

1. INTRODUCCIÓN **Energía nuclear**, energía liberada durante la fisión o fusión de núcleos atómicos. Las cantidades de energía que pueden obtenerse mediante procesos nucleares superan con mucho a las que pueden lograrse mediante procesos químicos, que sólo implican las regiones externas del átomo.

La energía de cualquier sistema, ya sea físico, químico o nuclear, se manifiesta por su capacidad de realizar trabajo o liberar calor o radiación. La energía total de un sistema siempre se conserva, pero puede transferirse a otro sistema o convertirse de una forma a otra.

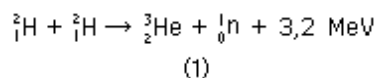
Hasta el siglo XIX, el principal combustible era la leña, cuya energía procede de la energía solar acumulada por las plantas. Desde la Revolución Industrial, los seres humanos dependen de los combustibles fósiles carbón o petróleo, que también constituyen energía solar almacenada. Cuando se quema un combustible fósil como el carbón, los átomos de hidrógeno y carbono que lo constituyen se combinan con los átomos de oxígeno del aire; se produce agua y dióxido de carbono y se libera calor, unos 1,6 kilovatios hora por kilogramo de carbón, o unos 10 electrovoltios (eV) por átomo de carbono. Esta cantidad de energía es típica de las reacciones químicas que corresponden a cambios en la estructura electrónica de los átomos. Parte de la energía liberada como calor mantiene el combustible adyacente a una temperatura suficientemente alta para que la reacción continúe.

2. EL ÁTOMO

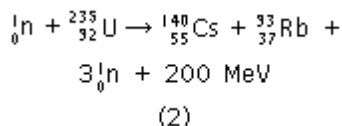
El átomo está formado por un pequeño núcleo, cargado positivamente, rodeado de electrones. El núcleo, que contiene la mayor parte de la masa del átomo, está compuesto a su vez de neutrones y protones, unidos por fuerzas nucleares muy intensas, mucho mayores que las fuerzas eléctricas que ligan los electrones al núcleo. El número másico A de un núcleo expresa el número de nucleones (neutrones y protones) que contiene; el número atómico Z es el número de protones, partículas con carga positiva. Los núcleos se designan como A_ZX ; por ejemplo, la expresión ${}^{235}_{92}\text{U}$ representa el uranio 235. Véase Isótopo.

La energía de enlace de un núcleo mide la intensidad con que las fuerzas nucleares mantienen ligados a los protones y neutrones. La energía de enlace por nucleón, es decir, la energía necesaria para separar del núcleo un neutrón o un protón, depende del número másico. La curva de las energías de enlace (ver tabla *Energía de enlace nuclear*) implica que si dos núcleos ligeros, que ocupan posiciones muy bajas en la tabla, se fusionan para formar un núcleo de mayor peso (o si un núcleo pesado, que ocupa posiciones muy altas en la tabla, se divide en dos de menor peso), los núcleos resultantes están ligados con más fuerza, por lo que se libera energía.

La fusión de dos núcleos ligeros libera millones de electrovoltios (MeV), como ocurre cuando dos núcleos de hidrógeno pesado o deuterones (${}^2_1\text{H}$) se combinan según la reacción



para producir un núcleo de helio 3, un neutrón libre (${}^1_0\text{n}$) y 3,2 MeV, o $5,1 \times 10^{-13}$ julios (J). También se libera energía nuclear cuando se induce la fisión de un núcleo pesado como el ${}^{235}_{92}\text{U}$ mediante la absorción de un neutrón, como en la reacción



que produce cesio 140, rubidio 93, tres neutrones y 200 MeV, o $3,2 \times 10^{-11}$ J. Una reacción de fisión nuclear libera una energía 10 millones de veces mayor que una reacción química típica. Véase Física nuclear.

3. ENERGÍA NUCLEAR DE FISIÓN

Las dos características fundamentales de la fisión nuclear en cuanto a la producción práctica de energía nuclear resultan evidentes en la ecuación (2) expuesta anteriormente. En primer lugar, la energía liberada por la fisión es muy grande. La fisión de 1 kg de uranio 235 libera 18,7 millones de kilovatios hora en forma de calor. En segundo lugar, el proceso de fisión iniciado por la absorción de un neutrón en el uranio 235 libera un promedio de 2,5 neutrones en los núcleos fisionados. Estos neutrones provocan rápidamente la fisión de varios núcleos más, con lo que liberan otros cuatro o más neutrones adicionales e inician una serie de fisiones nucleares automantenidas, una reacción en cadena que lleva a la liberación continuada de energía nuclear.

El uranio presente en la naturaleza sólo contiene un 0,71% de uranio 235; el resto corresponde al isótopo no fisionable uranio 238. Una masa de uranio natural, por muy grande que sea, no puede mantener una reacción en cadena, porque sólo el uranio 235 es fácil de fisionar. Es muy improbable que un neutrón producido por fisión, con una energía inicial elevada de aproximadamente 1 MeV, inicie otra fisión, pero esta probabilidad puede aumentarse cientos de veces si se frena el neutrón a través de una serie de colisiones elásticas con núcleos ligeros como hidrógeno, deuterio o carbono. En ello se basa el diseño de los reactores de fisión empleados para producir energía.

En diciembre de 1942, en la Universidad de Chicago (EEUU), el físico italiano Enrico Fermi logró producir la primera reacción nuclear en cadena. Para ello empleó un conjunto de bloques de uranio natural distribuidos dentro de una gran masa de grafito puro (una forma de carbono). En la 'pila' o reactor nuclear de Fermi, el 'moderador' de grafito frenaba los neutrones y hacía posible la reacción en cadena.

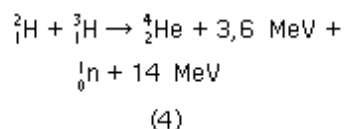
4. COMBUSTIBLES Y RESIDUOS NUCLEARES Los combustibles peligrosos empleados en los reactores nucleares presentan problemas para su manejo, sobre todo en el caso de los combustibles agotados, que deben ser almacenados o eliminados de alguna forma.

5. FUSIÓN NUCLEAR

La liberación de energía nuclear puede producirse en el extremo bajo de la curva de energías de enlace (ver tabla adjunta) a través de la fusión de dos núcleos ligeros en uno más pesado. La energía irradiada por el Sol se debe a reacciones de fusión de esta clase que se producen en su interior a gran profundidad. A las enormes presiones y temperaturas que existen allí, los núcleos de hidrógeno se combinan a través de una serie de reacciones que equivalen a la ecuación (1) y producen casi toda la energía liberada por el Sol. En estrellas más masivas que el Sol, otras reacciones llevan al mismo resultado.

La fusión nuclear artificial se consiguió por primera vez a principios de la década de 1930, bombardeando un blanco que contenía deuterio (el isótopo de hidrógeno de masa 2) con deuterones (núcleos de deuterio) de alta energía mediante un ciclotrón (véase Aceleradores de partículas). Para acelerar el haz de deuterones se necesitaba una gran cantidad de energía, de la que la mayoría aparecía como calor en el blanco. Eso hacía que no se produjera una energía útil neta. En la década de 1950 se produjo la primera liberación a gran escala de energía de fusión, aunque incontrolada, en las pruebas de armas termonucleares realizadas por Estados Unidos, la URSS, Gran Bretaña y Francia. Una liberación tan breve e incontrolada no puede emplearse para la producción de energía eléctrica. Véase Armas nucleares.

En las reacciones de fisión estudiadas anteriormente, el neutrón, que no tiene carga eléctrica, puede acercarse fácilmente a un núcleo fisionable (por ejemplo, uranio 235) y reaccionar con él. En una reacción de fusión típica, en cambio, cada uno de los dos núcleos que reaccionan tiene una carga eléctrica positiva, y antes de que puedan unirse hay que superar la repulsión natural que ejercen entre sí, llamada repulsión de Coulomb. Esto ocurre cuando la temperatura del gas es suficientemente alta, entre 50 y 100 millones de grados centígrados. En un gas formado por los isótopos pesados del hidrógeno, deuterio y tritio, a esa temperatura se produce la reacción de fusión



que libera unos 17,6 MeV por cada fusión. La energía aparece en un primer momento como energía cinética del núcleo de helio 4 y el neutrón, pero pronto se convierte en calor en el gas y los materiales próximos.

Si la densidad del gas es suficiente a esas temperaturas basta una densidad de sólo 10^{-5} atmósferas, casi un vacío el núcleo de helio 4 puede transferir su energía al gas hidrógeno circundante, con lo que mantiene la temperatura elevada y permite que se produzca una reacción de fusión en cadena. En esas condiciones se dice que se ha producido la 'ignición nuclear'.

Los problemas básicos para alcanzar las condiciones para la fusión nuclear útil son: 1) calentar el gas a temperaturas tan altas; 2) confinar una cantidad suficiente de núcleos durante un tiempo lo bastante largo para permitir la liberación de una energía mayor que la necesaria para calentar y confinar el gas. Un problema importante que surge después es la captura de esta energía y su conversión en electricidad.

A temperaturas superiores a los 100.000 °C, todos los átomos de hidrógeno están ionizados. El gas está formado por un conjunto eléctricamente neutro de núcleos con carga positiva y electrones libres con carga negativa. Este estado de la materia se denomina plasma.

Los materiales ordinarios no pueden contener un plasma lo suficientemente caliente para que se produzca la fusión. El plasma se enfriaría muy rápidamente, y las paredes del recipiente se destruirían por las altas temperaturas. Sin embargo, como el plasma está formado por núcleos y electrones cargados, que se mueven en espiral alrededor de líneas de campo magnético intensas, el plasma puede contenerse en una zona de campo magnético de la forma apropiada.

Para que un dispositivo de fusión resulte útil, la energía producida debe ser mayor que la energía necesaria para confinar y calentar el plasma. Para que esta condición se cumpla, el producto del tiempo de confinamiento, δ , y la densidad del plasma, n , debe superar el valor 10¹⁴. La relación $\delta n > 10^{14}$ se denomina criterio de Lawson.

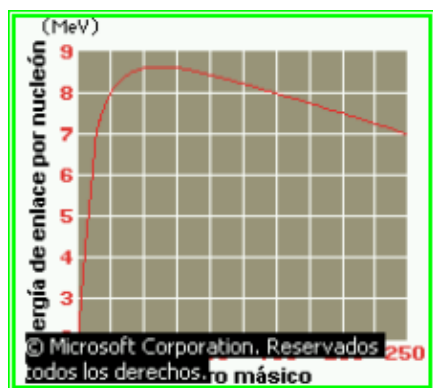
Desde 1950 se han llevado a cabo numerosos proyectos para la confinación magnética de plasma en Estados Unidos, la antigua Unión Soviética, Gran Bretaña, Japón y otros países. Se han observado reacciones termonucleares, pero el número de Lawson fue pocas veces superior a 10¹². Sin embargo, uno de los dispositivos el tokamak, sugerido originalmente en la URSS por Ígor Tamm y Andréi Sajárov comenzó a arrojar resultados prometedores a principios de la década de 1960.

La cámara de confinamiento de un tokamak tiene forma toroidal, con un diámetro interior de aproximadamente 1 m y un diámetro exterior de alrededor de 3 m. En esta cámara se establece un campo magnético toroidal de unos 5 teslas mediante grandes electroimanes. La intensidad de este campo es unas 100.000 veces mayor que la del campo magnético de la Tierra en la superficie del planeta. Las bobinas que

rodean la cámara inducen en el plasma una corriente longitudinal de varios millones de amperios. Las líneas de campo magnético resultantes son espirales dentro de la cámara, que confinan el plasma.

Después de que en varios laboratorios funcionaran con éxito tokamaks pequeños, a principios de la década de 1980 se construyeron dos dispositivos de gran tamaño, uno en la Universidad de Princeton, en Estados Unidos, y otro en la URSS. En el tokamak, el plasma alcanza una temperatura elevada por el calentamiento resistivo producido por la inmensa corriente toroidal, y en los nuevos aparatos grandes, un calentamiento adicional mediante la inyección de haces neutrales debería producir condiciones de ignición.

Otra posible vía para obtener energía de la fusión es el confinamiento inercial. En esta técnica, el combustible (tritio o deuterio) está contenido en una pequeña bolita que se bombardea desde distintas direcciones con un haz láser de pulsos. Esto provoca la implosión de la bolita y desencadena una reacción termonuclear que causa la ignición del combustible. Los avances en la investigación de la fusión son prometedores, pero probablemente hagan falta décadas para desarrollar sistemas prácticos que produzcan más energía de la que consumen. Además, las investigaciones son sumamente costosas.



Sin embargo, en los primeros años de la década de 1990 se realizaron algunos avances. En 1991, se generó por primera vez en la historia una potencia significativa (unos 1,7 MW) a partir de la fusión nuclear controlada, en el laboratorio de la Cámara Toroidal Conjunta Europea (JET, siglas en inglés), en Gran Bretaña. En diciembre de 1993, los investigadores de la Universidad de Princeton emplearon el Reactor Experimental de Fusión Tokamak para producir una reacción de fusión controlada que generó 5,6 megavatios. No obstante, tanto el JET como el Reactor Experimental de Fusión Tokamak consumieron más energía de la que produjeron durante su funcionamiento.

Si la energía de fusión llega a ser practicable, ofrecería las siguientes ventajas: 1) una fuente ilimitada de combustible, el deuterio procedente de los océanos; 2) imposibilidad de un accidente en el reactor, ya que la cantidad de combustible en el sistema es muy pequeña, y 3) residuos mucho menos radiactivos y más sencillos de manejar que los procedentes de sistemas de fisión.

PAÍS	PRODUCCIÓN EN 1995* (TWh**)
Estados Unidos	705,7
Francia	377,3
Japón	287,8
Alemania	154,1
Canadá	100,3
Rusia	98,7
Reino Unido (1994)	89,5

Ucrania	70,5
Suecia	69,9
Corea del Sur	64,0
España	55,4
Bélgica	41,4
Suiza	24,8
* Sólo se recogen las producciones superiores a 20 TWh	
** 1 teravatio hora (TWh) = 1012 Wh = 109 kWh	

3

