



Recepción: 13 de junio de 2005
Aceptación: 7 de septiembre de 2005

* Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México.
Correo electrónico:
menmeau777@hotmail.com

El hidrógeno y la energía

Aurelio Mendoza Medellín*

Resumen. El hidrógeno es el elemento más simple, pero es fundamental para la vida. En el futuro sustituirá a los combustibles fósiles como fuente de energía para las máquinas hechas por el hombre. Hoy en día su uso es muy caro, pero ya existen motores que trabajan quemando este gas. En el sol la fusión de hidrógeno libera cantidades inconmensurables de energía, que en parte es captada por los cloroplastos, que la transforman en la energía química contenida en los carbohidratos resultantes de la fotosíntesis. Esto implica la transferencia del hidrógeno del agua al dióxido de carbono. Los animales liberan la energía de los combustibles biológicos revirtiendo dicha reacción a través del metabolismo oxidativo, la cadena respiratoria y la fosforilación oxidativa. El hidrógeno es vital para producir ATP y por lo tanto para la vida.

Palabras clave: hidrógeno, energía, metabolismo, combustibles.

Hydrogen and Energy

Abstract. Hydrogen is the simplest element, but it is the basis to life. In future it will substitute fossil fuels as an energy source for man-made machines. Nowadays, its utilization involves an expensive process, but there already exist hydrogen-propelled engines. Hydrogen fusion occurring in the sun releases immeasurable amounts of energy which is partially captured by chloroplasts. Chloroplasts transform sunlight into the chemical energy contained in the carbohydrates resulting from photosynthesis. This implies transfer of hydrogen from water to carbon dioxide. Animal organisms release the energy of biological fuels by reversing such reaction through oxidative metabolism, respiratory chain and oxidative phosphorylation. Hydrogen is vital for ATP production and hence for life.

Key words: hydrogen, energy, metabolism, fuels.

Introducción

Casi cualquier persona sabe algo sobre gases como el oxígeno, el dióxido de carbono y el nitrógeno, gases famosos por su relevancia para la biósfera, por lo cual reciben gran atención y desde la infancia aprendemos algunos aspectos importantes de ellos.

En cambio, el hidrógeno es un gas desconocido para muchos. Quizá algunos de los de mayor edad lo recuerden por el hecho de haber sido utilizado hace unos 70 años para hacer que flotar los

dirigibles, hasta que el fatal desenlace del Hindenburg en 1937 marcó el final de la era de dichos vehículos como medios de transporte.

El hidrógeno es la sustancia que tiene la densidad más baja, y de ahí su utilización en la aplicación antes mencionada. Su densidad apenas representa 7% de la del aire y no existe en forma libre en la Tierra, porque cualquier cantidad que se llegue a producir y a liberar escapa inexorablemente hacia el espacio exterior. El campo gravitacional de la Tierra no basta para mantener al hidrógeno en la

atmósfera como lo hace con el oxígeno, el nitrógeno, el dióxido de carbono y muchos otros gases. Y sin embargo, el hidrógeno es fundamental para preservar la vida.

La mayor parte de los átomos de este elemento se encuentran formados solamente por un protón y un electrón. Aproximadamente uno de cada 5000 átomos de hidrógeno contiene también un neutrón, y en una proporción aún menor los átomos de hidrógeno tienen dos neutrones. Estas tres formas isotópicas del hidrógeno se conocen como protio, deuterio y tritio, respectivamente. El hidrógeno que se encuentra en la Tierra se halla combinado con otros elementos, principalmente con el oxígeno, formando el agua (H_2O) que cubre 3/4 de la superficie terrestre. Otro importante grupo de sustancias en las que interviene el hidrógeno es el de los hidrocarburos compuestos formados exclusivamente por carbono e hidrógeno que son los componentes químicos del petróleo y del gas natural.

El presente artículo tiene el propósito de mostrar la relevancia del hidrógeno como fuente de energía universal.

El hidrógeno sustituirá en el futuro a los combustibles fósiles para la operación de las máquinas hechas por el hombre.

1. Energía y reacciones químicas que involucran al hidrógeno

El hidrógeno es el elemento que se asocia por excelencia con la energía, tanto en el mundo de la física como en el de la biología. Si se produce hidrógeno con un surtidor de laboratorio basado en la reacción del ácido sulfúrico con el zinc (figura 1), el gas producido arde con toda facilidad en el aire cuando se aplica una chispa o una flama, lo cual denota la energía potencial del hidrógeno en un sentido puramente químico (como se verá más adelante, el hidrógeno también tiene gran relevancia en lo concerniente a su energía nuclear). Este proceso corresponde a la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno atmosférico, resultando agua (figura 2).

Se trata de una reacción fuertemente exotérmica, es decir, que libera energía en forma de calor. Por cada mol de hidrógeno que reacciona (equivalente a 2 g), se liberan 283 kJ, es decir casi 68 kcal. Para tener una idea de lo que esto representa, si se aplicara dicha cantidad de energía a 1 litro de agua a 15° C, aumentaría su temperatura a 83° C.

El principal problema para utilizar el hidrógeno como fuente de energía en el contexto mencionado, es que el hidrógeno solamente se encuentra en la Tierra combinado con otros elementos y para utilizarlo como fuente de energía de acuerdo con la reacción de la figura 2, es preciso obtenerlo libre a partir de algún com-

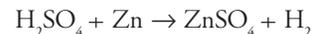


Figura 1. Reacción clásica para la producción de hidrógeno en el laboratorio.



Figura 2. Reacción de combustión del hidrógeno.

puesto que lo contenga. La principal fuente de hidrógeno potencialmente asequible es el agua, compuesto que se encuentra en cantidades prácticamente inagotables en los océanos. Sin embargo, si la formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno es un proceso que libera energía (figura 2), el proceso inverso, es decir la ruptura de las moléculas de agua para liberar hidrógeno y oxígeno (hidrólisis) tiene un costo energético de igual magnitud. Por cada mol (2 g) de hidrógeno que se produzca a partir de agua se tienen que aportar 283 kJ de energía en una forma apropiada, por ejemplo, como corriente eléctrica. El mayor inconveniente de esto es que actualmente la electrólisis del agua es un proceso caro en grado tal que lo hace incosteable para la producción masiva de hidrógeno.

Cuando pueda producirse hidrógeno a partir del agua con un costo aceptable, se convertirá en el mejor combustible. En Argentina se desarrolla un experimento piloto que pretende aprovechar la energía eólica para obtener energía eléctrica y aplicarla a la electrólisis del agua. Los fuertes y constantes vientos de la Patagonia pueden ser una fuente de energía eléctrica barata que haga redituable la obtención de hidrógeno a partir del agua. Se considera que con el tiempo la separación del hidrógeno y del oxígeno del agua se podrá lograr a partir de la energía solar (fotólisis).

Ya existen prototipos de vehículos impulsados por combustión de hidrógeno, como el *HydroGen-1* construido por una empresa automotriz estadounidense de cobertura internacional, con un diseño que permite quemar hidrógeno. El combustible alimenta la máquina desde un depósito con capacidad para 75 litros de hidrógeno líquido. El motor consta de casi 100 celdas, a cada una de las cuales se hace llegar hidrógeno gaseoso y aire. Las celdas son dispositivos que permiten transformar la energía liberada por la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno del aire, facilitada por un catalizador de platino, en corriente eléctrica, generando una potencia de 75 caballos.

Recientemente se anunció el proyecto de la misma empresa multinacional con el gobierno de los Estados Unidos de América para producir en los siguientes cinco años 40 vehículos impulsados por hidrógeno, de una nueva generación, conocidos como

HydroGen-3, con un costo global de 88 millones de dólares, lo que da una idea del costo de producción de estos vehículos en la actualidad.

Sin embargo, si se toma en cuenta que las expectativas de encontrar nuevos yacimientos de combustibles fósiles cada vez son menos alentadoras, y que ciertas estimaciones indican que dentro de 35 años quedará solamente el 10% de las reservas de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), se verá lo imperativo que es el desarrollo de fuentes alternativas de energía, entre las que sin duda el hidrógeno ocupará un lugar destacado.

2. Combustión de las sustancias orgánicas

La combustión es el proceso de combinación con el oxígeno, acompañado por la liberación de grandes cantidades de calor y luz si se lleva a cabo en la atmósfera, como cuando se quema madera, petróleo o cualquier otro material combustible, incluyendo el hidrógeno según se indica previamente (figura 2). La reacción de los combustibles fósiles con el oxígeno produce dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). La fuerza de los enlaces entre el carbono y el oxígeno (C-O) así como entre el hidrógeno y el oxígeno (H-O) es notablemente menor a la que existe entre los átomos de carbono (C-C) y entre el carbono y el hidrógeno (C-H), que abundan en los combustibles fósiles. A esas diferencias de fuerza entre los enlaces mencionados se debe que la combustión libere importantes cantidades de energía (figura 3).

Como puede observarse, el hidrógeno juega un papel fundamental en la composición de los combustibles orgánicos. De hecho, mientras mayor es la proporción de hidrógeno y menor la de oxígeno, el combustible tiene un mayor contenido de energía, por lo que se dice que se halla más reducido; por el contrario, cuando la proporción de oxígeno es mayor y menor la de hidrógeno, el contenido energético resulta menor y se dice que la sustancia se encuentra más oxidada.

Así como el funcionamiento de las máquinas construidas por el hombre demanda energía derivada de los combustibles que utilizan gasolina, diesel, gas natural, etc., la energía que requieren las células y los organismos vivos deriva en su conjunto de la utilización de combustibles biológicos, es decir las grasas (ácidos grasos), los carbohidratos (monosacáridos) y las proteínas (aminoácidos). Si se analiza la composición de estos grupos de sustancias se encontrará que las grasas son las más reducidas. Por ejemplo, si se compara un ácido graso, un monosacárido y un aminoácido, el ácido graso presentará un grado de reducción notablemente mayor al de las otras dos sustancias (figura 4).

Esto guarda relación con el hecho de que el valor calórico de las grasas (9 kcal/g o 37.6 kJ/g) es muy superior al de los carbohidratos y al de las proteínas (4 kcal/g o 16.7 kJ/g en cada caso). El que la grasa represente una forma de energía más concentrada es la razón por



Figura 3. Combustión del etano. Esta sustancia tiene solamente enlaces entre carbono y carbono y entre carbono e hidrógeno, ambos de gran fuerza. Los productos, en cambio, contienen enlaces entre carbono y oxígeno y entre hidrógeno y oxígeno, en ambos casos de fuerza muy baja. La diferencia de energía entre los enlaces del etano y de sus productos de combustión explica la liberación de grandes cantidades de energía al ocurrir la reacción. Por cada mol de etano (30 g) que se quema, se liberan al medio 1560 kJ, es decir 373.2 kcal.

Ácido caproico	Glucosa	Leucina
$\text{CH}_2-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$	$\text{CHO}-[\text{CH}(\text{OH})]_4-\text{CH}_2\text{OH}$	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{COOH}$
11 H/ 2 O = 5.5	12 H/ 6 O = 2	9 H/ 3 O = 3

Figura 4. Comparación del grado de reducción de tres combustibles biológicos con un mismo número de carbonos. Se ha dividido el total de átomos de hidrógeno entre el total de átomos de oxígeno para obtener el número de hidrógenos por cada oxígeno. Algunos hidrógenos se pierden antes de que se catabolicen estas sustancias, como los hidrógenos de los grupos carboxilo (COOH). El grupo amino (NH_2) de la valina se pierde junto con el hidrógeno del mismo carbono, recibiendo a cambio un átomo de oxígeno (transaminación). En el cálculo se han hecho estos ajustes.

la que en el curso de la evolución ha sido seleccionada como el material más importante para almacenar la energía.

3. Liberación de energía a partir de los combustibles biológicos

La obtención de energía a partir de los ácidos grasos, la glucosa y los aminoácidos, como proceso, consiste en la remoción gradual del hidrógeno de dichas sustancias mediante ciertas vías metabólicas.

El metabolismo energético incluye un cierto número de reacciones de deshidrogenación, en las cuales el contenido de hidrógeno de los productos es menor al de los reactivos, tratándose por lo tanto de productos oxidados. Vías metabólicas como la glucólisis (degradación de glucosa a piruvato o lactato), la β -oxidación (catabolismo de ácidos grasos a acetil CoA) y el ciclo de Krebs o ciclo del ácido cítrico (catabolismo de acetilo a CO_2) llevan a cabo este proceso de deshidrogenación, para lo cual existen enzimas deshidrogenasas que catalizan la remoción del hidrógeno de los sustratos correspondientes. Estas enzimas solamente actúan en presencia de cofactores especializados en el transporte de hidrógeno, como son el NAD^+ (nicotinamida adenina

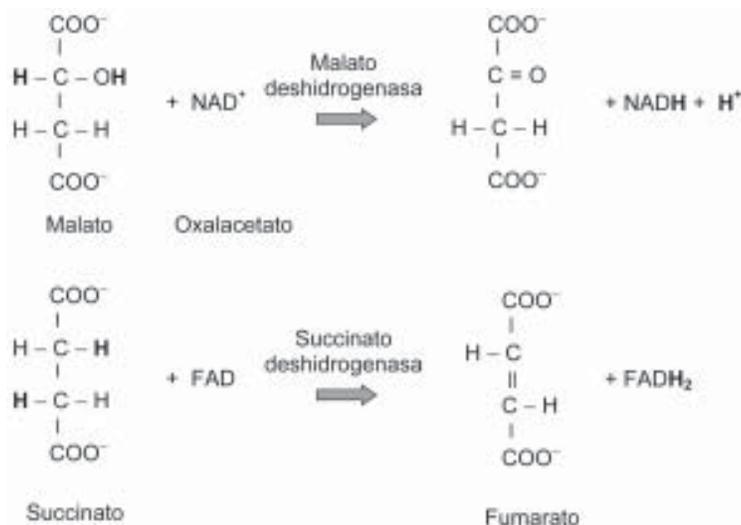


Figura 5. Deshidrogenación del malato por la enzima *malato deshidrogenasa* en la matriz mitocondrial, y del succinato, por la enzima *succinato deshidrogenasa*, presente en la membrana mitocondrial interna. Estas reacciones forman parte del ciclo de Krebs y son ejemplos del proceso general de remoción de hidrógeno de los sustratos derivados de los combustibles biológicos. NAD^+ y FAD son respectivamente los cofactores de las enzimas indicadas, y se reducen al ocurrir las reacciones. En negritas se indican los átomos de hidrógeno que se transfieren de los sustratos a los cofactores.

dinucleótido) y el FAD (flavina adenina dinucleótido). Al recibir los hidrógenos que las deshidrogenasas remueven de sus sustratos, se producen las formas reducidas correspondientes, $\text{NADH} + \text{H}^+$ y FADH_2 (figura 5).

En última instancia, los carbonos terminan formando dióxido de carbono, mientras que la energía que contenían los combustibles biológicos se conserva temporalmente en los hidrógenos transportados por los cofactores enzimáticos indicados.

La función primordial de los cofactores reducidos $\text{NADH} + \text{H}^+$ y FADH_2 es ceder los hidrógenos que transportan a lo que se denomina *cadena respiratoria*, que es una estructura de cuatro complejos multiproteicos que existe en múltiples copias en la membrana interna de cada mitocondria. Al activarse la cadena respiratoria con los hidrógenos que recibe de los cofactores reducidos, se convierte en una bomba de hidrogeniones (núcleos de átomos de hidrógeno), que transfiere estos iones de la matriz mitocondrial hacia el espacio intermembranal, generando un gradiente electroquímico que representa la energía que antes estuvo presente en las moléculas del combustible catabolizado.

Finalmente, el gradiente de hidrogeniones se convierte en una fuerza que impele a dichos iones a regresar a la matriz mitocondrial. La arquitectura de la membrana mitocondrial interna es tal que, en condiciones normales, la única vía para el retorno de los hidrogeniones a la matriz mitocondrial es un canal especializado

presente en un complejo multiproteico que atraviesa la membrana mitocondrial interna y que se denomina ATP sintasa o complejo V, cuya actividad es fundamental para las células, ya que es la estructura que sintetiza ATP a partir de sus precursores ADP y fosfato inorgánico en condiciones aeróbicas.

La ATP sintasa fue diseñada para acoplar la producción de ATP al flujo de hidrogeniones desde el espacio intermembranal hacia la matriz mitocondrial.

Obsérvese la participación del hidrógeno en la secuencia de eventos que culmina con la producción de ATP (figura 6), compuesto necesario para el aporte de energía a los procesos de trabajo biológico que ocurren en los organismos vivos, como son el movimiento, la síntesis química y la distribución asimétrica de iones a los lados de las membranas.

4. El hidrógeno y la energía cósmica

El primer principio de la termodinámica establece que la energía del universo es constante y por lo tanto no se crea ni se destruye, sino que sólo se transforma. De acuerdo con esto, la energía que contienen los combustibles biológicos debe provenir de alguna parte y se integra a las moléculas de los combustibles cuando éstos se forman.

La síntesis de los combustibles biológicos ocurre primigeniamente mediante la fotosíntesis en las algas azul-verdes (cianobacterias) y en las plantas verdes. En forma global este proceso corresponde a la combinación del dióxido de carbono, que captan de la atmósfera, con el agua para formar carbohidratos y liberar oxígeno (figura 7).

En la fotosíntesis se producen las hexosas fructosa y glucosa (en ambos casos la fórmula condensada es $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) y a partir de ellas se generan sacarosa (disacárido formado por glucosa y fructosa) y almidón (polímero de glucosa). En el organismo humano (y en los mamíferos en general) los carbohidratos pueden transformarse en grasa a través de vías metabólicas bien conocidas y, con la participación de ciertos compuestos nitrogenados, también pueden sintetizarse todos los aminoácidos no esenciales (los esenciales no se pueden sintetizar y deben ser ingeridos en los alimentos). De esta manera, los combustibles biológicos de plantas y animales tienen su origen en el proceso fotosintético y son moléculas que resultan de la capacidad de la maquinaria bioquímica de los cloroplastos para transformar la energía luminosa en energía química.

Por otra parte, la energía luminosa que procede del sol es el resultado de un proceso nuclear en el que también interviene el hidrógeno. El sol y el resto de las estrellas en el universo son cuerpos formados originalmente por hidrógeno. Dadas las enormes temperaturas que se alcanzan en el centro de cada estrella, el hidrógeno adquiere el estado de plasma, consistente en una ionización total. La energía del movimiento de los protones o hidrogeniones (núcleos de hidrógeno, H^+) es tal que al colisionar unos con otros ocurre su fusión a pesar de tratarse de partículas con carga positiva que en otras circunstancias impedirían incluso su mutua aproximación.

Para tratar de explicar este fenómeno, hay que considerar lo siguiente: si se aproxima desde el infinito un protón a un deuterón (núcleo que contiene un protón y un neutrón) el efecto de la carga positiva de cada una de estas partículas hace que aumente cada vez más la cantidad de energía necesaria para continuar el acercamiento. Sin embargo, una vez que se supera una distancia crítica entre las dos partículas (aproximadamente 10^{-13} cm), se establecen ciertas uniones entre ellas, resultando una estructura nuclear muy estable y cuya producción se acompaña por un descenso importantísimo en el contenido energético de la partícula resultante. Es decir que una vez rebasada la distancia crítica desaparece la enorme repulsión entre las partículas y entonces se atraen en un grado superlativo, liberándose una gran cantidad de energía.

Bajo las condiciones imperantes en el centro de las estrellas (alrededor de 15 millones de grados centígrados), la fusión de los hidrogeniones ocurre sin ningún problema y como productos se obtienen núcleos de helio (estructuras formadas por dos protones y dos neutrones), positrones (electrones positivos) y mucha energía (figura 8).

La transformación de 4 protones en un núcleo de helio (dos protones y dos neutrones) implica que dos de los 4 protones se conviertan en neutrones, lo cual ocurre por emisión de positrones (β^+).

Después de sufrir una serie de transformaciones en su curso hacia la superficie de las estrellas, la energía nuclear liberada por la fusión del hidrógeno sale parcialmente al espacio en forma de luz, gracias a lo cual pueden ser vistas desde la Tierra.

Si se compara la masa de 4 protones con la de las partículas generadas en el proceso de fusión (1 núcleo de helio y 2 posi-

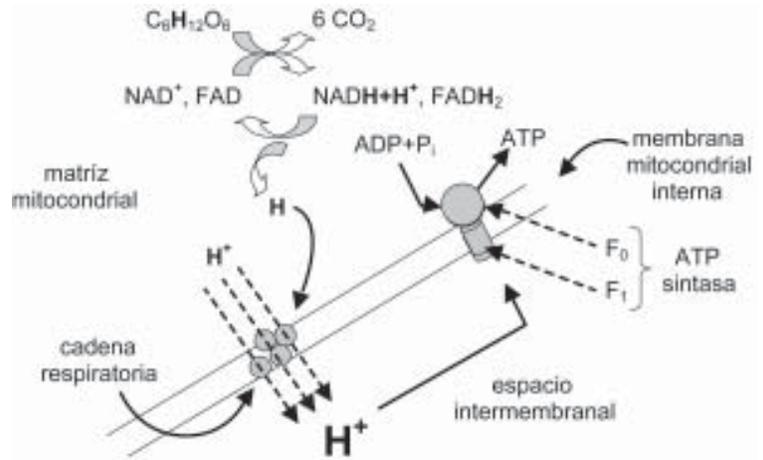


Figura 6. Esquema que muestra la relación que existe entre el hidrógeno de los combustibles biológicos (se utilizó glucosa como ejemplo) y la generación de ATP. Los hidrógenos liberados por los cofactores reducidos ($NADH+H^+$ y $FADH_2$) activan la cadena respiratoria, que entonces bombea hidrogeniones de la matriz mitocondrial al espacio intermembranal formando un gradiente con dichos iones (denotado en el esquema por tamaños diferentes del símbolo H^+). Obsérvese que los hidrogeniones son núcleos de átomos de hidrógeno, por lo cual también es relevante la participación de dicho elemento en esta etapa del proceso de transducción de energía. Los hidrogenos se destacan con negritas para remarcar su intervención en la transducción de energía. La transformación de cualquier combustible en CO_2 sólo ocurre en presencia de oxígeno. La reacción completa para la glucosa es como sigue: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$.

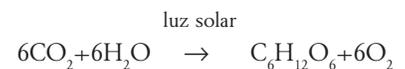


Figura 7. Reacción global de la fotosíntesis. Obsérvese que el agua se separa en sus componentes, liberándose el oxígeno como gas a la atmósfera. Por su parte, el hidrógeno reduce al dióxido de carbono, generándose entonces carbohidratos ($C_6H_{12}O_6$) en los cuales existen enlaces entre carbono y carbono así como entre carbono e hidrógeno. En el contexto natural la luz solar hace posible la formación de dichos enlaces de alto contenido energético.

trones), se encuentra que existe un déficit de masa del 0.7%, es decir que la masa de los productos representa solamente 99.3% de la masa de los 4 protones. 0.7% de la masa de los protones deja de ser masa para transformarse en energía. Aunque este déficit de masa puede parecer muy modesto, en realidad corresponde a una cantidad enorme de energía pues la relación entre la masa y la energía en el contexto mencionado depende de un factor de magnitud excepcionalmente grande, ya que se trata de la segunda potencia de la velocidad de la luz, de acuerdo con la fórmula einsteiniana $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz, es decir 3×10^{10} cm/seg. Elevando al cuadrado este valor se obtiene 9×10^{20} y es éste el factor que, multiplicado por la masa que

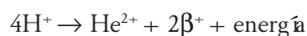


Figura 8. Reacción global de la fusión de hidrógeno que ocurre en el centro de las estrellas. He^{2+} , núcleo de helio (consta de dos protones y dos neutrones); β^+ , positrón (electrón con carga positiva).

desaparece, permite calcular la energía resultante. Así se explica que aún con una masa relativamente pequeña se liberan cantidades inmensurables de energía. Se ha calculado que cada segundo se transforman en el sol aproximadamente 4 millones de toneladas de hidrógeno en energía. Después de unos 4500 millones de años de haberse formado el sol, el hidrógeno constituye aproximadamente 80% de su masa y el helio el 20% restante.

Como puede apreciarse, el hidrógeno es la fuente de la energía universal. La vida sobre nuestro planeta, tal como la conocemos, depende estrictamente de la fusión del hidrógeno. Con un criterio científico se considera muy probable que exista vida alrededor de otras estrellas y sería difícil imaginar que la vida extraterrestre no dependiera del mismo proceso. Sin duda es significativo que más de 94% de la masa contenida en el universo sea hidrógeno.

5. Fusión de hidrógeno en la tierra

Desde hace décadas se ha estudiado la posibilidad de obtener energía a partir de la fusión del hidrógeno, tratando de reproducir de manera controlada el proceso nuclear de las estrellas. El rendimiento energético sería mucho mayor que en el caso de la fisión nuclear, la cual consiste en la ruptura de núcleos pesados e inestables, como los del uranio o del polonio, en diversos núcleos relativamente menores y con menor grado de inestabilidad. La fisión como método para obtener energía de manera controlada a partir

del núcleo atómico es una realidad desde hace varias décadas (reactores en las plantas nucleares), pero debido a la explotación de ese logro científico se ha incrementado notablemente la cantidad de desechos radiactivos que inevitablemente se generan en el proceso. Obtener energía a partir de la fusión del hidrógeno permitiría un rendimiento energético notablemente mayor al de la fisión nuclear, y de manera muy importante, no habría desechos radiactivos pues el producto de la fusión es solamente helio (figura 8). Sin embargo, la dificultad para generar temperaturas lo bastante grandes para hacer posible la fusión y la ausencia de contenedores

El hidrógeno participa de manera fundamental en todas las etapas de la transducción de energía que hacen posible la vida sobre nuestro planeta.

capaces de soportarlas han ido postergando una y otra vez la materialización del proyecto. Al parecer, si algún día se hace realidad la liberación controlada de energía por fusión de hidrógeno será mediante la utilización de contenedores no materiales, sino formados por campos magnéticos. La cuestión relativa a la temperatura necesaria para lograr la fusión se resolvió hace décadas para procesos no controlados, es decir para lo que se ha dado en llamar la bomba de hidrógeno. El evento se logró detonando una bomba atómica (fisión) en el centro del dispositivo donde debía ocurrir la fusión.

Evidentemente no es lo mismo una bomba de hidrógeno que un reactor de fusión de hidrógeno y habrá que esperar más experimentación de vanguardia para encontrar la forma de producir la fusión en las condiciones necesarias para que el proceso pueda ser aprovechado para la generación de energía aplicable al desarrollo.

Lecturas recomendadas

- | | | |
|--|--|---|
| Burns, R. A. (2003). <i>Fundamentals of Chemistry</i> . 4 th edition, Prentice Hall. | Mendoza-Medellín, A. (2005). <i>Noiones de Química para las Áreas Médica y Biológica</i> . UAEM, Toluca. | <i>Nature of Matter and Change</i> . 3 rd edition, McGraw Hill. |
| Chang, R. (1998). <i>Chemistry</i> . 6 th edition, McGraw Hill. | Russo, S. y M. Silver (2000). <i>Introductory Chemistry, a Conceptual Focus</i> . Addison Wesley Longman Inc. | Stryer, L. (1998). <i>Biochemistry</i> , 4 th edition, Freeman and Company. |
| Devlin, T. M. (ed) (2002). <i>Textbook of Biochemistry with clinical correlations</i> . 5 th edition, Wiley-Liss. | Nelson, D. L. y M. M. Cox (2000). <i>Lehninger Principles of Biochemistry</i> . 3 rd edition, Worth Publishers. | Valente, M. (2005). <i>Energía patagónica a puro viento e hidrógeno</i> . http://ipsnoticias.net/print.asp?idnews=33788 (20-05-2005). |
| Klare, M. T. (2005). <i>El colapso energético que se avecina</i> . http://colombia.indymedia.org/news/2005/04/23758.php | Silberberg, M. S. (2003). <i>Chemistry, the Molecular</i> | <i>Estados Unidos impulsa el hidrógeno como combustible para coches</i> . www.vnunet.es (31-03-2005). |