es posible la recuperación de la energía perdida en forma de calor, en sistemas de cogeneración, elevándose la eficiencia global hasta el 60-80 %, considerablemente superior a la de los procesos térmicos convencionales de generación de electricidad, limitados en su eficacia por el ciclo de Carnot. Otros aspectos positivos son su limpieza, la ausencia de partes móviles, la sencillez de operación y de mantenimiento, y los bajos niveles de ruido y de emisiones, lo que posibilita su instalación en zonas pobladas, próximas a los puntos de consumo, lo que reduce además los costes de transporte y las pérdidas durante el mismo. Los inconvenientes más notables son el elevado coste inicial, los requerimientos de resistencia de materiales y la elevada temperatura de trabajo que es necesaria en algún caso (p. ej. en las pilas de carbonatos fundidos o de óxidos sólidos, que requieren temperaturas de 600-650°C y 900-1000°C, respectivamente), y los problemas asociados con el almacenamiento de hidrógeno (recipientes a presión, criogénico, formación de hidruros, adsorción) o la alternativa ya mencionada de una etapa previa de reformado para la preparación del hidrógeno, tal como se muestra en la Figura 11, en la que se incluye también el inversor de corriente necesario para la transformación de la corriente continua proporcionada por la pila en corriente alterna.

Además de las aplicaciones en naves espaciales tripuladas y en submarinos, se han construido pilas de demostración de varios tipos, con potencias variables

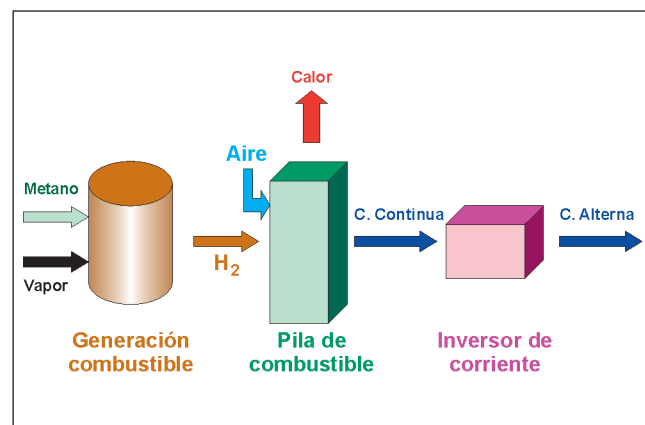


Figura 11. Esquema de una pila de combustible con los sistemas de generación de combustible y de transformación en corriente alterna.

desde algunos kW hasta varios MW, para el accionamiento de vehículos (automóviles, autobuses) o para la producción de electricidad en plantas localizadas de uso individual o en centrales para la conexión a la red eléctrica. También se ha ensayado a nivel experimental la integración de pilas de combustible en centrales térmicas de ciclo combinado para incrementar la eficacia global de conversión en electricidad.

Las inversiones en I+D que realizan principalmente empresas automovilísticas y de producción de energía son muy cuantiosas, superando los 200 millones de dólares anuales, teniendo como objetivo la aplicación a escala comercial en automóviles y para la generación de electricidad. Los retos principales para alcanzar este objetivo se encuentran en el abaratamiento de los costes del equipo, y el incremento de la vida útil de las pilas, que alcanza ya las 10000-50000 horas, según los tipos, en el desarrollo de nuevos electrocatalizadores capaces de convertir directamente metanol y otros combustibles y en los métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Es previsible que se requieran todavía algunos años para puedan implantarse a escala comercial tanto para el accionamiento de vehículos terrestres como para la producción de electricidad en plantas fijas.

Energía de fusión nuclear

La fusión nuclear, unión de núcleos de elementos ligeros como el hidrógeno, para dar lugar a otros núcleos de mayor masa, se considera como una fuente de energía casi inagotable, dada la abundancia de hidrógeno en la naturaleza. Por esta razón, casi podría incluirse entre las energías renovables. La fusión nuclear es el proceso que genera la energía liberada en las estrellas y, en definitiva, la que posibilita la vida en nuestro planeta. Su potencial es tan grande que cuando se dispusiera de la tecnología necesaria, se podrían cubrir sin dificultad las necesidades energéticas en los próximos siglos.

Además de disponerse de materia prima casi ilimitada, la fusión nuclear presenta como ventajas frente a los procesos de fisión empleados actualmente para la obtención de energía su mayor seguridad, al no

depender el proceso de un tamaño crítico del sistema, y que no se generan residuos de alta actividad.

El mayor obstáculo para su desarrollo radica en las dificultades tecnológicas para llevarla a cabo, ya que se requieren temperaturas del orden de decenas de millones de grados para que los núcleos atómicos se encuentren en estado de plasma, separados de los electrones, y posean energía suficiente para vencer las fuerzas de repulsión y alcanzar una concentración adecuada para la fusión. Ningún material es capaz de soportar esas temperaturas por lo que ha sido preciso desarrollar métodos de confinamiento del material fusionable que no requieren contacto físico con otros materiales (confinamiento magnético o inercial) así como procedimientos para la extracción de la energía liberada en el proceso.

Se han logrado avances notables en grandes equipos (*tokamaks*) construidos en Estados Unidos, Japón, Rusia y la Unión Europea, formados por grandes anillos toroidales en los que tiene lugar el confinamiento magnético. Sin embargo, las inversiones necesarias han sido tan elevadas que se ha acordado aunar los esfuerzos construyendo una máquina única de gran tamaño, el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), para tratar de alcanzar la ignición, es decir, la generación en el proceso de una cantidad de energía al menos igual a la que hay que aportar para lograr las temperaturas mencionadas.

A pesar de estos avances, se prevé que la energía de fusión no será comercial antes de la segunda mitad del siglo XXI.

INDUSTRIA QUÍMICA. LA QUÍMICA VERDE

La industria química utiliza muchas materias primas naturales, algunas de ellas escasas, y genera productos residuales que pueden ser tóxicos o peligrosos o dar lugar a problemas de contaminación importantes en la atmósfera, aguas o suelos.

Uniéndose a los movimientos de protección medioambiental y de sostenibilidad, la industria química ha adoptado iniciativas colectivas para reducir

los impactos sobre las materias primas y el medio ambiente, introduciendo continuamente mejoras en la eficacia de los procesos, la reducción de emisiones, la seguridad y la eficiencia energética.

Las primeras acciones de la industria para reducir el impacto ambiental de su actividad consistieron en la implantación de soluciones de “fin de tubería”, es decir, de tratamiento de los efluentes y residuos para minimizar su efecto. Tras lograr avances notables en esta dirección, la atención se ha desviado en dos sentidos: por una parte, hacia el propio proceso, modificándolo para aumentar su eficacia y obtener menos residuos; por otra, hacia el seguimiento del producto fabricado o posteriormente transformado en otros productos de consumo, hasta que se convierte finalmente en un residuo o es reciclado, es decir, analizando su ciclo completo de vida.

La investigación en el sector químico también ha orientado sus líneas de trabajo en esta misma dirección, ensayando nuevas vías de síntesis que constituyan la base de procesos con menor consumo de materias primas, más seguros, que den lugar a menos subproductos o residuos y cuyos productos finales sean también más seguros e inocuos. En los últimos años se ha acuñado la denominación de “Química Verde” para definir este movimiento que trata de ser una contribución más hacia un desarrollo sostenible. Con esta denominación se han celebrado ya Simposios y Congresos Internacionales y han aparecido nuevas revistas científicas. Asimismo, se observa ya la incorporación de este nuevo enfoque en los programas de formación de los futuros profesionales.

Algunos de los principios y objetivos que persigue la química verde son:

- **Economía atómica:** Los métodos de síntesis deben diseñarse de modo que los átomos presentes en las materias primas o reaccionantes se incorporen en la mayor medida posible en los productos finales de interés.
- **Catálisis:** Los procesos catalíticos suelen ser más selectivos que los no catalíticos, contribuyendo así a la economía atómica. Asimismo, el uso de catalizadores permite aplicar condiciones de operación más suaves.
- **Uso de materias primas renovables:** Contribuye a evitar el agotamiento de materias primas.
- **Diseño de productos químicos más seguros:** Para

una finalidad dada deben seleccionarse o diseñarse compuestos de menor toxicidad y cuya utilización implique menos riesgos.

- **Diseño de productos finales degradables:** Los productos deben diseñarse de modo que al final de su vida útil sean fácilmente degradables o reciclables, no persistiendo en el medio ambiente.

- **Incremento de la seguridad de los procesos y productos:** Reducción del riesgo de accidentes, tanto en el proceso de producción como en el manejo de los productos finales, incluyendo escapes, explosiones e incendios.

- **Empleo de disolventes y otras materias auxiliares más seguros e inocuos:** Tendencia a la sustitución de los disolventes orgánicos, generalmente tóxicos, inflamables y contaminantes, por medios acuosos o por fluidos en condiciones supercríticas.

- **Reducción de las etapas de síntesis que implican derivados para protección/desprotección de grupos funcionales o modificación de propiedades:** Estas etapas, muy empleadas en síntesis orgánica, suelen requerir el empleo de reaccionantes adicionales y frecuentemente originan nuevos productos residuales.

- **Mejora de la eficiencia energética:** Minimización de pérdidas, recuperación de la energía, sistemas de cogeneración. Procesos que operan en condiciones próximas a la temperatura y presión ambientes.

- **Mejora del control de procesos que permita un análisis en tiempo real para evitar la contaminación:** Detección de las condiciones que pueden dar lugar a la aparición de sustancias peligrosas para evitar su formación.

Como ejemplo de estas acciones se mencionan a continuación dos tecnologías introducidas recientemente en la industria química: la utilización de fluidos en condiciones supercríticas y la catálisis asimétrica o catálisis quirál.

Procesos que utilizan fluidos en condiciones supercríticas

Los fluidos supercríticos (fluidos que se encuentran a temperatura y presión superiores a los valores críticos) presentan unas propiedades bastante diferentes a las que corresponden a los estados líquido y gas, que resultan de gran interés para su aplicación en ciertos procesos: entre ellas pueden destacarse la existencia de

una sola fase fluida, presentar densidades próximas a las de los líquidos y la miscibilidad completa con compuestos orgánicos.

Los dos compuestos más adecuados para lograr un medio en condiciones supercríticas son el dióxido de carbono y el agua, a causa de su abundancia, bajo coste, relativa inocuidad y buenas propiedades críticas.

Así, el dióxido de carbono supercrítico (a temperatura y presión superiores a 31°C y 72,9 bar, respectivamente) se utiliza para la extracción de sustancias orgánicas contenidas en sólidos, como aceites, esencias o aromas (p. ej. descafeinado del café), sustituyendo a disolventes orgánicos como el hexano o el tricloretileno, que se empleaban anteriormente. Asimismo, se aplica como medio para llevar a cabo reacciones orgánicas en ausencia de otros disolventes y reacciones catalizadas por sólidos, en las que se facilita la transferencia de materia y se reduce la desactivación del catalizador. Además de su inocuidad, una vez finalizado el proceso, el dióxido de carbono se recupera con facilidad por simple reducción de la presión.

Del mismo modo, el agua supercrítica (temperatura y presión superiores a 374°C y 222 bar, respectivamente) se emplea también como medio para llevar a cabo reacciones orgánicas o para la degradación por oxidación de contaminantes complejos y refractarios a otros tratamientos, como los policlorobifenilos (PCB's), plaguicidas, propulsores de cohetes, etc., que tiene lugar con gran rapidez y que conduce a productos finales inocuos.

Catálisis asimétrica o quiral

En los últimos años se ha dedicado gran esfuerzo al desarrollo de un tipo especial de catalizadores altamente selectivos denominados catalizadores asimétricos o quirales por permitir la obtención preferente de uno de los dos isómeros ópticos de un compuesto quiral.

Los compuestos quirales son aquellos que contienen uno o más átomos quirales (generalmente de carbono). Átomo quiral es aquel que está unido a otros átomos o grupos sustituyentes diferentes entre sí (cuatro en el caso del carbono). Cuando una molécula

contiene un átomo quiral, presenta isomería óptica o estereoisomería, ya que existen dos isómeros que tienen iguales grupos atómicos pero que no son superponibles, siendo uno de ellos la imagen especular del otro, lo mismo que ocurre con las manos (el adjetivo quiral deriva precisamente del griego *cheir*, mano). Una de las propiedades que diferencian a los isómeros ópticos es su acción sobre la luz polarizada, de donde deriva el nombre de este tipo de isomería.

Muchos compuestos naturales son quirales; así ocurre con los aminoácidos o los ácidos nucleicos. Además, existe una selectividad natural hacia uno de los isómeros, de modo que, por ejemplo, las proteínas están formadas exclusivamente por L-aminoácidos, mientras que los ácidos nucleicos solo presentan el isómero D. También muchas moléculas con actividad biológica, empleadas como fármacos o plaguicidas son quirales y solamente uno de los isómeros ópticos es activo, siendo el otro inactivo e incluso, en ocasiones, perjudicial. Un ejemplo dramático de la relación entre actividad farmacológica y estructura quiral fue la aplicación en los años sesenta de un fármaco de propiedades sedantes, la talidomida, en su forma racémica a mujeres embarazadas, dando lugar a niños con malformaciones. De los dos enantiómeros del compuesto, la R-talidomida posee las propiedades sedantes mientras que el isómero S fue el causante de las malformaciones.

Los enantiómeros de una sustancia quiral tienen propiedades químicas muy similares, aunque pueden presentar algunas diferencias de comportamiento; así el S-limoneno huele a limón, mientras que su otro

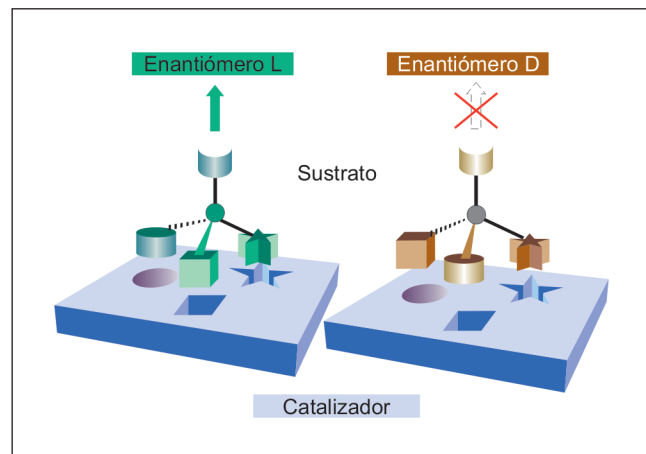


Figura 12. Acción estereoselectiva de un catalizador.

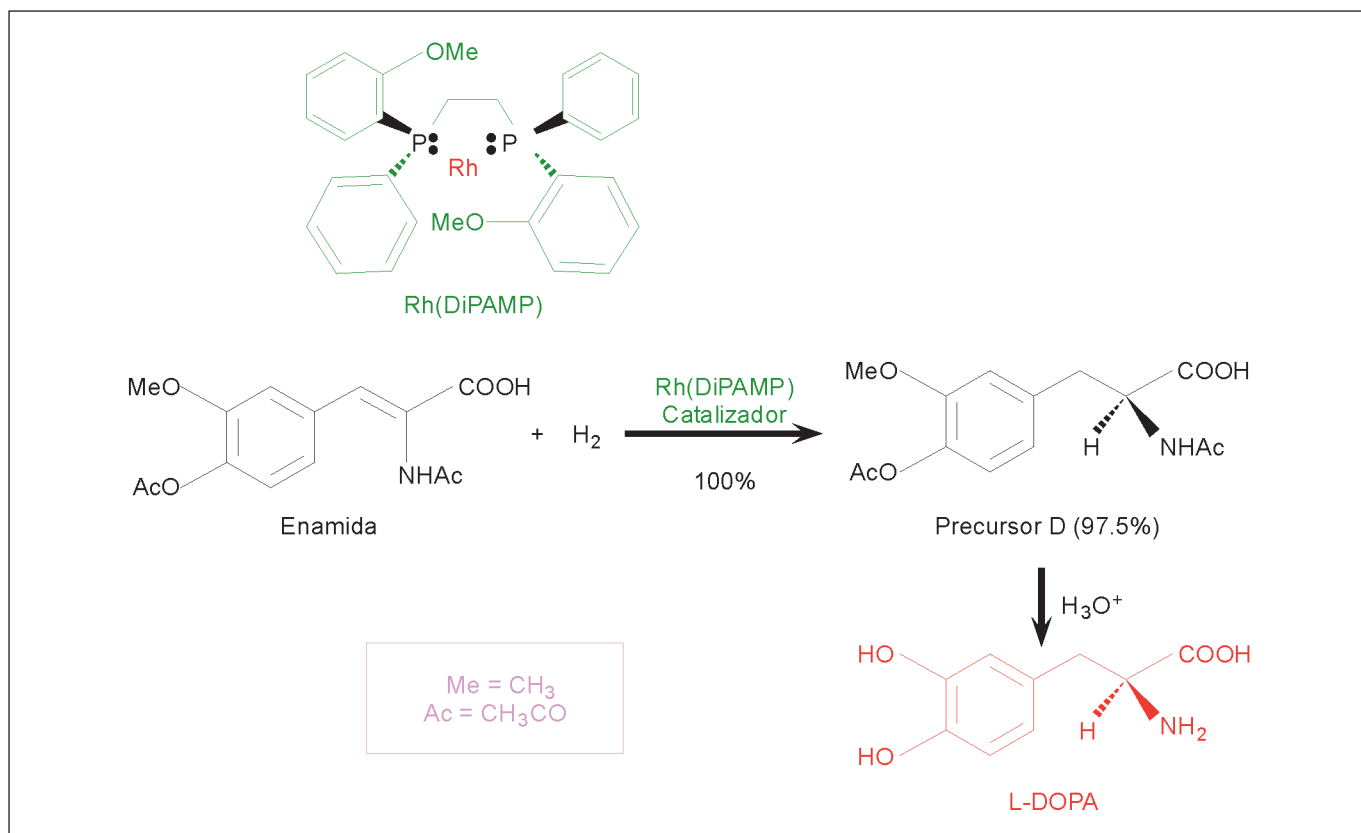


Figura 13. Obtención enantioselectiva de L-Dopa mediante un catalizador quiral de rodio.

isómero, el R-limoneno, huele a naranja. Debido a su semejanza química, cuando se prepara una sustancia quiral por vía química ordinaria se obtiene una mezcla equimolar de los dos isómeros ópticos, denominada mezcla racémica. Sin embargo, las enzimas, los catalizadores biológicos, no solo son capaces de sintetizar compuestos en condiciones muy suaves de temperatura, sino que además orientan la síntesis selectivamente hacia uno de los isómeros, mediante la interacción espacial de los centros activos de la enzima con los grupos funcionales reactivos del sustrato, como se muestra esquemáticamente en la Figura 12.

El comportamiento de las enzimas ha servido como modelo de referencia en el conjunto de investigaciones llevadas a cabo en las últimas décadas para conseguir la síntesis de compuestos quirales mediante catalizadores asimétricos basados en complejos organometálicos.

Precisamente, el premio Nobel de Química 2001 se ha concedido a tres investigadores, W.S. Knowles, R. Noyori y B. Sharpless, por sus aportaciones en el

campo de la catálisis asimétrica. Los dos primeros llevaron a cabo en la década de los años 60 estudios fundamentales sobre reacciones de hidrogenación asimétrica que además permitieron la implantación de procesos industriales que han conducido a la fabricación de fármacos como el naproxeno (antiinflamatorio de uso muy extendido), la L-Dopa, aminoácido esencial para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, otros aminoácidos o antibióticos como el carbapenem o la levofloxacina, así como muchos otros compuestos como (-)-mentol, aromas o feromonas.

Por su parte, Sharpless amplió las aplicaciones de la catálisis quiral a las reacciones de oxidación para la obtención de epóxidos y otros compuestos, empleando catalizadores que contienen elementos de carácter oxidante, como el titanio, el osmio o el manganeso. También en este caso se han desarrollado procesos industriales que permiten obtener compuestos de interés con gran selectividad, como por ejemplo, derivados del glicidol, que son punto de partida para la preparación de fármacos β -bloqueantes.

Aunque la acción de estos catalizadores es compleja, su efecto se fundamenta en una estructura tridimensional catalíticamente activa, que puede estar anclada sobre un soporte, y que también contiene centros quirales, sobre la cual los reaccionantes solo pueden combinarse en una configuración espacial que conduce de forma preferente hacia uno de los estereoisómeros.

Como ejemplo, en la Figura 13 se muestra la estructura del catalizador de rodio unido a un complejo de difosfina quiral que permitió a Knowles y sus colaboradores en la empresa Monsanto la producción selectiva de un precursor quiral de la L-Dopa (compuesto D en la figura) con un rendimiento superior a 97 % por hidrogenación de una enamida.

Las síntesis quirales tienen su principal aplicación en química fina o farmacéutica, y constituyen además un ejemplo de procesos de la denominada “química verde”, ya que requieren un menor consumo de materias primas (aproximadamente 50 % inferior al correspondiente a una síntesis no enantioselectiva) y evitan la formación de una cantidad equivalente de subproductos o residuos.

La industria farmacéutica se orienta decididamente en esta dirección, siendo creciente la producción de fármacos con estructura quiral en preparaciones que contienen solamente el isómero activo. Se estima que en el año 2000 un tercio de las ventas de fármacos correspondió a formulaciones de este tipo.

CONSIDERACIONES FINALES

El concepto de sostenibilidad ha surgido como una consecuencia de los fuertes impactos que la actividad humana ha tenido sobre las materias primas y sobre el medio ambiente, que se han extendido a escala planetaria, con particular intensidad durante la segunda mitad del siglo XX. Por su carácter, no resulta fácil cuantificar la sostenibilidad o no sostenibilidad de cualquier actuación humana, aunque se avanza con rapidez en la definición de índices que permitan la medida objetiva de los efectos. Así, en un reciente estudio se cuantifica cómo hacia 1960 la demanda de recursos naturales representaba un 70 por 100 de la capacidad regenerativa del planeta; posteriormente

esta demanda se acelera, de modo que en 1999 la explotación de recursos naturales supera en un 20 % la capacidad de regeneración de la biosfera. De la misma manera, se debate en ámbitos académicos cómo deben incorporarse los conceptos relacionados con la sostenibilidad a la formación de los futuros titulados, que serán los responsables de que en el futuro pueda convertirse en realidad lo que actualmente es solo un objetivo.

El aumento de la población mundial y el previsible crecimiento económico, especialmente en zonas poco desarrolladas del planeta, aseguran que la demanda de energía y de otras materias primas no energéticas continuará aumentando en las próximas décadas, con la consiguiente producción de residuos. Todos estos factores seguirán afectando negativamente al entorno natural y harán difícil la consecución de los objetivos de un desarrollo sostenible. La mejora de la eficacia de los métodos de producción de energía y de transformación de materias primas, así como la introducción de nuevas tecnologías que actúen en la misma dirección, son los instrumentos que pueden contribuir de forma eficaz a aproximarse a los objetivos de sostenibilidad, o, al menos, a reducir la velocidad de deterioro de los recursos naturales y del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.E.M.A. (Agencia Europea del Medio Ambiente), *Medio ambiente en Europa: Segunda evaluación*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2001
2. AHLBERG, P. *Catalytic asymmetric synthesis*. Advanced information on the Nobel prize in Chemistry 2001. Royal Swedish Ac. of Sciences, Estocolmo (2002)
3. ALLEN, D.T. y SHONNARD, D.R. (Eds.), *Green Engineering: Environmentally conscious design of chemical processes*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (2001)
4. ANASTAS, P.T. y WARNER, J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford U.P., Nueva York (1998)
5. CHEN, N. Y., *Energy in the 21st Century*. Chem. Innovation, **31(1)**, 15-20 (2001)
6. FORO NUCLEAR, *Energía 2001*. Madrid (2001)
7. GUTIÉRREZ JODRA, L., *En torno a la energía*.

- Real Academia de Ciencias, Madrid, 1997
8. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *World Energy Outlook 2000*, París (2000)
 9. KNOWLES, W. S., *Asymmetric hydrogenations (Nobel lecture)*. Angew. Chem. Int. Ed., **41 (12)**, 1998-2007 (2002)
 10. KORDESCH, K.V. y TAMBASCO, J.C., *Fuel Cells*, en *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (5ª Ed.)*, Vol. 12. VCH, New York (1989)
 11. NATTRASS, B. y ALTOMARE, M., *The natural step for business*. New Society Pub. Gabriola Ild., B.C., Canada (1998)
 12. NOYORI, R., *Asymmetric catalysis: Science and opportunities (Nobel lecture)*. Angew. Chem. Int. Ed., **41 (12)**, 2008-2022 (2002)
 13. RITTER, S.K. *Green chemistry*. Chem. Engng. News, **79 (21)** (16 jul) 27-34 (2001)
 14. SHARPLESS, K.B., *Searching for new reactivity (Nobel lecture)*. Angew. Chem. Int. Ed., **41 (12)**, 2024-2032 (2002)