

El hidrógeno combustible

Métodos de obtención y aplicación a la generación eléctrica

Tras una descripción de las características del hidrógeno, aspectos favorables y desfavorables ante su utilización, el artículo se centra en los métodos de producción de este elemento y en sus potenciales aplicaciones en la generación de energía eléctrica.

Dentro de los métodos de producción, se consideran procedimientos tanto actuales como con futuro, ya lo sean partiendo de tecnologías conocidas o emergentes como la pila de combustible inversa y la producción biológica. Dentro de la aplicación del hidrógeno a la producción de energía eléctrica, se consideran las pilas de combustible y la utilización de los ciclos de generación energética avanzados como los de Rankine y Graz.

1. Introducción

En este trabajo se expondrán algunos temas relacionados con la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno, campo, quizá, menos divulgado que la automoción.

En la actualidad, la mayor preocupación, tanto en materia energética como medioambiental, está centrada en encontrar opciones viables al vigente sistema de transporte. En efecto, el transporte, y más concretamente el urbano, es el sector que más energía consume, en su práctica totalidad derivados petrolíferos, y, a pesar de los enormes avances logrados en este terreno¹, es el principal causante de la contaminación atmosférica en las grandes ciudades.

Por este motivo, encontrar algún accionamiento que pueda sustituir eficazmente a los existentes motores de combustión interna concita un gran número de líneas de investigación, cuyos resultados se encuentran en el umbral de la competitividad. Aunque no pueden descartarse otras tecnologías (acumuladores, turbinas de gas, motores duales, etc.), el motor eléctrico alimentado por pilas de combustible es, probablemente, la alternativa que en estos momentos parece más próxima a ser implantada comercialmente.

La elección del combustible (o combustibles) que consumirán los vehículos del futuro ocupa un lugar preferente entre los problemas a solventar; no puede olvidarse que, aun en el caso de los acumuladores, habría que resolver la manera de suplir el nuevo, y masivo, incremento de consumo. El hidrógeno, cuya combustión apenas tiene consecuencias sobre la atmósfera, sería sin duda el carburante idóneo y sobre el que hay depositadas más esperanzas, entre otras razones porque la mayoría de las pilas de combustible de baja temperatura únicamente pueden oxidar este elemento² (2). Pero no sólo es importante la adecuación tecnológica, los aspectos de la logística de distribución pueden llegar a ser decisivos en la selección. Así, frente al suministro directo de hidrógeno -licuado o gas comprimido- la solución de cargar el vehículo con un combustible líquido (derivados petrolíferos o metanol son los principales candidatos) o gas natural comprimido, y reformarlo in situ produciendo hidrógeno, tiene numerosos partidarios.

Siguiendo al transporte, generar energía eléctrica ocupa el lugar preferente en la preocupación energética y medioambiental. De igual manera que para los vehículos, están en estudio numerosas opciones a los sistemas tradicionales.

Posiblemente, la condición estacionaria de las centrales térmicas permite considerar un número de variantes relativamente elevado, lo que, si bien puede facilitar encontrar diversas soluciones, también dificulta en cierta manera seleccionar la más apropiada a cada situación.

2. Algunas características del hidrógeno

Las favorables propiedades del hidrógeno para ser utilizado como combustible son bien conocidas desde antiguo:

- Reservas prácticamente ilimitadas.
- Facilidad de combustión completa.
- Bajo nivel de contaminantes atmosféricos. En estos momentos, con especial atención a la ausencia de CO₂ entre los productos de combustión.

Simultáneamente, algunos aspectos desfavorables han impedido la difusión del uso:

¹ Un moderno automóvil, explosión o diesel, emite por el tubo de escape entre el 10 y el 20% de los contaminantes que se escapaban a la atmósfera tan sólo 20 años atrás. Aunque menos espectacular, las emisiones específicas de CO₂, íntimamente asociadas a la eficiencia energética, también han disminuido en el entorno del 20%, pero el incremento del parque, con vehículos de mayor potencia, y la tendencia a recorrer cada vez mayores distancias, ha eclipsado este efecto.

² Por el momento, la única y notable excepción la constituyen las pilas de metanol directo, pero su viabilidad comercial parece retrasada con respecto a las de hidrógeno.

- No existe libre en la naturaleza.
- Los esquemas tradicionales de obtención arrojan un balance energético negativo a lo largo del ciclo de vida.
- En gran medida consecuencia del punto anterior, elevado coste de producción.
- Escasa densidad energética por unidad de volumen, que dificulta y encarece su manipulación; la Tabla I, donde se compara con el metano, principal componente del gas natural, muestra con claridad esta propiedad.

Tabla I. Densidad y P.C.I. del H ₂					
P (bar)	T (°C)	H ₂ (P.C.I. = 120,0 MJ/kg)		CH ₄ (P.C.I. = 50,0 MJ/kg)	
		Densidad kg/m ³	P.C.I. MJ/m ³	Densidad kg/m ³	P.C.I. MJ/m ³
1	25	0,081	9,76	0,648	32,40
200 (*)	25	14,380	1725,60	145,160	7258,00
1 (**)	(**)	79,500	9540,00	420,700	21035,00

(*) : El trabajo de compresión teórico expresado en kWh por kWh de P.C.I.:
H₂ = 0,087; CH₄ = 0,023 (En cuatro etapas con refrigeración intermedia)

(**) : La diferencia de entalpía entre gas y líquido en kWh por kWh de P.C.I.:
H₂ = 0,036 a -252,6 °C; CH₄ = 0,018 a -161,6 °C

Hasta el momento, y probablemente durante al menos la presente década, los inconvenientes han sido claramente superiores a sus ventajas, por lo que la utilización en forma de combustible es prácticamente nula. No obstante, en todos los ejercicios de prospectiva energética siempre ha estado presente como potencial alternativa a los combustibles fósiles, confiando en que la investigación conseguiría superar las barreras que impiden el uso generalizado.

La existencia de una gran experiencia en la producción, manejo y aplicaciones del hidrógeno se debe a sus propiedades como reactivo: la fabricación de NH₃, fundamento de los fertilizantes nitrogenados y la posterior síntesis de NO₃H y sus numerosos derivados, junto a la creciente utilización en el refino del petróleo, son los destinos más importantes.

3. Métodos de producción

En el ciclo del hidrógeno, éste jugará el papel de intermediario entre las energías renovables (solar, eólica, biomasa, etc.) y la central térmica; la posibilidad de almacenar hidrógeno de manera relativamente fácil vendría a suplir una de las principales limitaciones de la energía solar y eólica (o de la energía eléctrica).

La utilización masiva de hidrógeno ha de ir necesariamente asociada a una drástica reducción en los costes de producción. Por otra parte, para garantizar un prolongado desarrollo sostenible, en su obtención, no pueden consumirse combustibles fósiles. La eficiencia energética del ciclo de vida pasaría a un segundo término, siempre que se respetasen las dos condiciones anteriores.

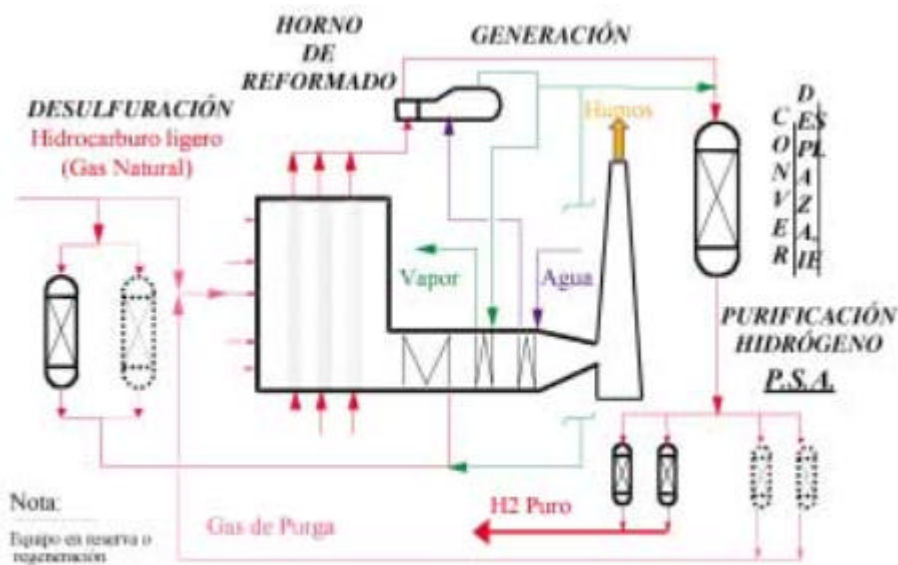


Figura 1. Diagrama del proceso de obtención de hidrógeno por reformado de hidrocarburos ligeros con vapor

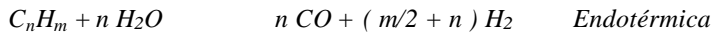
3.1. Procedimientos actuales

La generación previa de “gas de síntesis”, seguida de la eliminación del CO formado, que a su vez proporciona más hidrógeno en la denominada “reacción de desplazamiento”, es el fundamento de todos los procesos de obtención.

El “gas de síntesis” puede obtenerse por medio de dos procedimientos principales, que se comentan a continuación.

3.1.1. REFORMADO CON VAPOR DE AGUA

La materia prima, a elevada temperatura y presión moderada, se mezcla con vapor de agua y se hace pasar a través de un lecho de catalizador (Fig. 1):



El hidrocarburo ha de estar en forma gaseosa y exento de impurezas que pudiesen desactivar los catalizadores (azufre entre otros). Estas restricciones sobre calidad y estado físico limitan el número de corrientes que pueden ser utilizadas como alimentación: gas natural, GLP y naftas, y en raras ocasiones queroseno ligero, todas ellas de relativo alto precio, son las opciones disponibles. A causa de la elevada absorción de calor en la reacción endotérmica, la preparación industrial se realiza en hornos tubulares; el catalizador, habitualmente a base de Ni, está contenido en el interior de los tubos calentados exteriormente. Las condiciones típicas de operación son: temperatura 900°C y presión en el entorno de 20 bar.

El proceso ha sido objeto de muchas mejoras, pero aun así, el elevado consumo de combustibles, aproximadamente 25% de la materia prima, constituye el componente más importante de los costes de operación.

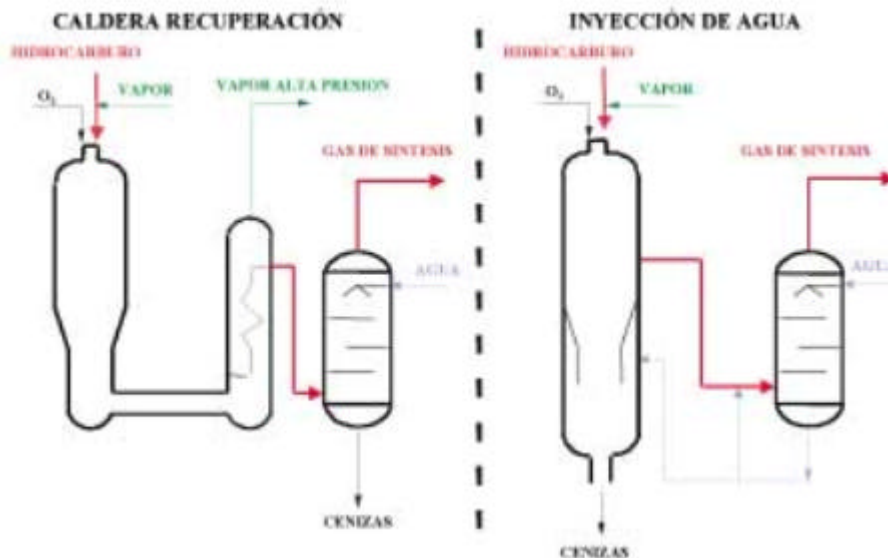
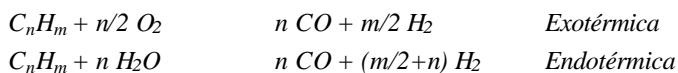


Figura 2. Diagramas de obtención de hidrógeno por oxidación parcial de residuos orgánicos, basados en dos métodos distintos de enfriamiento y limpieza del gas de síntesis

3.1.2. OXIDACIÓN PARCIAL

La reacción principal consiste en la combustión incompleta, en presencia de vapor de agua, de cualquier sustancia que contenga carbono orgánico. El vapor de agua también reacciona con la alimentación (reacción de reformado) y actúa de moderador de la combustión parcial, de forma que, controlando su dosificación, se estabiliza la temperatura en el reactor:



No se ha utilizado con hidrocarburos de baja contaminación (aunque en los últimos tiempos algunos autores propugnan su implantación)[2]; en cambio, para la gasificación de compuestos pesados es la única variante operativa.

En el mercado compiten dos diseños, diferenciados principalmente por la forma en que se realiza el enfriamiento y limpieza del “gas de síntesis” bruto. El esquema de ambas puede contemplarse en la figura 2.

3.2. Procedimientos futuros

En este apartado deberá distinguirse entre aquellos procesos perfectamente conocidos, pero que no se aplican por la falta de competitividad económica frente a los tradicionales, y los que se encuentran en cualquier fase de experimentación o desarrollo. Se puede establecer la siguiente clasificación:

a) *Tecnología conocida.*

- Descomposición electrolítica del agua.
- Gasificación de la biomasa.

b) *En fase de investigación o desarrollo.*

- Fotoelectrolisis.
- Producción biológica.
- Pila de combustible inversa.
 - Baja temperatura (electrolito membrana polímero).
 - Alta temperatura (electrolito de óxido sólido).
- Descomposición térmica del agua, 3000°C.
- Ciclos termoquímicos.

3.2.1. TECNOLOGÍA CONOCIDA

Solamente el 5% del hidrógeno que se produce hoy día es obtenido por métodos distintos al reformado de hidrocarburos o, en menor medida, oxidación parcial. De ellos, es la electrólisis del agua el único con cierta implantación en zonas geográficas excedentarias en recursos hidráulicos (Noruega, Islandia, etc.).

Recientemente se ha inaugurado en Reykiavik (Islandia) la primera estación para repostar hidrógeno con destino a los automóviles equipados con pilas de combustible. El hidrógeno se produce por electrólisis del agua utilizando la energía eléctrica, que en este caso fue previamente generada a partir de geotérmica e hidráulica de las que Islandia está bien provista [3]

Descomposición electrolítica del agua

En la actualidad, la electrólisis del agua es una tecnología bien conocida. En la figura 3 se ha realizado un esquema de los dos modelos de celda utilizados. En ambos casos, el electrolito está formado por una disolución de KOH a concentración próxima a 40%, trabajando a temperatura del orden de 80°C.

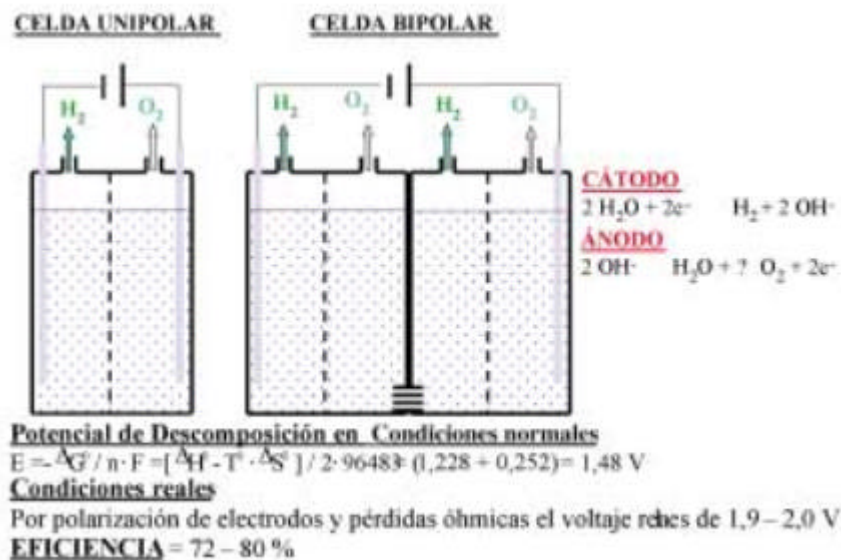


Figura 3. Esquemas de la obtención de hidrógeno por electrólisis alcalina, con los dos modelos de celda utilizados

Las celdas se construyen en acero al carbono, estando refrigeradas por agua que disipa el calor generado. Los electrodos están situados en dos reglones separados por un diafragma fabricado en material cerámico, el material del ánodo es níquel, mientras que el cátodo suele ser de acero inoxidable.

En las celdas bipolares se conectan dos de ellas en serie a través de un separador de níquel, el cual hace en una celda de ánodo y en la contigua de cátodo, con lo que se consigue una importante reducción en el volumen del aparato.

Si la electricidad consumida es de origen renovable, no se producen emisiones a la atmósfera, pero, como ya ha quedado dicho, en la mayor parte de las situaciones el procedimiento electrolítico no resulta competitivo económicamente frente al reformado.

Gasificación de la biomasa

La producción total de biomasa en la biósfera es del orden de 140×10^9 t/año, lo que equivale a $2,425 \cdot 10^{18}$ kJ/a [4]. Teniendo en cuenta que el consumo mundial de energía se encuentra en el entorno de 40×10^{16} kJ/a, puede deducirse la importancia potencial de este recurso. Naturalmente, sólo una pequeña fracción de la biomasa podría ser utilizada en los procesos industriales, a pesar de lo cual sigue constituyendo un recurso a tener en cuenta.

Anteriormente, al comentar la oxidación parcial de los hidrocarburos se aseguraba que cualquier compuesto que contenga carbono orgánico en la molécula, en condiciones apropiadas, puede reaccionar con vapor de agua para producir un gas de composición parecida al "gas de síntesis" tradicional.

Aunque en extensión limitada, funcionan instalaciones industriales que a partir de las más variadas fuentes obtienen el gas, que en estos momentos se aplica principalmente a la generación de energía eléctrica.

La gasificación de biomasa comenzó a realizarse en reactores de lecho fijo, pero la tendencia es hacia la sustitución por lechos fluidos (Fig. 4). Dentro de esta última Tecnología, se aprecia un progreso hacia los sistemas de lechos circulantes frente a los primeros modelos burbujeantes estacionarios.

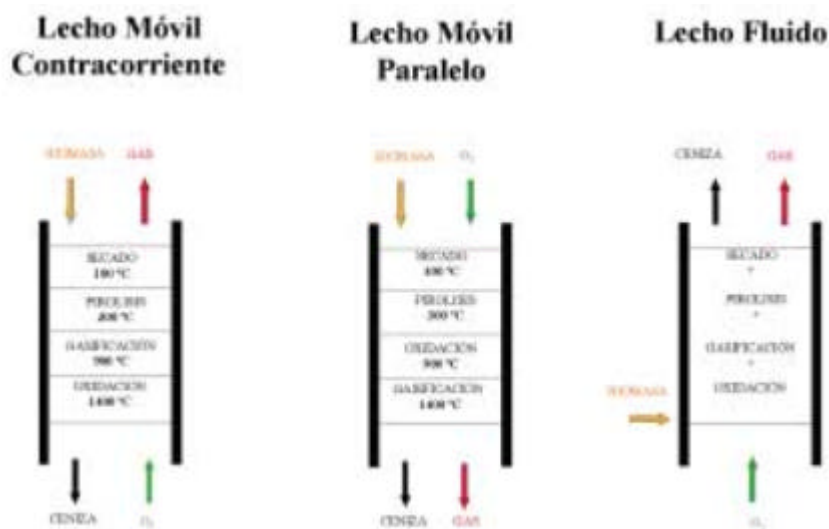


Figura 4. Esquemas de producción de hidrógeno por gasificación de biomasa. Tipos de reactores

Un problema de la mayor importancia en todo proceso de aprovechamiento de la biomasa es la limpieza y purificación de los gases emergentes.

3.2.2. TECNOLOGÍA EMERGENTE

En este apartado solamente se mencionan aquellos procedimientos que aparentan estar situados en posición próxima al lanzamiento tecnológico, con independencia de que por el momento no resulten económicamente justificados frente a la alternativa tradicional.

Pila de combustible inversa

La reacción de electrólisis es reversible, por lo que es posible utilizar pilas de combustible con el propósito de descomponer el agua con sólo aplicar a los electrodos un potencial de sentido inverso y voltaje superior al de la reacción de formación del agua.

Con este principio, todas las pilas de combustible podrían funcionar como electrolizadores, aunque consideraciones prácticas han limitado el interés a las de membrana de polímero, para trabajar a temperaturas relativamente bajas (limitada por la resistencia de la membrana a aproximadamente 100°C), o las de óxido sólido, con temperatura próxima a 1.000°C, de las que se confía en obtener mayor eficiencia. Como ejemplo, en la figura 5 se ha incluido un esquema de las de la primera clase.

Las ventajas de las pilas de combustible sobre la electrólisis convencional se centran fundamentalmente en utilizar mayores densidades de corriente (referida a la superficie de los electrodos) que, junto al reducido espesor de la membrana (0,25 mm), permite una sustancial disminución en el volumen del equipo, con la consiguiente rebaja en los costes de inversión.

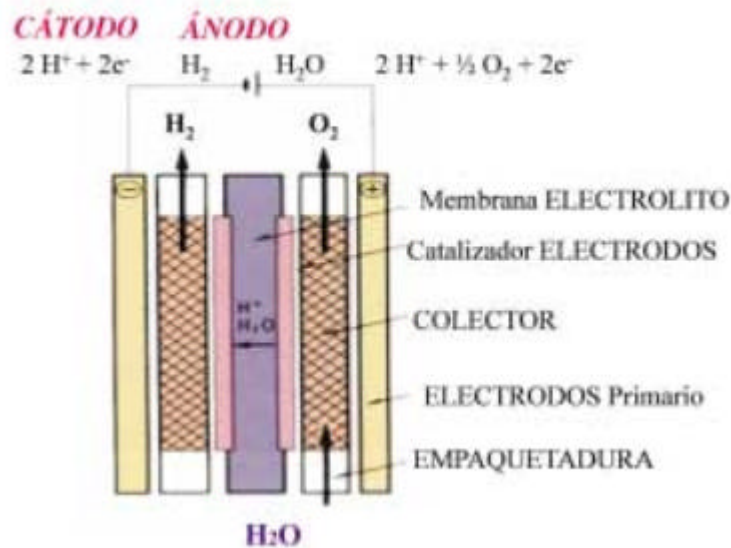


Figura 5. Esquema de producción de hidrógeno con pila de combustible de membrana de polímero

Producción biológica

Se conocen tres mecanismos por los que se puede obtener hidrógeno por medio de biotecnología, agrupadas en dos categorías, de acuerdo a la participación de la radiación luminosa en el proceso.

Con participación de luz.

- Fotólisis directa del agua.

Algunos microorganismos son capaces de fijar directamente electrones a los protones del agua produciendo hidrógeno. La energía del proceso es obtenida a partir de la radiación luminosa.

- Fotodescomposición microbiana de la materia orgánica.

En síntesis se trata de conseguir un grado más avanzado de descomposición que el alcanzado con la mayor parte de las fermentaciones habituales. Ciertos microorganismos, en presencia de radiación solar, convierten los hidratos de carbono en CO_2 más H_2 . No precisan luminosidad.

- Fermentación.

Los productos finales de la fermentación anaeróbica contienen fundamentalmente metano en equilibrio con hidrógeno. Se está estudiando la manera de desplazar este equilibrio hacia la formación de hidrógeno.

Ciclos termoquímicos

Son ciclos termodinámicos de hidrólisis, en dos pasos, para producir hidrógeno mediante energía solar. El primer paso, endotérmico, consiste en la disociación térmica del ZnO(s) en Zn(g) y $\text{O}_2(\text{g})$ a 2300 K, utilizando energía solar concentrada como fuente de calor. El segundo paso, sin ayuda del sol y exotérmico, es la hidrólisis por Zn(l) a 700 K para producir H_2 y ZnO(s) . Este último se separa de forma natural y se recicla hacia el paso primero. El hidrógeno y el oxígeno se producen en pasos diferentes, con lo que no es necesario separarlos.

4. Generación de energía eléctrica

4.1. Pilas de combustible

Probablemente, en un futuro previsible, la manera más eficiente de generar energía eléctrica la constituye un ciclo combinado formado por:

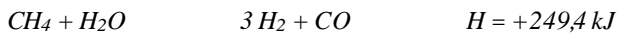
- Ciclo de cabeza: Pila de combustible de alta temperatura (óxido sólido), trabajando a presión moderada.
- Ciclo de cola: Ciclo de Brayton formado por una turbina de gas, posiblemente con regeneración.

En la figura 6 se muestra un esquema de la correspondiente disposición de equipos, con la que se espera conseguir eficiencia en la generación de energía eléctrica superior al 70%.



Figura 6. Ciclo combinado pila de combustible - Ciclo de Brayton [5]

Además de la facilidad para integrar ciclos combinados, una de las virtudes de las pilas con electrolito de óxido sólido es la posibilidad de funcionar con hidrocarburos ligeros o metanol, pues debido a la elevada temperatura de operación (850 - 1.000°C) son capaces de autorreformular el combustible en el ánodo:



A la temperatura de los electrodos, la cinética de la reacción electroquímica es lo suficientemente rápida como para permitir utilizar catalizadores de metales insensibles a la desactivación por el CO formado, que de esta manera se incorpora al combustible.

Reacciones en el ánodo:



Reacciones en el cátodo:



Esta situación siendo, sin duda, mucho más favorable que la actual, presenta dos importantes restricciones a largo plazo:

- Las reservas de hidrocarburos fósiles (metano del gas natural) son finitas. Aunque a menor ritmo que con los procedimientos actuales, la reacción sigue produciendo CO₂, principal gas de efecto invernadero.
- Ambos problemas pueden soslayarse utilizando hidrógeno como combustible.

4.2. Ciclos avanzados

Con independencia de los trabajos en pilas de combustible, existe también una marcada inquietud por desarrollar modelos viables para la generación de energía eléctrica utilizando hidrógeno como combustible. Aunque es un sentir generalizado que tales esquemas no serán viables hasta solucionar el problema de la disposición de hidrógeno barato a partir de energías renovables, el atractivo de estar prácticamente exento de contaminantes (CO, NO_x y en especial CO₂) y las elevadas eficiencias que podría esperarse de los mismos, han estimulado la investigación.

En un principio podría sorprender que, teniendo la perspectiva de las pilas de combustible, se estén analizando otros

sistemas de menor eficiencia. La posible explicación tiene una doble motivación:

Por una parte, la incertidumbre asociada a toda investigación que aconseja la continuidad en toda línea con razonables posibilidades de éxito.

La estructura de los esquemas en estudio está inspirada en los ciclos de turbinas de gas, evitando las voluminosas calderas características de las centrales térmicas de vapor de agua. Esto redundará en una notable reducción de los costes y tiempos de instalación que, sobre todo en grandes potencias, pueden resultar de menor coste específico que las pilas de combustible.

La familia de ciclos de hidrógeno - oxígeno no es muy numerosa. Hasta el momento se han desarrollado dos variantes:

- Ciclo de Rankine.
- Ciclo de Graz.

4.2.1. CICLO DE RANKINE

En la figura 7 se ha dibujado el esquema de un ciclo de Rankine avanzado, donde el vapor de agua trabaja en ciclo prácticamente cerrado. El agua reciclada desde el condensador eleva la presión en estado líquido y vaporiza a relativamente baja temperatura en el regenerador de la turbina de gas. El recalentamiento del vapor se realiza en dos etapas y en ambas se utilizan quemadores en línea inspirados en los de las turbinas de gas.

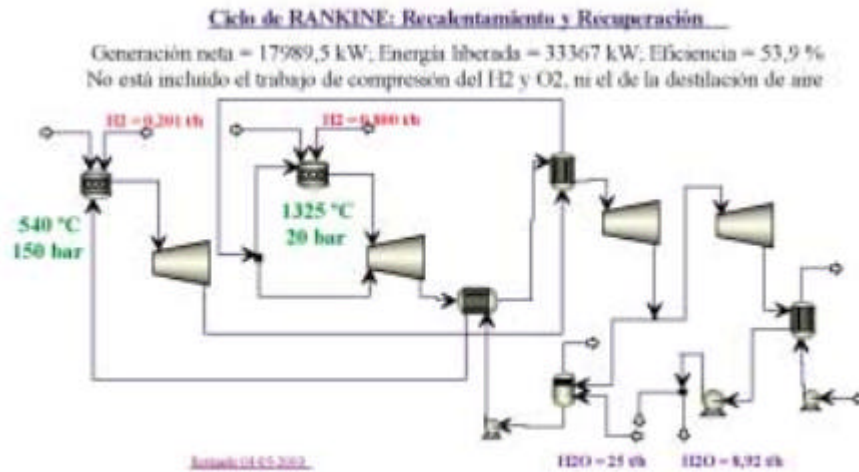


Figura 7. Diagrama del Ciclo de Rankine

Como puede comprobarse, la eficiencia teórica del ciclo está próxima a la alcanzada con el ciclo combinado convencional (55-58%) que utilice las mismas temperaturas y presiones extremas. Bien es verdad que el consumo energético de la planta de destilación de aire y el posterior trabajo de compresión del oxígeno (ambos no incluidos en el esquema) penalizan la eficiencia en más de 6%.

Se han propuesto otras configuraciones del Ciclo de Rankine que alcanzan eficiencias más elevadas, pero no se ha profundizado en demasía debido a que han sido dejadas en segundo lugar ante las mejores perspectivas de las configuraciones derivadas del Ciclo de Graz.

4.2.2. CICLO DE GRAZ

En 1983, el profesor Herbert Jericha de la Universidad de Graz (Austria) propuso un nuevo ciclo termodinámico [6] que utilizaba hidrógeno de combustible y oxígeno puro como comburente. La estructura está basada en el Ciclo de Brayton, como fluido de trabajo utiliza el propio vapor de agua, que opera en ciclo cerrado (excepto la purga del caudal formado en la combustión), y alcanza eficiencias en el entorno del 60%. La ausencia de nitrógeno y carbono aseguraba no generar emisiones contaminantes.

Posteriormente, en 1995, el mismo profesor H. Jericha amplió el concepto para permitir la combustión de metano, también con oxígeno puro [7]. El CO₂ formado se logra separar prácticamente puro en el condensador, y debe ser secuestrado por alguno de los procedimientos propuestos.

Desde estas fechas se han realizado algunas modificaciones al ciclo original que han permitido aumentar la eficiencia teórica. Quizá la más importante ha sido la acometida por el gobierno japonés que patrocinó un ambicioso programa de investigación, desarrollo y prospectiva sobre las posibilidades que ofrece el hidrógeno en diferentes aplicaciones energéticas [8]. El programa estaba dividido

en dos fases . La primera abarca el periodo 1993-1998 y la segunda el lapso 1999-2002.

Durante la primera fase se realizó el estudio de la configuración más eficiente para turbinas de gas, eligiendo el Ciclo Graz y el Rankine -contemplado en la anterior sección- como punto de partida. En este trabajo aparte del organismo oficial, participaron las empresas Toshiba, Mitsubishi y Westinghouse, encontrando algunas soluciones preferibles al diseño primitivo. La figura 8 [9] presenta el esquema de la que fue seleccionada como más eficiente

Una vez establecido el ciclo óptimo, se realizó un estudio muy riguroso sobre diseño y viabilidad de los diferentes componentes (turbinas, intercambiadores, quemadores, etc.), por lo que, dado el prestigio de los participantes, se puede confiar razonablemente en la aptitud mecánica de la solución elegida.

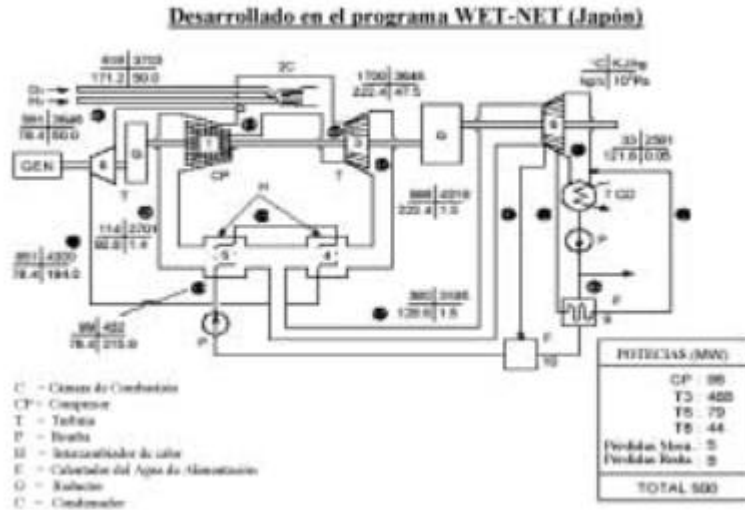


Figura 8. Diagrama de la configuración seleccionada en el programa japonés, basada en el Ciclo de Graz

5. A modo de conclusión

Al finalizar el presente trabajo de divulgación sobre una de las más prometedoras vías para sustituir los actuales suministros energéticos, no hemos podido resistir la tentación de incluir la figura 9, donde la prestigiosa Universidad de Delf (Holanda), situada en uno de los países más preocupados por la contaminación en general, y en particular (con razón) por los efectos de los gases de efecto invernadero [10], realiza un ejercicio de prospectiva sobre esta materia.

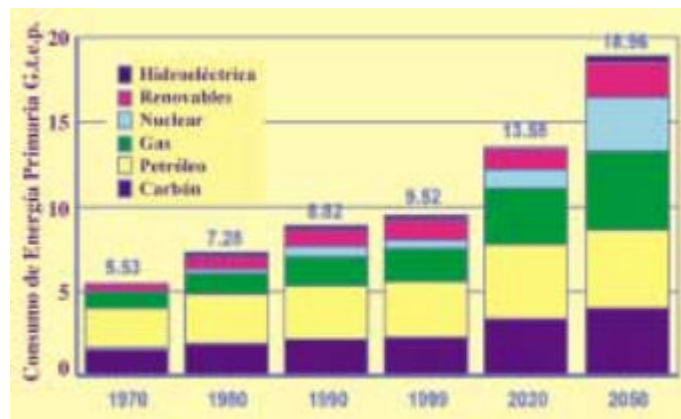


Figura 9. Evolución y perspectivas de las distintas fuentes energéticas

Previsiblemente, todas las personas que hayan leído este trabajo estarán jubiladas en el año 2050, momento en que, según este estudio, las energías renovables suministrarán aproximadamente el 15% de la demanda. Con esta perspectiva, parece prudente que, aun intensificando las investigaciones para sustituir las fuentes de suministro tradicionales -que no debe olvidarse, objetivamente presentan muchas propiedades favorables, quizá clave en su desarrollo-, la sociedad tenga presente que “el ahorro energético continuará siendo, por mucho tiempo, la mejor energía alternativa”.

6. Bibliografía

- [1] “El gas natural y el hidrógeno en automoción”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 11 de marzo (2003).
- [2] Andrés, J. y Andrés, P. “Carburantes Sintéticos”, INGENIERIA QUIMICA, Mayo (1999).
- [3] <http://www.sparksdata.co.uk/>
- [4] Mercedes Ballesteros. <http://www.fisicaysociedad.es/pdfs/biomasa.pdf>
- [5] Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Baleares. Jornada sobre energía, Abril (2003).
- [6] A new combined gas steamcycle promising up to 60% thermal efficiency. H. Jericha. Paper 10.1, Cimac, Paris (1983).
- [7] CO₂ – Retention capability of CH₄/O₂ – fired Graz cycle. 21st International Congress on combustion engines. Interlaken (1995).
- [8] <http://www.enaq.or.jp/WE-NET>
- [9] A study of thermodynamic cycle and system configurations of hydrogen combustion turbines. H. Sugisita y H. Mori
- [10] http://www.ocp.tudelft.nl/ev/prof/fac_pres.pdf