

Optimización de la explotación de los combustibles fósiles hacia emisiones cero en CO₂

EL PASO DE LA COMBUSTIÓN CONVENCIONAL A LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

J. M. Martínez-Val Piera

Ingeniero de Minas

M.Sc. Colorado School of
Mines

Fundación para el Fomento
de la Innovación Industrial

1. Introducción y planteamiento

La vía actual de aprovechar los hidrocarburos para la Automoción se basa en su combustión en motores de explosión de diverso tipo, con el factor común de emitir por el tubo de escape 44 gramos de CO₂ por cada 12 gramos de carbono contenidos en el carburante. Esto comporta que la mayor fuente de gas de efecto invernadero sea una actividad muy atomizada, contra la que no parece posible ninguna actuación tecnológica para evitar la emisión o, al menos, capturarla y confinarla.

En este artículo se presenta una vía alternativa futura para el aprovechamiento de los hidrocarburos en la Automoción, basada en los avances tecnológicos efectuados en diversos campos, y que podrían confluír en un sector energético-industrial totalmente nuevo, con no menos impacto económico que el hoy día represento por esos dos excepcionales macrosectores que son la industria del automóvil y los mercados de petróleo y gas. Esta nueva vía está inserta en la llamada *economía del hidrógeno* y en las técnicas emergentes de captura y secuestro de CO₂.

Para presentar esta alternativa se parte de un análisis somero de la situación actual en lo referente a la problemática de la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera; se continúa con un análisis básico de la descarbonización de combustibles fósiles y la obtención de H₂ a partir de ellos; y se plantea como nu-

do de la cuestión el balance energético de esta alternativa. Por último, se señalan sus implicaciones medioambientales esbozando sus posibles repercusiones socio-económicas.

La problemática del efecto invernadero

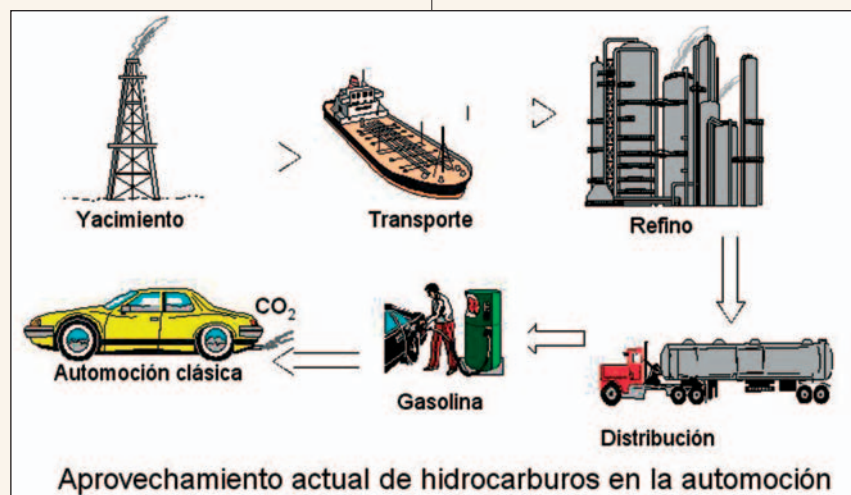
La tasa actual de emisiones antropogénicas de CO₂ es aproximadamente un 25% de la tasa natural de reciclado del CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis terrestre (1). Aunque en el ciclo completo carbono-CO₂ se han de contabilizar además los intercambios físicos y químicos con los océanos, la cifra anterior revela la existencia de una fuerte perturbación artificial en un ciclo natural cuyo componente atmosférico juega un papel importante en el efecto invernadero y, por ende, en el calentamiento del planeta. Las cifras de concentración molar de CO₂ en el aire han crecido con tendencia cada vez más acentuada desde principios del siglo XX, superando ya las 380 ppm molares (2-7).

Ello ha movido a definir limitaciones para las emisiones de CO₂ y, por otra parte, ha promovido la I+D en varias líneas, con objeto de satisfacer

la demanda socioeconómica de energía, sin perturbar un mecanismo como el efecto invernadero, de gran repercusión potencial en el cambio climático.

Por otro lado, el 80% de la energía total generada y consumida por la humanidad procede de combustibles fósiles, en cuya combustión se genera CO₂ (8). Descontada la biomasa tradicional (leña, etc) *los combustibles fósiles representan el 90% de la energía* que podría denominarse artificial o tecnológica. Más aún, los combustibles fósiles, en particular los derivados del petróleo, satisfacen casi el 100% de muchos de los usos de transporte, donde la emisión de CO₂ resulta muy atomizada. De hecho, el sector Transporte no es de los regulados por las legislaciones vigentes europea y española sobre Derechos de Emisión de CO₂ y, sin embargo, contabiliza el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (9).

La gran ventaja del gas natural y de los derivados del petróleo es precisamente su facilidad de combustión en los motores y máquinas apropiados, además de su facilidad de transporte, almacenamiento y distribución.



Al ser materias primas (o derivadas) idóneas par dichas máquinas (p.e., los motores de combustión interna) resultan muy difíciles de sustituir, salvo cambios drásticos en la maquinaria, tendencia que ya ha comenzado, y que tiene como elemento emblemático el automóvil de hidrógeno, movido por un motor eléctrico accionado por la electricidad generada en una pila de combustible activada por hidrógeno (10-15).

Un nuevo paradigma: la economía del H₂

El cuello de botella de la economía del hidrógeno es su producción. Todo el hidrógeno de la Tierra se encuentra combinado con otros elementos químicos para formar diversos compuestos, en particular H₂O, hidrocarburos, hidratos de carbono, carbonatos, sulfatos, etc. La producción de hidrógeno elemental, H₂, requiere métodos de reducción química que son energéticamente caros. (De hecho, en todos ellos se consume más energía que la obtenida posteriormente, al ocurrir la oxidación del H₂ generado).

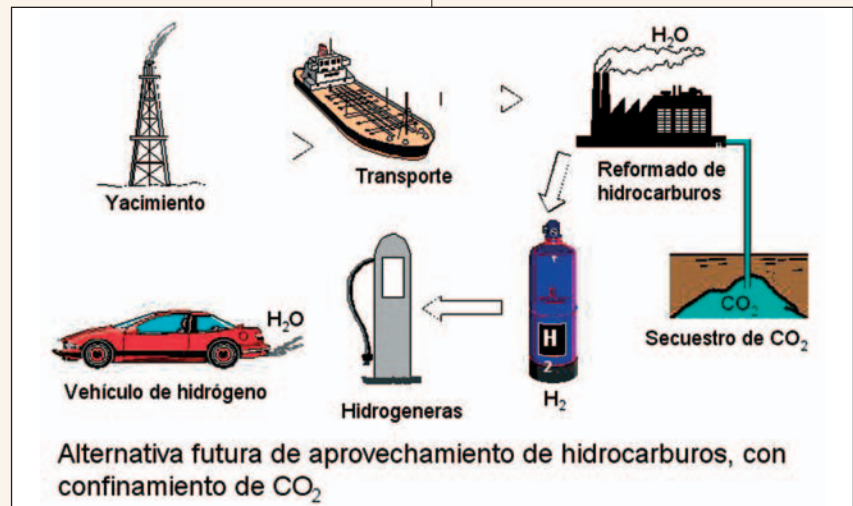
En un futuro más o menos remoto, el H₂ se obtendrá de la fusión nuclear y de energías renovables, por medio de electrolisis y de procedimientos termoquímicos (16). En la actualidad, el método más barato y tecnológicamente desplegado es el reformado de gas natural con vapor de agua a muy alta temperatura. También es digna de mencionar la gasificación de carbón por métodos análogos. Ello permite obtener H₂, que posteriormente podría usarse para la propulsión de vehículos eléctricos con pila de combustible, de los cuales hay ya varios prototipos en el mundo (15).

Por la disponibilidad de combustibles fósiles (en comparación con las potencias desplegables por las renovables en la primera mitad del siglo XXI) los citados combustibles deberían jugar un papel fundamental en el paso desde la situación actual, dominada por la combustión clásica, a la *economía del hidrógeno* (17-20) (cuya tecnología, muy posiblemente, requerirá menos tiempo para llegar a la

plena madurez comercial que la fusión nuclear o las energías solares masivamente desplegadas).

Sin embargo, de obtenerse el H₂ por reformado de hidrocarburos o por gasificación de carbón (21-30), en la etapa de producción del H₂ se produce paralelamente CO₂ (en dos pasos, siendo el primero la producción de CO). Ello significa que no se reduce para nada el nivel de emisio-

no imposible) recuperar el CO₂ emitido en los humos de escape (que mayoritariamente son N₂, salvo en muy contadas ocasiones en que la combustión no es con aire, sino con O₂). Por descontado, la recuperación del CO₂ de los tubos de escape de los vehículos de automoción no es técnicamente planteable, por lo que *a priori* esta técnica quedaría para sectores como el de generación de energía



nes sino, al contrario, podría incluso aumentar, por las ineficiencias de los procesos adicionalmente intercalados en la cadena de explotación de la energía química contenida en los combustibles fósiles.

Por otro lado, y en un escenario más propio de las grandes centrales de combustión para producción de electricidad, se ha pensado en la posibilidad de capturar el CO₂ existente en los humos de escape y confinarlo en algún lugar no conectado a la atmósfera (31-38). Se han propuesto soluciones submarinas (ecológicamente controvertidas) y soluciones subterráneas (en almacenamientos similares a los de gas natural y otros). A esta técnica se le denomina, por analogía a la terminología anglosajona, *captura y secuestro de CO₂*. De hecho, y a instancias de Estados Unidos, se ha constituido recientemente el "Carbon Sequestration Leadership Forum" (31), para poner en común los avances científicos realizados en este campo, pensado para aquellas grandes instalaciones donde sería técnicamente factible (al menos,

eléctrica (que si están regulados por la Directiva del Comercio de Emisiones).

Tras esta exposición introductoria acerca de estas dos grandes líneas de la I+D del futuro, *Hidrógeno* por una parte, *secuestro de CO₂* por otra, cabe exponer sinópticamente el objetivo de este trabajo: Analizar las repercusiones energéticas, ecológicas y económicas de un cambio drástico en el sector de combustibles fósiles, y fundamentalmente hidrocarburos, para generar H₂ a partir de ellos por los métodos apropiados, incluyendo en estos métodos (reformado, gasificación) la captura in situ del CO₂ y su posterior confinamiento en un almacenamiento *ad hoc*.

En el sector Transporte se usaría el H₂ producido, distribuible tanto por gasoducto como embotellado a presión. Otras opciones (almacenamiento criogénico, en matrices metálicas, etc.) son posibles, pero no parecen tan adecuadas para un despliegue masivo de la economía del hidrógeno (recuérdese que el punto crítico del H₂ está a 33 K, lo que quiere decir

que no puede existir licuado por encima de 240 °C bajo cero).

Por otro lado, el carbono de los combustibles fósiles habría dado CO₂, y su energía de oxidación se habría aprovechado en la propia instalación reformadora o gasificadora, para después ser capturado y confinado.

Ello supondría el mantenimiento de una sociedad de la combustión, pero sin el gran inconveniente de la liberación masiva de CO₂. Por descontento, en las evaluaciones a realizar existen muchas incertidumbres, siendo quizá la mayor de ellas el cubaje total mundial del que podría disponerse para el confinamiento del CO₂. Es evidente que existen numerosos yacimientos de gas natural que se irán agotando y podrían proporcionar un importante volumen a tal efecto. Como primera opción, cabría pensar en minas de carbón fuera de explotación.

En todo caso, se trataría de una evolución tecnológica a largo plazo pues debería acompañar el desarrollo de las pilas de combustible para Automoción, los reformadores que incluyeran captura de CO₂, y las técnicas de transporte de éste y su almacenamiento indefinido.

Una solución de este tipo, que podría juzgarse utópica, tiene, sin embargo, bases científicas y técnicas in-

questionables. *A priori*, el mayor problema serían sus implicaciones económicas. Estas posiblemente parecerán no asumibles en un principio. Con la evolución social por un lado, y tecnológica por otro, la perspectiva económica irá también evolucionando y se podrá contribuir así a la lucha contra el incremento del efecto invernadero. Para posibilitar la evolución tecnológica, crucial además para avanzar en la curva de aprendizaje y arrancar las ventajas de la economía de escala, serán necesarios programas y proyectos de I+D que aborden los aspectos más novedosos y críticos de esta iniciativa. Muchos proyectos de este tipo están ya en marcha, e internacionalmente se auspician a través del citado "Carbon Sequestration Leadership Forum" (31) y la "Internacional Partnership on the Hydrogen Economy" (17). En la Unión Europea se puso en marcha en enero de 2004 la "Plataforma Europea para el Hidrógeno y las Pilas de Combustible", participando a su vez en la Partnership mencionada (14,15).

Otros proyectos son esencialmente comerciales, como los llevados a cabo por grandes fabricantes de vehículos y corporaciones del sector petrolero, habiendo adquirido compañías de pilas de combustible para una

mejor integración de estos esfuerzos.

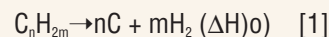
Todo ello significa un gran interés por la Economía del hidrógeno, cuya fase crítica es la producción del H₂ elemental, como ya se ha comentado.

A priori y hasta la fecha, la transición hacia esa economía no parece contar sino marginalmente con el gas natural para generar H₂, por entenderse que los combustibles fósiles (y sobre todo los derivados del petróleo) tienen sus formas clásicas de explotación, y que difícilmente pueden éstas ser optimizadas. En este artículo se pretende demostrar que hay campo para una explotación más eficiente energéticamente, mucho más limpia ambientalmente, y quizá no tan cara como cabría pensar a primera vista.

2. La descarbonación de los hidrocarburos

En el apartado anterior se ha hablado de la producción de H₂ a partir de los combustibles fósiles, como paso que permitiera la captura del CO₂ en la planta química de reformado o gasificación. Esta es, sin duda, actualmente, la vía más barata de producción de H₂, con un coste que es entre 1/4 y 1/6 del de obtención del hidrógeno a partir de renovables, básicamente por electrolisis.

Por lo que corresponde a hidrocarburos, además del reformado, existe una línea química alternativa para producir hidrógeno, basada en la pirólisis (39-44). La reacción es más difícil de dominar tecnológicamente, a pesar de ser menos endotérmica que el reformado (que se analizará detalladamente a continuación). En la pirólisis de los hidrocarburos la reacción general es:



que es endotérmica, según se señala con el incremento de entalpía, que es positivo. (En concreto, la reacción necesita exactamente el calor de formación del hidrocarburo, que es el liberado cuando se forma éste a partir de sus elementos químicos).

Para el metano, la energía absorbida por la reacción de descomposición es de 18 kcal/mol CH₄ (75 kJ/mol); 20,2 kcal/mol para el etano; 24,8 kcal/mol para el propano, y 30

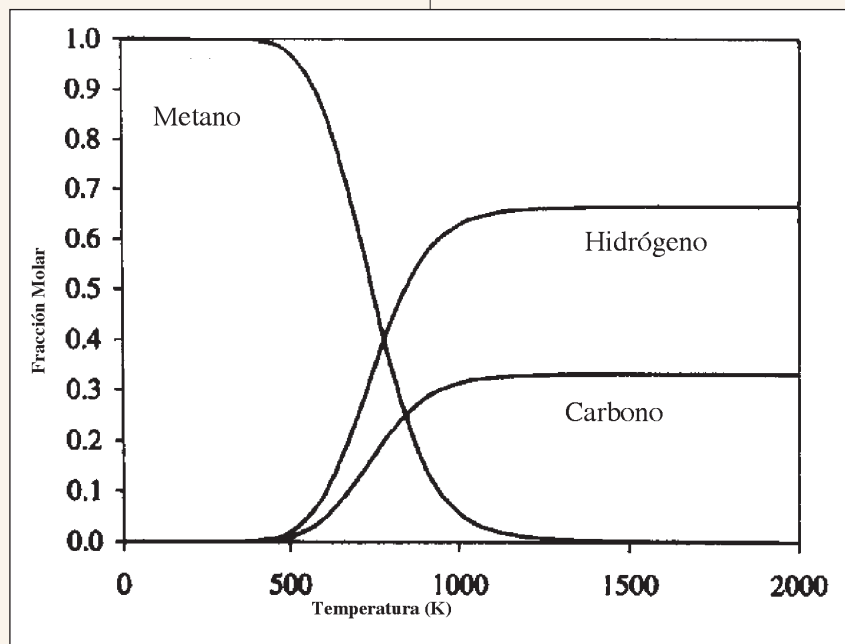


Figura 1. Fracciones molares en equilibrio en la formación/descomposición del metano (a 1 bar)

kcal/mol para el butano.

El mayor inconveniente de estas reacciones es que requieren muy altas temperaturas y se producen con un solo reactivo (es decir, no por combinación con otro, como es el caso del reformado). Las moléculas se escinden realmente cuando chocan, muy aceleradamente, con una pared muy caliente, por encima de 700 OC. En la figura 1 se muestra el equilibrio que se alcanzaría en la reacción de formación/descomposición del metano. Se aprecia que, por encima de 1.000 K, prácticamente todo el metano está escindido. Así pues, la técnica consiste en calentar el metano hasta esos niveles y dar tiempo a que se alcance el equilibrio.

La aplicación tecnológica de esta idea es la que dificulta su explotación pues se pierde mucha energía en hornos que funcionen siguiendo este esquema (por lo que se ha de proseguir con las investigaciones sobre este asunto). Hasta la fecha, los rendimientos de los sistemas pirolíticos son ligeramente superiores al 50%, definiendo el rendimiento como la energía extraíble del H₂ generado, respecto de la extraíble de todo el CH₄ consumido en el proceso. Este consumo tiene dos partes: el CH₄ verdaderamente descompuesto; y el CH₄ usado en combustión para calentar el horno de descomposición. Este último se convierte en H₂O y CO₂; por lo que habría que capturar y secuestrar este CO₂, separándolo del agua por condensación de ésta. Para ello sería bueno no utilizar aire como comburente, sino O₂, (sin N₂) con cierta cantidad de H₂O vapor para controlar la temperatura de la llama, pues de lo contrario, la combustión directa con O₂ produciría temperaturas de humos altísimas (por encima de 3.000 K) y los hornos serían carísimos por los materiales empleados. Esta técnica también es aplicable a los hornos de reformado.

Nótese un hecho importante, que impide que el rendimiento de la descomposición sea más alto: no se ha contabilizado la energía química contenida en el C elemental producido, que es muy grande. Sin embargo, esto da dos ventajas económicas im-

portantes:

- El secuestro del C, que es un sólido, es algo muy simple y, por tanto, no se necesita acudir a una técnica emergente y cara como la de captura y secuestro del CO₂.

- El C producido puede adquirir un valor importante por dos razones: en un futuro lejano, sin estar acuciados por el efecto invernadero, podría quemarse, obteniendo su energía correspondiente (393 kJ/mol). Pero además, el C puede servir como elemento de base para la industria de la química orgánica, lo cual puede ser aún de mayor valor en el futuro. En definitiva, el C queda como un activo al que se le podría asignar cierto valor económico.

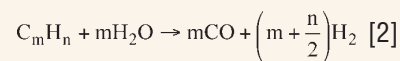
Aún con estas ventajas, la descomposición de los hidrocarburos está limitada en rendimiento por la razón antedicha de no emplearse (de momento) la energía del C, pues éste sería secuestrado (por cierto plazo, muy largo en términos económicos) para no producir CO₂.

3. Producción de hidrógeno por reformado de hidrocarburos y gasificación del carbón

La obtención de hidrógeno (H₂) a partir de hidrocarburos se basa en un proceso que comprende dos etapas (30,45): la primera de ellas, denominada "Reformado", tiene como principal característica su acentuado carácter endotérmico. En esta primera etapa se obtiene monóxido de carbono e hidrógeno en cantidades dependientes del combustible fósil, al reac-

cionar con vapor de agua.

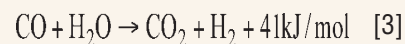
La expresión química genérica sería la siguiente



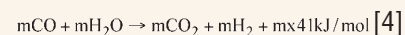
Independientemente de cual sea el combustible seleccionado, esta reacción es endotérmica. La entalpía de reacción dependerá del calor de formación del hidrocarburo en cuestión.

La segunda etapa del proceso es una oxidación total del monóxido de carbono a dióxido de carbono. La denominación anglosajona para esta etapa es de reacción "shift" (desplazamiento) que corresponde a la "Oxidación" total.

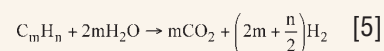
A diferencia del reformado, la oxidación es exotérmica. La reacción química que representa la fase de oxidación es:



Para que las ecuaciones [2] y [3] estén en armonía y puedan ser conjuguables, la ecuación [3] habría que reformularla de la siguiente manera:



Desde un punto de vista global, las ecuaciones [2] y [4], correspondientes a las etapas de reformado y oxidación, se pueden ensamblar dando como resultado la siguiente ecuación:



La descripción del proceso con su

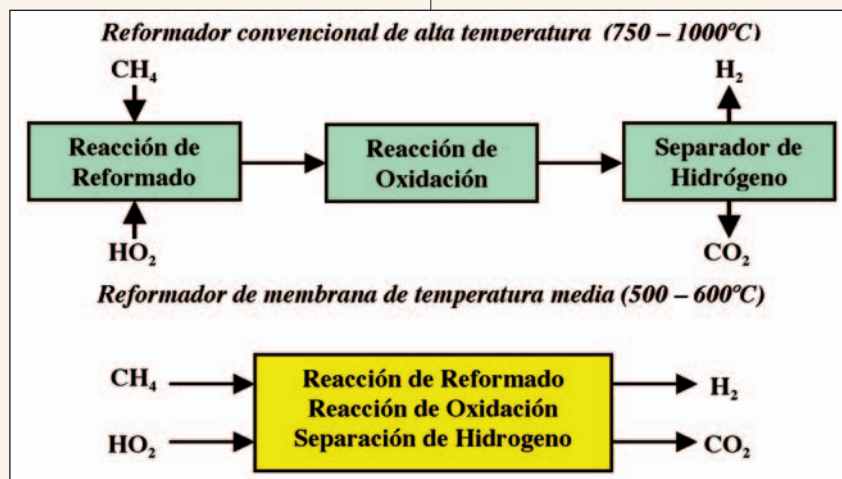


Figura 2. Esquema de funcionamiento de reformadores

Combustible	Fórmula representativa	Reacción completa	Calor endotérmico de la reacción kJ/mol comb.	Calor de combustión del H ₂ producido (PCI) kJ/mol comb.	% del calor endotérmico sobre el de combustión
Gas natural	CH ₄	CH ₄ +2H ₂ O →CO ₂ +4H ₂	165,0	968	17,0
GLP	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀ +8H ₂ O →4CO ₂ +13H ₂	486,6	3146	15,5
Nafta	C ₆ H ₁₄	C ₆ H ₁₄ +12H ₂ O →6CO ₂ +19H ₂	739,3	4598	16,1
Keroseno	C ₁₂ H ₂₆	C ₁₂ H ₂₆ +24H ₂ O →12CO ₂ +37H ₂	1433,0	8954	16,0
Carbón	C	C+2H ₂ O →CO ₂ +2H ₂	90,0	484	18,6

Tabla 1. Reacciones de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles y valores energéticos asociados

división en dos etapas se ha hecho en primer lugar con una finalidad ilustrativa de la cinética química involucrada. En segundo lugar, sirve para introducir las dos maneras prácticas de acometer el objetivo de “reformar” y “oxidar”. En la actualidad existen dos procesos alternativos. El reformado convencional en el que las etapas de “reformado”, “oxidación”, y posterior separación del H₂ (46) se hacen de manera independiente, siguiendo el diagrama operativo, de la figura 2 y el reformado en una sola etapa con membranas de paladio.

Es importante destacar que el reformado convencional se efectúa a temperaturas entre 750 y 1.000 °C.

En la otra alternativa, de reciente concepción, la de reformado por membrana, (47), las tres etapas se realizan a la vez, incluyendo la separación del H₂ y CO₂. Ello se debe a la utilización de membranas de paladio que dejan pasar el H₂, pero no las otras sustancias de la reacción, por lo que se escapa selectivamente el H₂, y la reacción está permanentemente desplazada hacia la derecha. La otra gran ventaja de la alternativa de reformado por membrana es la menor temperatura a la que está sometido el equipo, pues requiere valores entre los 500 y 600 °C.

Cabe una última aclaración sobre este proceso: en el caso de usar crudo petrolífero, y sobre todo, carbón, es preciso limpiar éstos de contaminantes, sobre todo, azufre. Esto es una técnica ya dominada, de la cual el mejor ejemplo industrial es **Elcogás** en Puertollano (48), donde la gasifi-

cación del carbón va acompañada de su desulfuración completa, obteniéndose una corriente de ácido sulfúrico como subproducto.

4. Balance energético

La utilidad de los combustibles se debe medir en función de la energía realmente aprovechada en el fin al que se aplican, más el importe económico que representa su explotación a través de una tecnología dada. Hasta hace poco, en estas cuestiones económicas no se incluían factores de tipo ambiental y de prevención de contaminantes, pero en los últimos decenios este programa ha cambiado radicalmente. En las diversas aplicaciones energéticas (Transporte, generación de energía eléctrica, usos térmicos residenciales, etc.) se han ido planteando exigencias cada vez mayores en la calidad de los combustibles, en primer lugar para evitar, o al menos mitigar, los efectos locales de la contaminación. Esto ha llevado a programas tales como la erradicación del carbón en las calderas urbanas de calefacción y agua caliente, a la aparición de la gasolina sin plomo o a las especificaciones de gasóleos con menor contenido en azufre.

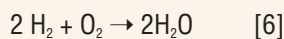
El binomio ambiental-económico será tratado en el apartado siguiente. En éste se trata de evaluar la primera parte del problema: el balance energético del esquema convencional y el de la alternativa aquí propuesta, a través de la *economía del hidrógeno* y sus tecnologías propias, entre las que destaca la pila de combustible, elemento esencial en este

análisis.

La pila de combustible (10, 49, 50) es un dispositivo electroquímico que actúa en sentido inverso a una celda electrolítica. En ésta, se aplica una diferencia de potencial a unos electrodos, a través de los cuales se inyecta y recibe una corriente eléctrica, que, a su paso por el electrolito, separa las especies iónicas de éste, pues son estas cargas eléctricas las que realmente portan la corriente eléctrica aplicada. En la celda, los iones positivos van al cátodo (donde se reducen, capturando un electrón) y los negativos al ánodo (donde se oxidan, dando un electrón). Los efectos netos de este fenómeno son dos: circulación real de la corriente eléctrica aplicada y desplazamiento de los iones hacia los electrodos correspondiente. De ser gaseosos los elementos producidos tras la combinación química en el electrodo, se desprenden y emergen de la celda. De ser sólidos, precipitan sobre el electrodo. De esta manera cabe producir hidrógeno (en el cátodo) mediante electrolisis. Esta es la forma que se seguiría, por ejemplo, para obtener hidrógeno a partir de la electricidad generada en paneles fotovoltaicos o en generadores eólicos, si la electricidad no pudiera dedicarse a otro fin. Esto último se comenta por ser este procedimiento electrolítico muy caro para la producción de hidrógeno. Si el objetivo fuera almacenar la energía eléctrica excedente hasta una hora de alta demanda, sería mucho más útil (de mayor rendimiento) emplear bombeo hidráulico.

En todo caso, lo descrito sirve de introducción al tema de las pilas de combustible, acerca de las cuales ha aparecido últimamente información creciente, por lo que aquí se extrae simplemente su principio físico, para señalar los problemas o limitaciones que puede tener su rendimiento.

En una pila se inyecta hidrógeno gas en el ánodo, donde se va a oxidar, cediendo un electrón al electrodo, y se inyecta oxígeno en el cátodo, donde se reduce químicamente (tomando dos electrones). El balance químico neto se podría formular como:



siendo por tanto una oxidación convencional, que libera su correspondiente energía (484 kJ en la reacción anterior tal como está formulada). Ahora bien, esta energía no aparece, como en el caso de la reacción de oxidación convencional (combustión) como calor (excitación térmica de los productos de la reacción) sino que una parte sustantiva de ella aparece como energía eléctrica, correspondiente a la intensidad de corriente que está atravesando la pila, y a la di-

ferencia de potencial que se crea entre sus electrodos, de modo que por fuera de ellos circula una potencia eléctrica que puede servir, por ejemplo, para accionar un motor eléctrico que mueva a un automóvil. Y los motores eléctricos, al igual que las pilas de combustible, no están sujetos a las limitaciones del rendimiento de **Carnot**, que afecta a todos los ciclos termodinámicos y en particular a los motores de combustión interna (tan útiles, por otra parte, en este último siglo y pico para el transporte automóvil).

Las máquinas térmicas no pueden exceder el rendimiento de Carnot, que corresponde a

$$\eta_c = \frac{T_c - T_f}{T_c} \quad [7]$$

siendo T_f la temperatura del foco frío (en general, el medio ambiente) y T_c la del foco caliente, que depende de las características de la combustión.

A esta limitación teórica hay que añadir las prácticas por irreversibilidades, inquemados, etc., por lo que en la práctica los motores de encendido provocado (que trabajan con menores compresiones en el cilindro)

tienen rendimientos en el rango 25-30%, y los diésel (de mayores compresiones) pueden alcanzar el 40%, pero su rendimiento usual está alrededor del 35%. Ello hace que, en términos de energía útil, pueda formularse un balance tan sencillo como el de la figura 3. Por descontado, aquí se podrían añadir las pérdidas en la extracción, transporte y refinado de combustible, pero estas cuestiones también afectarían a la otra alternativa, así mismo recogida en la figura 3. En ella se aprecia el rendimiento del reformador, para producir hidrógeno, valorado en un 85%, y el del conjunto pila-motor eléctrico valorado en un 55%.

Existen muy diversos tipos de pilas (PEM, alcalinas, de óxidos sólidos, de carbonatos fundidos...) y algunas de ellas, en régimen estacionario y sin alteración de sus materiales, superan sobradamente el 80% de rendimiento. A su vez, los motores trifásicos asíncronos utilizables en Transporte, superan el 90% de rendimiento electromecánico. Sin embargo, teniendo en cuenta el ciclo de vida de la pila y el hecho de que a ésta se le va a exigir cierta flexibilidad de respuesta, el rendimiento anteriormente mencionado de 85% parece prudente. Por descontado, se están comparando dos tecnologías de maduración absolutamente distinta. Por un lado, la de los motores de explosión, que llevan más de un siglo de solvencia comercial, y han sido uno de los pilares del desarrollo socioeconómico de estos últimos 100 años. Por otro, las tecnologías de la *economía del hidrógeno*, que han avanzado lentamente en su curva de aprendizaje, y apenas han alcanzado economías de escala, por lo que no resulta fácil aventurar cual será la situación en rendimiento, y sobre todo en precio, de las pilas de combustible, dentro de 20 o 30 años. En todo caso, no será peor que en la actualidad y, por tanto, los rendimientos citados pueden aceptarse en la comparación. De ésta se deduce que la alternativa de explotar los combustibles fósiles vía producción de hidrógeno es energéticamente mejor, y además posibilita la captura y confinamiento del CO_2 , que

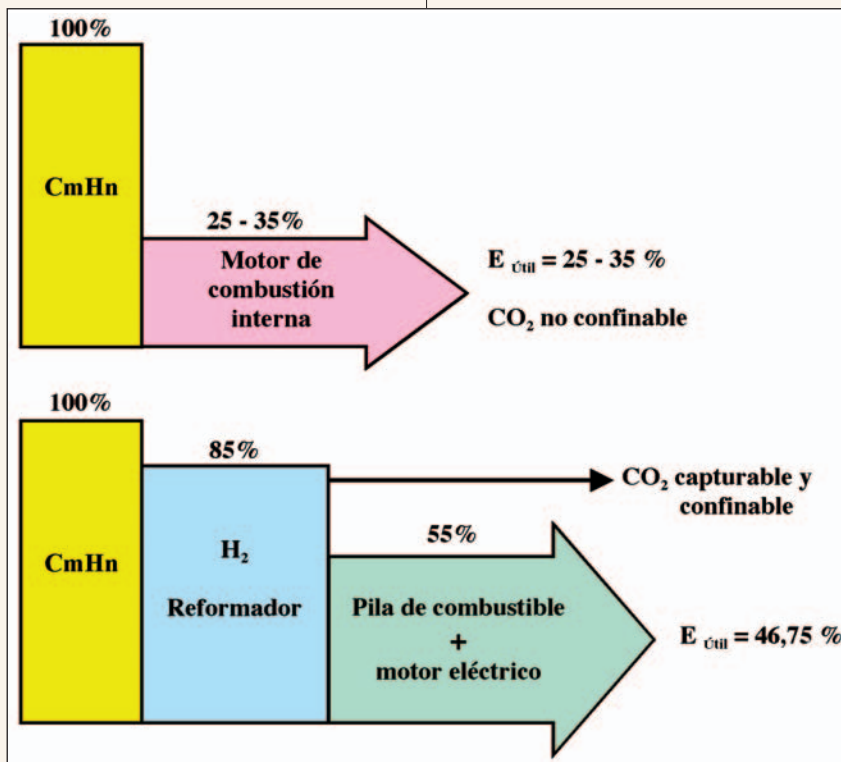


Figura 3. Balances energéticos del uso convencional de hidrocarburos y de su uso a través de la tecnología de hidrógeno

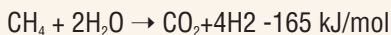
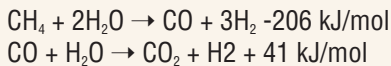
es, en cierta medida, el motivo original de plantear esta alternativa.

Queda por analizar o cuestionar el rendimiento del reformador, medido en energía potencialmente contenida en el hidrógeno producido, respecto del total de combustible gastado, tanto dentro del reformador (para su reacción con el agua) como en el calentamiento del horno, lo cual se considera que lo aporta el mismo combustible fósil de partida. Hay propuestas para efectuar el calentamiento a partir de energía nuclear y de energía solar térmica, lo cual mejoraría sustancialmente el panorama de esta alternativa pero, por mor de acotar ésta, se considera que el calor proviene del mismo combustible.

De la tabla 1, y en particular del porcentaje de calor endotérmico del reformado sobre la energía producida, se infiere que los candidatos idóneos son los GLP (butano) y el propio carbón. De esto último son un buen ejemplo las instalaciones de **Elcogás** de Puertollano citada anteriormente, aunque en su caso se destina a la generación de energía eléctrica, en la que el precio de la termia es sensiblemente inferior (la tercera parte, aproximadamente) del precio en el transporte, lo cual redundaría en su perjuicio.

No obstante lo anterior, los reactores químicos de reformado actual se han desarrollado para el metano (gas natural) cuyas reservas son incluso ligeramente superiores a las de petróleo (145 Gtep, versus 140) (81).

El reformado de metano obedece a:



El PCI (poder calorífico inferior) del metano es 803 kJ/mol. El del hidrógeno, 242 kJ/mol.

Haciendo el balance de la reacción en PCI, se obtiene

$$803 + 165 = 968 \text{ kJ/mol CH}_4$$

que significa que, si al PCI del metano añadimos los 165 kJ suministrados para que se lleve a cabo la reac-

ción endotérmica, se tienen 968 kJ, que corresponden al PCI de 4 moles de H₂. Es decir, éstos últimos llevan toda la energía química potencial del metano más el calor aportado a la reacción.

El problema, respecto al rendimiento de la instalación reformadora, es que esos 165 kJ se han de suministrar a una mezcla vapor-metano a muy alta temperatura. En los reformadores convencionales, en realidad hay que suministrar 206 kJ/mol a una temperatura entre 750 y 1.000 °C, aunque luego se recuperan 41 kJ/mol en el segundo reactor pero a temperatura mucho más baja (lo que significa menor valor exergético).

Desde este punto de vista, los nuevos reformadores unietapa con catalizador de níquel en el rango 500-600 °C y membranas de paladio para separar in situ el H₂, son mucho más eficaces. Como regla general en Termotecnia, cuanto mayor sea la temperatura a la que hay que proporcionar una determinada cantidad de calor para un fin útil, menor el rendimiento del conjunto. Esto se basa en que no resulta posible recuperar todo el calor de los productos que

emergen calientes (y, en general, se han de almacenar y comercializar en frío). Con el citado calor habría que precalentar los reactivos (tanto los de dentro del reformador como los de la combustión del horno) y en todo proceso de transferencia de calor se genera entropía, y por tanto se pierde rendimiento. En la figura 4 se muestra un esquema energético de una instalación de producción de H₂ a partir de CH₄.

Dos reformadores uni-etapa operativos en Tokio (47) han conseguido rendimientos entre el 80 y el 90%, pero no hay en principio problema para incrementar éste hacia el 100%, aunque las pérdidas de calor y las irreversibilidades no pueden evitarse jamás del todo, entre otras cosas porque los tiempos de reacción y de calentamiento y enfriamiento han de ser finitos (pues de lo contrario, la tasa de producción de hidrógeno sería prácticamente nula).

Con los datos aducidos y defendidos, la vía de explotación de los combustibles fósiles para el transporte (incluido el carbón, inútil hoy a estos efectos) es muy superior energéticamente a la vía clásica, pues incre-

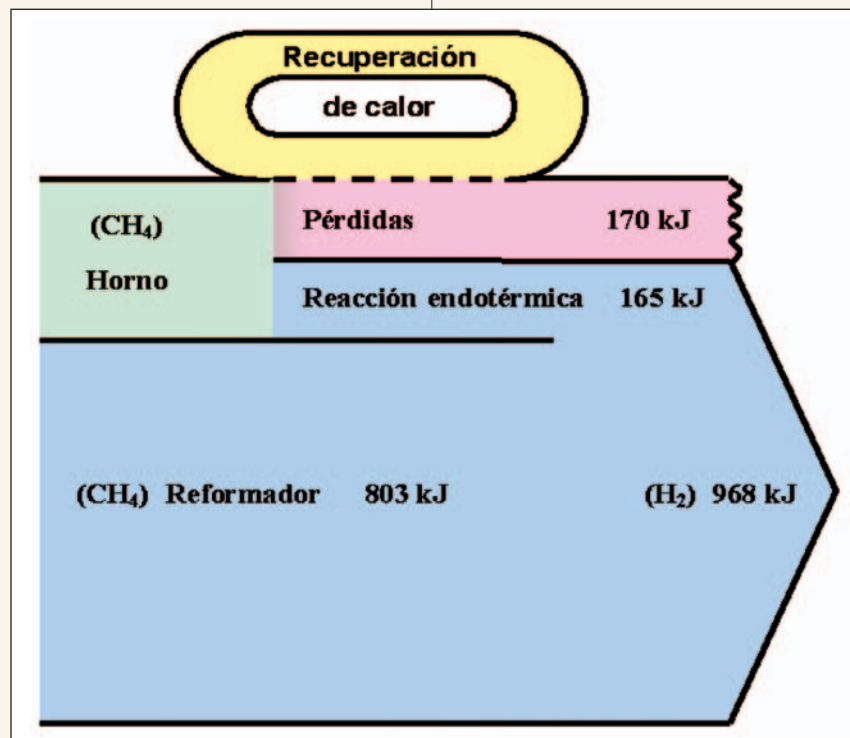


Figura 4. Balance energético de una instalación reformadora. El mayor problema para obtener un buen rendimiento es la recuperación de calor de los efluentes del horno y del reformador

menta la energía útil extraíble de éstos en casi un 50%.

Por descontado, ello exigiría la puesta a punto de una nueva tecnología, cuyas bases se conocen, pero que carece aún de madurez industrial plena. El premio energético por lograr esta madurez no es despreciable, sino al contrario. Además de la satisfacción de poder mitigar los efectos sobre el medio ambiente.

5. Análisis económico-ambiental

La disponibilidad de nuevas tecnologías por lo general abre nuevas perspectivas, no siempre fáciles de aquilatar económicamente, pues se dan muchas incertidumbres sobre las prestaciones reales que las tecnologías emergentes pueden realmente aportar. En tal sentido, en la alternativa propuesta hay dos campos tecnológicos cuyo desarrollo condicionaría la viabilidad del modelo propuesto. Los dos campos son:

- Las pilas de combustible
- La captura y secuestro de CO₂

A su vez, el nivel de maduración de cada uno de ellos es muy diferente. Las pilas de combustible han experimentado un desarrollo tecnológico durante decenios, contando clientes tan exigentes como los viajes astronáuticos. Entre las pilas se han ido abriendo paso media docena de familias, con intereses de aplicación en campos muy diferentes. Para la Automoción, posiblemente las PEM (de membrana polimérica) sean los candidatos idóneos (49-51), pero incluso eso es prematuro pues las investigaciones sobre pilas han recibido en estos últimos tres años un empujón importantísimo tanto en EE.UU. como en la Unión Europea. Es de esperar que ello conduzca a pilas más baratas y de más larga duración. Para ello no hay más remedio que persistir en la investigación y avanzar en la curva de aprendizaje hasta llegar verdaderamente a las economías de escala. Hoy por hoy, el precio de las pilas (en el entorno de 5.000 €/kW) hace imposible prever su verdadera competitividad, pero el avance en los aspectos antedichos (curva de aprendizaje y economía de escala) podría

reducir ese valor por 100 en los próximos 10-15 años (49-53).

A ello habría que añadir el problema de la durabilidad y la flexibilidad de prestaciones de los vehículos eléctricos. Los motores de gasolina tienen rendimientos muy bajos, pero una gran capacidad de cambio de régimen, por ser explosivos. Las pilas no podrán tener reacciones explosivas, pero en ello pueden coadyuvar supercondensadores eléctricos, que almacenan energía, para entregarla en las solicitaciones de aceleración.

Con los datos existentes (que varían apreciablemente de un año a otro, pues aparecen nuevos prototipos de coches de hidrógeno con notoria frecuencia) no es riguroso intentar efectuar una comparación entre los vehículos con motor de combustión interna y los de pila de hidrógeno, más motor eléctrico. No obstante, dentro de la iniciativa norteamericana hacia la Hydrogen Economy (20), el programa "Freedown Car" es uno de los más emblemáticos y ya se ha mencionado que casi todos los grandes constructores de vehículos del mundo tienen prototipos, habiendo hecho alguno de ellos exhibiciones públicas durante miles de kilómetros a través de Europa, en 2004.

Lo que sí queda claro es que en la alternativa aquí estudiada, sería posible la captura y secuestro del CO₂, lo que sí representaría verdaderamente un alivio contra el incremento del efecto invernadero.

La preocupación ante este efecto y su incidencia en el cambio climático ha llevado a decisiones como el *Protocolo de Kioto* y la *Directiva Europea de Comercio de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*, que en realidad constituyen una manera de internalizar costes ambientales, que anteriormente no afectaban a las actividades con consumo de energía por combustión (directa o indirecta, como puede ser el caso de la electricidad).

Asignar un precio a la tonelada de CO₂ emitida es, en cierto modo, un ejercicio subjetivo pues aún no se cuenta con una contabilidad ambiental rigurosa al ser muy difícil en este campo establecer relaciones de causa-efecto. No obstante, se barajan da-

tos en el margen 20 a 40 €/t, lo que, en cierto modo, se adecúa (o intenta adecuar) a unos porcentajes de los costes energéticos actuales (previos a la internalización de los costes ambientales) de tal manera que sean significativos, pero no distorsionen tanto el mercado como para producir una hecatombe económica.

Para valorar el impacto socioeconómico de este coste ambiental, téngase en cuenta que por cada tonelada de petróleo (o derivados) que combustione, se producen algo más de tres toneladas de CO₂. Si a la emisión a la atmósfera se le asocia un coste de 30 €/t, eso significa que por cada siete barriles de petróleo (1 tonelada en números redondos) se tendría que añadir un coste de 90 €, es decir, unos 13 €/barril. Para precios de barril en el entorno de los 30 \$, ello significaría aproximadamente un 45% de sobrecoste. Con barriles a 50 \$, el sobrecoste sería de un 33% aproximadamente.

Medido en precio de venta al público (después de impuestos) el efecto es mucho menor, pues se imputaría el sobrecoste de 30 €/t de CO₂ a lo equivalente a 400 litros de gasolina (es decir, próximo a 400 €, y por tanto, menor que un 10%).

Por lo que respecta a la captura y secuestro de CO₂, desde la adopción del *Protocolo de Kioto* (1997) a hoy día, se han formulado varias posibilidades para su confinamiento, desde las suboceánicas a los acuíferos salinos, aunque las minas y yacimientos abandonados de hidrocarburos serían la opción menos agresivas ambientalmente (31,36).

A la captura y secuestro se le pueden asociar dos tipos de coste: los de las inversiones del equipo correspondiente, y el gasto de energía para su confinamiento, pues, en general, habría que presurizar el CO₂ para licuarlo, transportarlo e inyectarlo.

El coste debido al consumo de energía es sin duda el más importante y se ha estimado entre un 10 y un 20% de la energía generada por la propia combustión del CO₂. Sin embargo, esta cifra puede reducirse significativamente en la alternativa propuesta, por una razón fundamental:

aproximadamente la mitad del H_2 generado no procede del hidrocarburo, sino del agua. Aunque ello exige quemar en el horno cierta cantidad de hidrocarburo adicional al reformado, aun así la *economía del hidrógeno* se beneficia de esta reacción. En tal sentido, aunque las cifras no pueden considerarse concluyentes, el coste de la captura y confinamiento del CO_2 podría quedar ahorquillado entre el 8 % y 15% del coste energético puesto en juego de manera útil.

Para valorar las dificultades de esta tecnología se ha de tener en cuenta que el CO_2 es gas en condiciones normales y su temperatura crítica es de 31 °C (y por tanto, licuable por debajo de esa temperatura, lo que resulta muy ventajoso para su confinamiento subterráneo o submarino). Sin embargo, su presión crítica (a la que se licua a 31 °C) es de 73 atm y la densidad en esas condiciones es de 0,12 kg/l. Por otro lado, su temperatura de condensación a 1 atm es de 79 °C bajo cero, y tiene una densidad en líquido de 1,56 kg/l.

Para el almacenamiento subterráneo haría falta presurizarlo alrededor de 50 atm. Para el submarino harían falta presiones mayores (por encima de 100 atm) pues, de lo contrario, su densidad sería menor que la del agua. Aunque la opción suboceánica presenta cierta debilidad desde el punto de vista medioambiental, representa, sin embargo, una solución que se esparciría en vastísimas extensiones, en zonas muy alejadas de la biosfera, pues caería a fosas de 5.000 metros o más de profundidad.

6. Conclusiones

La preocupación por el incremento del efecto invernadero y la consiguiente importancia que pasan a tener las técnicas de captura y secuestro de CO_2 , junto a la mejora continua en las prestaciones de las pilas de combustible, abren una posibilidad para el uso de los combustibles fósiles que consigue a la vez una alta calidad ambiental, tendiendo hacia emisiones nulas en CO_2 , y un mejor aprovechamiento energético de los recursos naturales (pues incluso podría usarse para el Transporte la

energía del carbón a través de su conversión a energía de hidrógeno).

Aún contando con la energía necesaria para el secuestro del carbón, la nueva alternativa es energéticamente positiva respecto de los usos actuales del Transporte. En el caso expuesto en la figura 4, a partir de 1.138 kJ de energía primaria (1,42 moles de metano) se conseguían 968 kJ de energía en H_2 , con una conversión a energía útil de 532 kJ. Aún contando una reducción del 15% para atender a la energía necesaria para el confinamiento del CO_2 , quedarían 459 kJ útiles.

En el caso convencional, a partir de 1,42 moles de metano se generarían entre 285 y 400 kJ útiles (según el rendimiento de la maquinaria térmica, supuesto entre el 25 y el 35%). Pero lo más importante es que, en este caso, se habrían emitido 62 gramos de CO_2 a la atmósfera (1,42 moles).

Debido al muy diferente grado de maduración tecnológica y comercial de una y otra alternativa, no es posible efectuar una verdadera comparación de la viabilidad económica de la nueva modalidad planteada. Pero sí hay una base importante para justificar un esfuerzo en ese sentido: además del gran avance ambiental que representaría; energéticamente, tendría el efecto de incrementar la energía útil extraída de los combustibles fósiles. Más aún, esta opción se podría asociar al uso de energías renovables (sobre todo solar térmica de alta temperatura) y a la energía nuclear, multiplicando el valor energético de la materia prima, de cara a su uso en el transporte automóvil.

En definitiva, se abre un escenario energético que requeriría tiempo, pero que permitiría el paso gradual de una energética basada en la combustión clásica, a otra basada en la economía del hidrógeno, sin emisiones de CO_2 por el sector energético que optara por esta modalidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por el proyecto Profit nº 120000-2004-172 (**Ministerio de Educación y Ciencia**) y por la **Fundación Iberdrola**.

Referencias

- (1) **Martínez-Val, J. M.; Perlado, M.; Piera, M.** "Principios físicos del desarrollo energético sostenible", Fundación Iberdrola, Madrid (2003).
- (2) **Ackerman, T.; Stokes, M.** "The atmospheric radiation measurement program". Physics today (Enero, 2003).
- (3) **Kump, L. et al.** "A weathering hypothesis for glaciation at high atmospheric pCO_2 in the Late Ordovician". Paleoclimatol. Palaeoecol. Palaeogeogr.152, pp 173-187 (1999).
- (4) **Marchuk, G.; Kondratyev, K.; Kozodevor, V.** "Earth Radiation Budget", Nauka Pub.Moscow (1990).
- (5) **Vázquez Abeledo, M.** "La historia del sol y del cambio climático". Serie McGraw Hill de divulgación científica, McGraw Hill Interamericana de España, SAU (1998).
- (6) www.ipcc.ch (Intergubernamental Panel on the Climatic Change).
- (7) www.eea.int (European Environmental Agency).
- (8) www.iea.org (International Energy Agency).
- (9) Informe PryceWaterhouseCoopers sobre el Efecto Económico en España del Protocolo de Kioto (Madrid, 2004).
- (10) www.pilasde.com (Pilas de combustible-Ariema).
- (11) www.aeh2.org (Asociación Española del Hidrógeno).
- (12) www.hynet.com (European Hydrogen Network).
- (13) RDT Info-Union Europea, nº 42, Agosto 2004 (pág.1-11). En particular, proyecto Fuero (pág.8).
- (14) europe.eu.int/comm/research/energy/pdf/efchp_hydrogen21.pdf.
- (15) europe.eu.int/comm/research/energy/transport/envir/2003-report-en.pdf.
- (16) www.energiasostenible.net.
- (17) www.iphe.net (International Partnership on the Hydrogen Economy).

(18) www.clean-air.org (American Hydrogen Association).

(19) www.h2euro.org (European Hydrogen Society).

(20) www.usea.org/iphe.htm. Participación USA en la IPHE.

(21) **Steinberg, M.; Cheng, HC.** "Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels". J. Hydrogen Energy 1989; 14(1):797-820.

(22) **Gaudermack B.; Lynum S.** "Hydrogen production from natural gas without release of CO₂ to the atmosphere". Proceedings of the Eleventh World Hydrogen Energy Conference, 511-23, Coco Beach, Florida, June 1996.

(23) **Steinberg, M.** "The Hy-C process (thermal decomposition of natural gas) potentially the lowest cost source of hydrogen with the least CO₂ emission". BNL 61364, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, December 1994.

(24) **Funk, J.** 2001. "Thermochemical hydrogen production: past and present". Int. J. Hydrogen Energy 26, 185-190.

(25) **Hirsch, D.; Epstein, M.; Steinfeld, A.** 2001. "The solar thermal decarbonization of natural gas." Int. J. Hydrogen Energy 26 (10), 1023-1033.

(26) **Gregg, D.W.; Aiman, W.R.; Otsuki, H.H.; Thorsness, C.B.** 1979. "Solar coal gasification". Solar Energy 24, 313-321.

(27) **Müller, R.; von Zedtwitz, P.; Wokaun, A.; Steinfeld, A.** 2003. "Kinetic investigation on steam gasification of charcoal under direct high flux irradiation." Chem. Eng. Sci. 58, 5111-5119.

(28) **Von Zedtwitz, P.; Steinfeld, A.** 2003 "The solar thermal gasification of coal-energy convection efficiency and CO₂ mitigation potential." Energy-Int.J.28 (5), 441-456.

(29) **Fletcher, E.A.; Moen, R.L.** 1977. "Hydrogen and oxygen from water". Science 197, 1050-1056.

(30) **Hori, M.** et al, "Synergistic Production of Hydrogen using fossil fuels and nuclear energy. Application

of nuclear-heated membrane reformer". OECD/NEA second information exchange meeting on nuclear production of hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne.

(31) www.cslforum (Carbon Sequestration Leadership Forum).

(32) www.fe.doe.gov/programs/sequestratoin (Dpt.of Energy, USA).

(33) Sequestration.mit.edu/pdf/csi_i_agenda.pdf (Massachusetts Institute of Technology).

(34) **Steinberg, M.; Cheng, HC.; Horn, F.** "A system study for removal, recovery and disposal of CO₂ from fossil fuel power plants in the U.S.". BNL 35666 Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, May 1984.

(35) **Herzog, H.; Drake, E.; Adams, E.** "CO₂ capture, reuse and storage technologies for mitigating global climate change -a white paper". Final Report. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. January 1997.

(36) **Horn, FL.; Steinberg, M.** "Carbon dioxide power plant for total emissions control and enhanced oil recovery". BNL 30046, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, August 1981 and BNL 51597 September 1982.

(37) **Lackner, KS.; Batt, EP** "Carbon dioxide disposal in mineral carbonate." Proceedings of the third international conference on carbon dioxide removal" ICCDR-3 Cambridge, MA. 1996.

(38) **Bergman, PD.; Winter, EM.** "Disposal of CO₂ in deep saline aquifers in the U.S". U.S./Japan. Joint Technical Workshops, U.S. Department of Energy, State College, PA. September 30-October 2, 1996.

(39) **Beatti, WH.; Berjoan, R.; Coutures, JP.** "High-temperature solar pyrolysis of coal". Solar Energy 1983; 31:137-43.

(40) **Steinfeld, A.; Kirillov, V.; Kuvshinov, G; Mogilnykh, Y.; Reller, A.** "Production of filamentous carbon and hydrogen by solar thermal catalytic cracking of methane". Chem. Eng.Sci. 1997;52820:3599-603.

(41) **Meier, A; Kirillov, V; Kuvshinov, G; Mogilnykh, Y.; Reller, A.; Steinfeld, A.; Widenkaff, A.** "Solar thermal decomposition of hydrocarbons and carbon monoxide for the production of catalytic filamentous carbon." Chem. Eng.Sci. 1999;54: 3341-8.

(42) **Muradov, N.** "Thermo catalytic. CO₂ -free production of hydrogen from hydrocarbon fuels". Proceedings of the 2000 US DOE Hydrogen Program Review, May 9-11, 2000. San Ramon, CA, November 2000, NREL/CP-570-28890.

(43) **Beattie, W.H.; Berjoan, R; Coutures, JP.** 1983. "High-temperature solar pyrolysis of coal". Solar Energy 31 (2), 137-143.

(44) **Steinberg, M;** 1999. "Fossil fuel decarbonisation technology for mitigating global warming". Int. J. Hydrogen Energy 24, 771-777.

(45) **Richardson, J.T.; Paripatyadar, S.A.,** 1990. "Carbon dioxide reforming of methane with supported rhodium". Appl. Catal. 61, 293-309.

(46) **Ruthven, D.; Farooq, S.;Knabebel, K.S.** 1993. "Pressure Swing Adsorption". John Wiley & Sons, New York.

(47) **I.Yasuda, et al.** "Development of membrane reformer for hydrogen production from natural gas." 14th World Hydrogen Energy Conference, June 9-13, 2002, Montreal.

(48) **Treviño, M.** Elcogás. "Gasificación integral de carbón con ciclo combinado". (Club Español de la Energía, Madrid 2002).

(49) www.fuelcell-info.com (American Hydrogen Association)

(50) www.ballard.com

(51) www.appice.com

(52) **León, P.T.; Martínez-Val, J.M.:** "Tecnología de la combustión y vectores energéticos", Cap. XIX en "La energía en sus claves", J. M. Martínez-Val, Editor, Fundación Iberdrola (2004).

(53) **Fernández Beites, L.** "Generación eléctrica para el siglo XXI", Cap.XX en "La energía en sus claves", J. M. Martínez-Val, Editor, Fundación Iberdrola (2004). ■