

Química y energía: una unión indisoluble

Valentín González

Resumen: Las reacciones químicas se producen siempre con intercambio de energía. Igualmente, en la producción de energía se necesita la química, de forma directa o indirecta, para liberarla. En este artículo se pasa revista a los procesos utilizados para producir energía y se pone de manifiesto la aportación de la química a su desarrollo. Se analiza el papel de las energías renovables en la producción y coste de la energía y se concluye el papel fundamental de la química en la producción de energía sostenible y a bajo coste de producción.

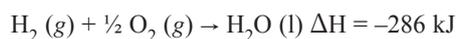
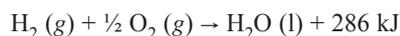
Palabras clave: Química y energía, energía térmica, energía de fisión, energía de fusión, energías renovables.

Abstract: Chemical reactions always proceed liberating or absorbing energy. Likewise, in energy production, chemistry is necessary to liberate it, in a direct or indirect way. In this paper, used processes for energy production are reviewed and the role of chemistry is pointed out. The role of renewable energies is also pointed out, taking into account its costs, finalizing with the important role of the chemical research to reach a procedure to generate sustainable energy to lower production costs.

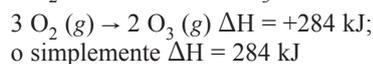
Keywords: chemistry and energy, thermal energy, fission energy, fusion energy, renewable energies.

Todas las reacciones químicas están afectadas por un término energético y, para obtener energía, de forma directa o indirecta, es imprescindible la química.

Así, en la reacción de obtención del agua se desprende energía. Se trata de una reacción exotérmica. Este hecho se expresa de cualquiera de las dos formas siguientes:



En cambio, la reacción de obtención del ozono a partir del oxígeno, precisa el aporte de energía para progresar:



El intercambio energético que acompaña a un proceso se expresa en forma de *variación de entalpía*, ΔH . Por convenio, a las reacciones exotérmicas se les asigna una variación de entalpía negativa: $\Delta H < 0$. Y a las reacciones endotérmicas, se les asigna una variación de entalpía positiva: $\Delta H > 0$

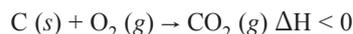
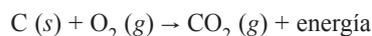


V. González

Área Departamental de Ingeniería Química
Facultades de Ciencias
Universidad Autónoma de Madrid
C-e: valentin.gonzalez@uam.es

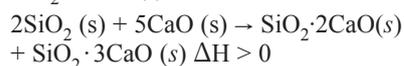
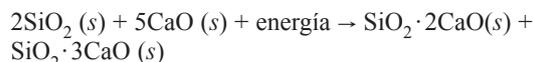
Recibido: 06/06/2013. Aceptado: 09/01/2013.

Las reacciones químicas más utilizadas para la obtención de energía son las de combustión de combustibles fósiles, como carbón, petróleo, gas, madera, etc., que son, sencillamente, procesos de oxidación de la materia que contiene carbono; que se pueden expresar de alguna de estas dos formas:



En algunos procesos de obtención de energía (hidroeléctrica) parece que no interviene la química, sin embargo la química es imprescindible en la obra civil necesaria.

Así, cuando tenemos que levantar un dique de hormigón que cierre la presa, es necesario producir miles de toneladas de cemento y, el cemento, es una sustancia (mezcla de silicatos dicálcico y tricálcico) que se produce por reacción entre la sílice, SiO_2 , y la cal, CaO , según:



Hay que aclarar que la mezcla de silicatos dicálcico y tricálcico (componentes esenciales del cemento) no se obtienen a partir de los compuestos puros, sílice y cal, pues para ello se precisarían temperaturas superiores a los 2.000 °C. Para rebajar la temperatura de reacción hasta unos 1400 °C (lo que disminuye muy ostensiblemente los costes de fabricación), es por lo que se utiliza arcilla y caliza.

Particularmente para las presas se ha de producir un cemento de fraguado lento, con silicato dicálcico como componente mayoritario, pues el silicato tricálcico es de fraguado rápido y, el calor desprendido rápidamente produce el resquebrajamiento del dique durante la construcción, pues no es fácil evacuar el calor generado. El fraguado del cemento es un proceso en el que las partículas de cemento se hidratan, según una reacción exotérmica, transformándose en otras partículas mucho menores, tan pequeñas que se atraen por fuerzas

moleculares tipo Van der Waals, alcanzando unas resistencias mecánicas a la compresión de hasta 500 Kg/cm². El compuesto que se forma por hidratación del cemento es un silicato complejo denominado gel de tobermorita, por ser de estructura parecida a unas rocas que se encuentran en Tobermory, Inglaterra y tiene la particularidad que se transforma en una masa plástica que se adhiere a la arena, rocas, ferralla, etc., formando el mortero, el hormigón y el hormigón armado.

Producción de energía

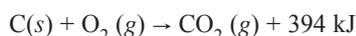
Actualmente utilizamos numerosos procesos convencionales que generan calor y, además, contamos con las llamadas energías renovables que no utilizan directamente reacciones químicas para obtener energía: como es el caso de la energía eólica, solar, de las mareas, etc.

Veamos los principales procesos para producir energía:

1. Combustión de compuestos carbonosos: carbón, petróleo, gas, madera, biomasa, etc.
2. Fisión nuclear del uranio de masa atómica 235 (²³⁵U), que constituye el 0,7% del uranio contenido en los minerales. El resto, el 99,3%, es uranio de masa atómica 238 (²³⁸U), no físil. El ²³⁸U, aunque no es físil, puede producir plutonio de masa atómica 239, que sí lo es. Este hecho se utiliza en los reactores reproductores, de cuarta generación, que son reactores con un espectro de neutrones rápidos, en los que se coloca un recubrimiento de ²³⁸U alrededor del núcleo para que se produzca plutonio con los neutrones sobrantes de la fisión.
3. Las energías renovables están basadas en fuentes de energía inagotable para periodos de tiempo de magnitud humana, como por ejemplo el sol. Las más significativas son: la solar térmica y fotovoltaica, la eólica, la hidráulica (extendida en el mundo desde hace bastantes años), la biomasa (también utilizada tradicionalmente) y, como menos significativas a nivel global: la geotérmica, mareomotriz y de las olas.

La combustión de los compuestos carbonosos

Se basa en la oxidación del carbono que se transforma en dióxido de carbono con desprendimiento de energía:



Esta reacción es válida para cualquier compuesto que contenga carbono, como carbón, petróleo, gas, madera, biomasa, etc., aunque en el caso de los hidrocarburos contenidos en el petróleo y el gas natural, o los componentes orgánicos diversos que contienen la madera y la biomasa, no solo se oxida el carbono, sino también el hidrógeno, azufre, etc., que entran en su composición.

La energía térmica obtenida en un proceso de combustión, puede destinarse a calentar agua hasta convertirla en vapor, que se alimenta en una turbina, acoplada a un generador, para producir energía eléctrica. En otras ocasiones el agua caliente se utiliza directamente en un intercambiador de calor

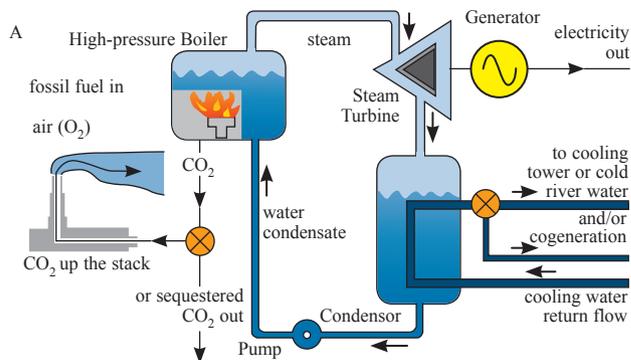


Figura 1. Esquema de la producción de energía por vía térmica.

para calentar otras sustancias. En la Figura 1 se presenta un esquema de la producción térmica de energía eléctrica. El rendimiento de la transformación de la energía térmica en energía eléctrica oscila entre un 33% y un 38%^{1,2}.

Una vez que comienza a condensar el agua, ha de descargarse el vapor de la turbina, condensarlo y retornarlo a la caldera, con lo que se cierra el ciclo.

Hoy en día se tiende a aumentar en lo posible el rendimiento de transformación de la energía térmica en eléctrica; para ello se utilizan las centrales de ciclo combinado en las que, de acuerdo con el ciclo de Carnot, el rendimiento se eleva aumentando la temperatura del foco caliente, en este caso la combustión; así, se quema el combustible y el gas de combustión se alimenta a una turbina de gas, unida a un alternador, produciendo energía eléctrica; como la temperatura del gas es todavía alta, cuando sale de la turbina, se utiliza para producir vapor de agua que, a su vez se alimenta a una turbina de vapor, unida a un alternador. El rendimiento global se eleva a un 50-58%². Pero, para poder utilizar el ciclo combinado, el combustible ha de ser limpio, para evitar la existencia de partículas que erosionen los alabes de la turbina de gas, por lo que estas centrales solo pueden operar con gas natural u otro tipo de gas combustible limpio.

Fisión de elementos físiiles

La fisión termonuclear es un proceso térmico de producción de energía basado en la fisión, rotura, de los átomos de uranio 235, o de torio 232, vía producción de uranio 233 por captura neutrónica y dos desintegraciones beta posteriores, según:



El cesio y el estroncio son los productos de fisión sólidos mayoritarios que aparecen en la fisión, rotura, de los átomos de uranio; realmente los radisótopos que aparecen en los elementos combustibles al descargarlos del reactor son unos 2200.

La cantidad de energía desprendida por mol de uranio fisionado es 50 millones de veces mayor que la que se desprende al quemar un mol de carbono. Por esto la cantidad de residuos que se generan son también 50 millones de veces menos que en la combustión del carbono.

La aportación de la química a la fisión nuclear es muy amplia. Comienza con la extracción y concentración del uranio del mineral, que suele hacerse mediante una lixiviación ácida

del mismo, con ácido sulfúrico diluido, recuperándose una disolución diluida de sulfato de uranilo (UO_2SO_4); el siguiente paso es la concentración de la disolución, que puede realizarse por intercambio iónico o extracción líquido-líquido, operaciones típicas de la ingeniería química y, a continuación, precipitar el uranio con sosa o amoníaco, obteniéndose diuranato de sodio ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$), o diuranato de amonio [$(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$], respectivamente. Estos diuranatos son productos comerciales, denominados *yellow cake* (torta amarilla) por su color amarillo; contienen un 60-70% de uranio, expresado como U_3O_8 . Esta sustancia debe purificarse para transformarlo en un producto de pureza nuclear. Así se evita la absorción de neutrones por esas impurezas que podrían impedir la fisión, o la reacción en cadena, por no dejar suficientes neutrones libres.

La disolución del *yellow cake* con ácido nítrico, seguida de una extracción-reextracción, con un agente extractor específico del uranio, fostato de tributilo al 30% en queroseno, permite obtener nitrato de uranilo de la pureza requerida.

A continuación se somete la disolución de nitrato de uranio puro a operaciones de evaporación para concentrarlo; calcinación en atmósfera de aire para transformarlo en trióxido de uranio (UO_3); reducción con hidrógeno a dióxido de uranio (UO_2), y conversión posterior en tetrafluoruro de uranio (UF_4) por reacción con fluoruro de hidrógeno y, finalmente, convertirlo en hexafluoruro de uranio (UF_6) por reacción con flúor elemental. El UF_6 sublima por encima de 65°C a presión atmosférica.

El hexafluoruro de uranio en fase vapor debe ser enriquecido en $^{235}\text{UF}_6$, pues el ^{235}U es el isótopo fisil. Este proceso se lleva a cabo por difusión del compuesto a través de membranas con un tamaño de poro adecuado, que separan el $^{235}\text{UF}_6$ del $^{238}\text{UF}_6$ (la velocidad de difusión de un gas es inversamente proporcional a su masa molecular: ley de Graham). Se requiere un gran número de pasos para llegar a concentraciones de $^{235}\text{UF}_6$ del orden del 5% en el UF_6 total, que es el valor requerido para preparar los combustibles nucleares de los reactores comerciales.

El compuesto enriquecido se hace reaccionar con vapor de agua e hidrógeno, a unos 600°C , para conseguir la hidrólisis-reducción del UF_6 a UO_2 . El dióxido de uranio se transforma en pastillas y sinteriza (proceso realizado a alta temperatura que transforma al producto en un material casi inerte) para transformarlo en un producto cerámico. En las Figuras 2 y 3 se presentan las pastillas de UO_2 sinterizadas y un elemento combustible comercial. De esta manera, queda de manifiesto la importancia de la química para llegar a fabricar el elemento combustible.

El núcleo de un reactor de 1.000 MW ha de contener 120 de estos elementos combustibles con un peso total de 60 toneladas que, una vez cargados producen la fisión nuclear y la consiguiente producción de energía, térmica. Esta energía térmica, se utiliza para producir vapor que se alimenta a una turbina. En la Figura 4 se presenta un esquema de un reactor nuclear de agua a presión.

Durante la operación es necesario mantener el agua del circuito primario, que es la que refrigera el núcleo, con un nivel muy bajo de contaminación, para evitar la irradiación de los operarios; para ello se utilizan filtros y resinas intercambiadoras de iones para mantener la limpieza del agua. La contaminación puede provenir de pequeñas fugas de los elementos combustibles a través de poros que pudieran formarse, particularmente en las soldaduras aunque, la probabilidad de éstas es muy baja; de hecho, actualmente, se producen pequeñas fugas en uno de cada doscientos mil elementos combustibles, gracias a los estrictos



Figura 2. Pastillas sinterizadas de dióxido de uranio enriquecido (cortesía de ENRESA).

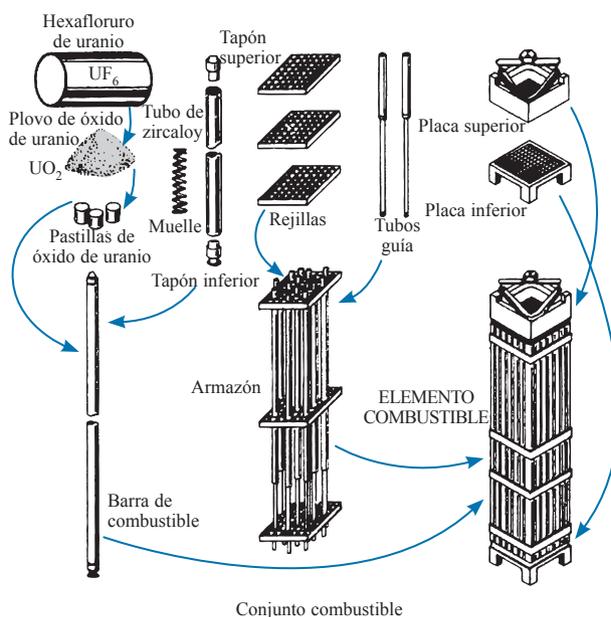


Figura 3. Conjunto combustible de dióxido de uranio: proceso de fabricación (cortesía de ENRESA).

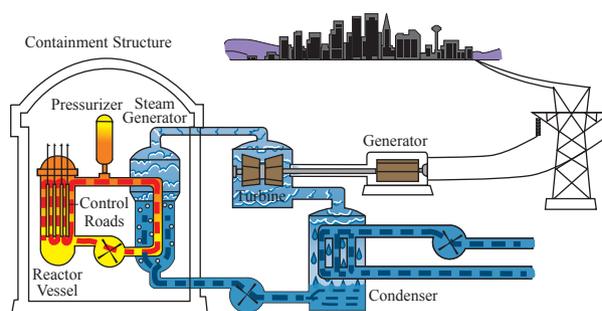


Figura 4. Esquema de un reactor nuclear de agua a presión (fuente: blog <http://www.madrimasd.org/blogs/energiafusion/>).

controles de calidad que se aplican en su fabricación. Los filtros y resinas son residuos radiactivos ya que retienen los radisótopos contenidos en el agua, ya sea en forma de pequeñas partículas o por reacción química en las resinas de intercambio iónico.

Por otra parte, las labores de mantenimiento, sustitución o reparación de piezas, precisan aplicar la química para descontaminarlas antes de proceder a su reparación o sustitución; si no se puede descontaminar, la pieza se trata como residuo radiactivo.

Los residuos líquidos se concentran por evaporación o se incineran, en el caso de los incinerables y, finalmente, se incorporan en una matriz de mortero de cemento u hormigón para evitar su dispersión y almacenarlos hasta que decaiga su radiactividad, en unos 200-300 años. Estos son los residuos de baja y media radiactividad.

Cuando los combustibles usados se descargan del reactor, han de almacenarse en una piscina para refrigerarlos pues su potencia térmica es de unos 10 kW debido a la desintegración radiactiva de los radisótopos que contienen. Al cabo de 3 años, la potencia ha bajado a 1 kW, gracias al decaimiento radiactivo. En la piscina se refrigeran y se ha de descontaminar el agua, igual a como se hacía en el circuito primario del reactor, en prevención de fugas potenciales.

Una vez pasado unos tres años, los combustibles pueden almacenarse temporalmente o reprocesarlos para extraer el uranio sobrante y el plutonio que todavía contienen para aprovechar su energía. Este proceso es típicamente químico pues, primero se disuelven las pastillas de combustible con ácido nítrico concentrado y, posteriormente, a través de extracciones líquido-líquido se separan el uranio y el plutonio del resto de los residuos. Estos últimos son productos de fisión y activación que constituyen un 4% del total.

Estos residuos son de alta radiactividad que precisan un tiempo de 500-1000 años para que decaiga su radiactividad β y γ por desintegración radiactiva. Para evitar su dispersión e irrupción en la biosfera, se incorporan a una matriz de vidrio especial, denominado al borosilicato por ser los óxidos de boro y de silicio los formadores de la red; este vidrio, que es el que se utiliza en los laboratorios químicos, es 100 veces más insoluble que el vidrio sodocálcico que se utiliza en las ventanas de los edificios. Posteriormente, se ha de almacenar hasta que decaiga su radiactividad.

Como se ha mostrado en este resumen, las operaciones y procesos químicos que se emplean en el denominado ciclo del combustible nuclear son numerosos y variados. En la Figura 5 se presenta ese ciclo del combustible.

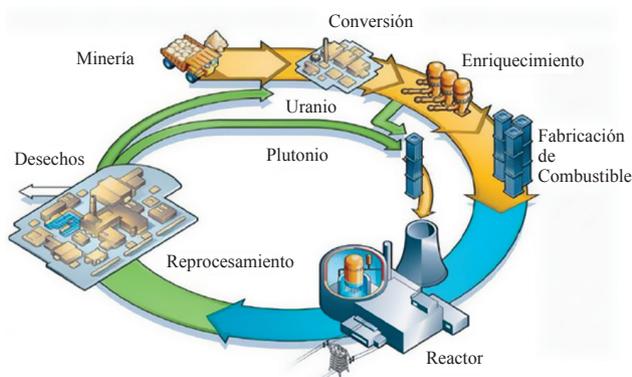


Figura 5. Esquema del ciclo del combustible nuclear (cortesía de AREVA).

Energía solar

El Sol emite $3,85 \cdot 10^{26}$ J/s y la tierra recibe de 800 a 900 W/m²; esto supone unas 10.000 veces la energía que consumimos, es decir, si el rendimiento de captación fuera del 100%, con una superficie de 500 x 500 km, algo menos de la mitad de la península ibérica, tendríamos cubiertas las necesidades energéticas mundiales.

La energía solar podemos aprovecharla mediante la utilización directa del calor (solar térmica) y mediante la captación de la radiación con semiconductores que transformen la energía en electricidad (solar fotovoltaica).

Energía solar térmica

La energía solar térmica aprovecha, directamente, la energía del sol transformándola en calor para calentar agua, o cualquier otro fluido, por ejemplo aceites, que pueden utilizarse para fines sanitarios, para sistemas de calefacción y refrigeración, para producción de otras formas de energía, etc. Según su uso, se cuenta con tres tipos de colectores:

- Baja temperatura.** Se utilizan colectores para la producción de agua sanitaria y para calefacción y refrigeración de viviendas. Se componen de un marco de aluminio, una cubierta de vidrio, placa absorbentes, enrejado de tubos de circulación, cabezales de alimentación y descarga de agua, aislante, usualmente poliestireno y depósito acumulador de agua caliente. Suelen tener una superficie normalizada de 2 m². En la Figura 6 puede verse un colector típico.
- Media-alta temperatura.** Los colectores son del tipo canal parabólico pues utilizan reflectores parabólicos en una configuración de canal para enfocar la radiación solar directa sobre un tubo largo que corre a lo largo de su foco y que conduce al fluido de trabajo, que puede alcanzar temperaturas de hasta 500 °C. La Figura 7 muestra un ejemplo de estos canales y la Figura 8 muestra cómo se consigue la concentración, por reflexiones. También se usan sistemas de torre central con heliostatos, espejos altamente reflectantes, para enfocar la luz solar, con la ayuda de un ordenador (Figura 9). En ambos casos, se calienta un fluido térmico a media-alta temperatura que puede, a su vez, calentar agua para generar vapor, o utilizar el calor en otros usos.
- También se utiliza la radiación solar en hornos solares,** que concentran la irradiación solar con lentes, llegando a alcanzar temperaturas de más de 3.000 °C.



Figura 6. Colector típico de energía solar térmica, de baja temperatura, con depósito acumulador (fuente: WIKIPEDIA).



Figura 7. Colectores cilíndrico-parabólicos captadores de energía solar térmica de media temperatura.

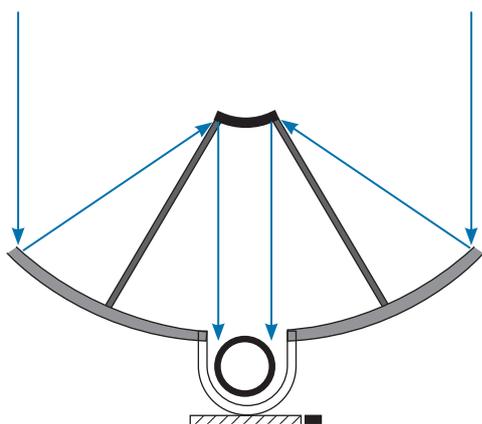


Figura 8. Esquema de la reflexión en los captadores cilindro-parabólicos (fuente: WIKIPEDIA).



Figura 9. Captación de energía solar térmica de torre central con heliostatos.

Energía solar fotovoltaica

Este aprovechamiento de la energía solar, se basa en el efecto fotoeléctrico que se produce al incidir la luz (fotones) sobre un material semiconductor que genera electrones (electricidad) Esto puede conseguirse utilizando varios tipos de células solares:

- Células de silicio monocristalino.
- Células de silicio policristalino.
- Células de silicio amorfo.
- Células de capa fina (por ejemplo, arseniuro de galio).
- Células de polímeros orgánicos.

Las células de silicio, producidas por procedimientos químicos, necesitan para su fabricación una gran cantidad de energía por lo que, las instalaciones solares fotovoltaicas son caras, por su proceso de producción y, por tanto, la inversión para construir uno de estos conjuntos de producción de electricidad por vía fotovoltaica es muy elevada. Esto hace que el kW·h producido por esta tecnología tenga un coste casi cinco veces mayor que el producido con procedimientos térmicos; por ello, para hacer atractiva la inversión en estas instalaciones es necesario prever subvenciones, normalmente de los Estados.

Es indiscutible la participación de la química en la obtención del silicio necesario para producir las células, en cualquiera de sus formas cristalinas o no, a partir de dióxido de silicio, muy extendido en la naturaleza así, como en la obtención de los componentes de las capas finas, como el arseniuro de galio. En la Figura 10 se muestra un llamado huerto solar.



Figura 10. Huerto solar de producción de energía eléctrica (fuente: WIKIPEDIA).

Tiene gran importancia el desarrollo de las células de polímeros orgánicos semiconductores, que pueden presentar esta propiedad por su estructura molecular o por dopar la estructura orgánica con un compuesto metálico pues, según los expertos, si se consiguiera llegar a un rendimiento por encima del 15%, podrían utilizarse estas células que tienen un bajo coste de fabricación, en competencia económica con el resto de los procedimientos clásicos de producción de energía. Su rendimiento actual está entre el 5-7% aunque en la bibliografía se reivindican rendimientos de hasta el 8-9%^{3,4}.

Energía eólica

Se basa en el aprovechamiento de la energía del viento al circular por diferencias de temperatura o de presión. La producción de energía se realiza transformando, mediante engranajes, el movimiento giratorio del eje de las palas en el movimiento del rotor de un alternador que produce la corriente eléctrica. En la Figura 11 puede verse un grupo de aerogeneradores.

La potencia instalada mundial en 2010 es de unos 200.000 MW; ha crecido rápidamente pues se ha multiplicado por diez desde el año 2.000. España tiene una potencia total



Figura 11. Campo de aerogeneradores eólicos (fuente: WIKIPEDIA).

instalada de más de 20.000 MW, que es casi un 10% del total mundial. Solo Alemania, en Europa, tiene una potencia instalada superior a la española.^{5, 6}

La química participa en la mayor parte de la construcción de un generador eólico, con los materiales necesarios: aluminio, cobre, acero, cemento, etc. Una parte esencial del aerogenerador son las palas que transforman el movimiento lineal del aire en el movimiento de rotación. Los materiales corrientemente utilizados son resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, resina epoxy reforzada con fibra de vidrio, fibra de carbono, aramiditas (Kevlar), composites de madera, madera-epoxy o madera-fibra-epoxy. Todos estos materiales son preparados por métodos químicos.

Otras energías renovables

Hay otro conjunto de energías renovables que tienen un peso menor en la producción eléctrica como la geotérmica, las mareas, las olas, etc., pues son procedimientos que precisan unas condiciones mínimas que no se dan en cualquier emplazamiento. Así, en el caso de la geotérmica es rentable en determinadas zonas en las que el vapor de agua aparece cerca de la superficie, como es el caso de Islandia e Italia. En otras localizaciones, los trabajos a realizar, principalmente de acceso mediante obra civil, puede hacer inviable, por el coste, su explotación.

Las mareas, por su parte, precisan para ser rentables de diferencias de altura superiores a los 6-7 metros, que no se dan en cualquier ensenada. La energía de las olas precisa mecanismos muy complejos para transformar su movimiento en energía por lo que, hasta el momento, no hay instalaciones que hayan demostrado su viabilidad.

Fusión termonuclear

Es un procedimiento de producción de energía en el que se han dedicado muchos medios a su investigación pero en el que no se han conseguido llevar las variables del plasma (densidad, tiempo de confinamiento y temperatura) hasta los valores en los que se produzca más energía, por fusión, que la suministrada para su formación; el plasma es un gas ionizado que se forma a temperaturas del orden de 10^8 K. Hay grandes máquinas toroidales (tipo *Tokamak*) que han llegado a valores próximos y se reivindica que el JET (*Joint European Thorus*) lo consiguió durante un tiempo muy corto. El reactor JET fue

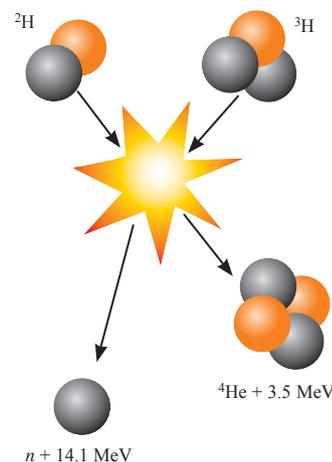


Figura 12. Reacción de fusión termonuclear deuterio-tritio (fuente: WIKIPEDIA).

un proyecto de la Unión Europea en el que participaron un gran número de países, entre ellos España.

Hoy día se espera alcanzar esa situación con el proyecto ITER, en el que participan la Unión Europea, Rusia, Estados Unidos, China, Corea e India. El reactor se está construyendo en el sur de Francia, en Cadarache y tendría que estar finalizado en el año 2019, aunque los efectos de la crisis actual podrían retrasarlo.

El funcionamiento previsto es por confinamiento magnético, es decir, un campo magnético sustentaría el plasma, formado por una mezcla de deuterio y tritio para conseguir la reacción que se resume en la Figura 12.

Conclusiones

Como resumen de todo lo expuesto anteriormente podríamos concluir con algunos comentarios sobre las relaciones entre la química y la energía:

1. La energía es el motor indiscutible de nuestra civilización.
2. No hay energía sin química.
3. El futuro de la producción de energía está en las energías renovables aunque, por el momento, pueda parecer una solución utópica.
4. Hasta alcanzar esa "utopía" necesitamos energías puentes (nucleares de fisión y de fusión).
5. La QUÍMICA ha de resolver grandes retos energéticos; la fabricación de células solares de polímeros orgánicos es uno de los fundamentales.

Bibliografía

1. M. Lucini, *Turbomáquinas de vapor y de gas, su cálculo y construcción*, Editorial Labor, Barcelona
2. J. W. Kane, M. M. Sternheim, *Física*, Editorial Reverte, Barcelona.
3. MIT TECH TALK, *Boosting the Power of Solar Cells*, vol. 53, nº 10, 3 de diciembre, **2008**.
4. J. Kalowekamo, E. Baker, *Solar Energy* **2009**, 83, 1115–1424.
5. <http://bit.ly/10jvAeQ>, visitada el 07/03/2013.
6. Foro de la Industria Nuclear Española, *Energía 2012*. Junio **2012**.