

ENERGÍA NUCLEAR 1

La **energía nuclear** o **energía atómica** es la energía que se libera espontánea o artificialmente en las reacciones nucleares. Sin embargo, este término engloba otro significado, el aprovechamiento de dicha energía para otros fines, tales como la obtención de energía eléctrica, energía térmica y energía mecánica a partir de reacciones atómicas, y su aplicación, bien sea con fines pacíficos o bélicos.¹ Así, es común referirse a la energía nuclear no solo como el resultado de una reacción sino como un concepto más amplio que incluye los conocimientos y técnicas que permiten la utilización de esta energía por parte del ser humano.

Estas reacciones se dan en los núcleos atómicos de algunos isótopos de ciertos elementos químicos (radioisótopos), siendo la más conocida la fisión del uranio-235 (^{235}U), con la que funcionan los reactores nucleares, y la más habitual en la naturaleza, en el interior de las estrellas, la fusión del par deuterio-tritio (^2H - ^3H). Sin embargo, para producir este tipo de energía aprovechando reacciones nucleares pueden ser utilizados muchos otros isótopos de varios elementos químicos, como el torio-232, el plutonio-239, el estroncio-90 o el polonio-210 (^{232}Th , ^{239}Pu , ^{90}Sr , ^{210}Po ; respectivamente).

Existen varias disciplinas y/o técnicas que usan de base la energía nuclear y van desde la generación de energía eléctrica en las centrales nucleares hasta las técnicas de análisis de datación arqueológica (arqueometría nuclear), la medicina nuclear usada en los hospitales, etc.

Los sistemas más investigados y trabajados para la obtención de energía aprovechable a partir de la energía nuclear de forma masiva son la fisión nuclear y la fusión nuclear. La energía nuclear puede transformarse de forma descontrolada, dando lugar al armamento nuclear; o controlada en reactores nucleares en los que se produce energía eléctrica, energía mecánica o energía térmica. Tanto los materiales usados como el diseño de las instalaciones son completamente diferentes en cada caso.

Otra técnica, empleada principalmente en pilas de mucha duración para sistemas que requieren poco consumo eléctrico, es la utilización de generadores termoelectrónicos de radioisótopos (GTR, o RTG en inglés), en los que se aprovechan los distintos modos de desintegración para generar electricidad en sistemas de termopares a partir del calor transferido por una fuente radiactiva.

La energía desprendida en esos procesos nucleares suele aparecer en forma de partículas subatómicas en movimiento. Esas partículas, al frenarse en la materia que las rodea, producen energía térmica. Esta energía térmica se transforma en energía mecánica utilizando motores de combustión externa, como las turbinas de vapor. Dicha energía mecánica puede ser empleada en el transporte, como por ejemplo en los buques nucleares.

La principal característica de este tipo de energía es la alta calidad de la energía que puede producirse por unidad de masa de material utilizado en comparación con cualquier otro tipo de energía conocida por el ser humano, pero sorprende la poca eficiencia del proceso, ya que se desaprovecha entre un 86 % y 92 % de la energía que se libera.²

En las reacciones nucleares se suele liberar una grandísima cantidad de energía debido en parte a que la masa de partículas involucradas en este proceso, se transforma directamente en energía. Lo

anterior se suele explicar basándose en la relación masa-energía propuesta por el físico Albert Einstein.

En 1896 Henri Becquerel descubrió que algunos elementos químicos emitían radiaciones.³ Tanto él como Marie Curie y otros estudiaron sus propiedades, descubriendo que estas radiaciones eran diferentes de los ya conocidos rayos X y que poseían propiedades distintas, denominando a los tres tipos que consiguieron descubrir alfa, beta y gamma.

Pronto se vio que todas ellas provenían del núcleo atómico que describió Ernest Rutherford en 1911.

Con el descubrimiento del neutrino, partícula descrita teóricamente en 1930 por Wolfgang Pauli pero no detectada hasta 1956 por Clyde Cowan y sus colaboradores, se pudo explicar la radiación beta.

En 1932 James Chadwick descubrió la existencia del neutrón que Pauli había predicho en 1930, e inmediatamente después Enrico Fermi descubrió que ciertas radiaciones emitidas en fenómenos no muy comunes de desintegración eran en realidad estos neutrones.

Durante los años 1930, Enrico Fermi y sus colaboradores bombardearon con neutrones más de 60 elementos, entre ellos ^{235}U , produciendo las primeras fisiones nucleares artificiales. En 1938, en Alemania, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann verificaron los experimentos de Fermi y en 1939 demostraron que parte de los productos que aparecían al llevar a cabo estos experimentos con uranio eran núcleos de bario. Muy pronto llegaron a la conclusión de que eran resultado de la división de los núcleos del uranio. Se había llevado a cabo el descubrimiento de la fisión.

En Francia, Joliot Curie descubrió que además del bario, se emitían neutrones secundarios en esa reacción, haciendo factible la reacción en cadena.

También en 1932 Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo.

En física nuclear, la fisión es una reacción nuclear, lo que significa que tiene lugar en el núcleo atómico. La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Desarrollo de Armamento de la Alemania Nazi desarrolló un proyecto de energía nuclear (Proyecto Uranio) con vistas a la producción de un artefacto explosivo nuclear. Albert Einstein, en 1939, firmó una carta al presidente Franklin Delano Roosevelt de los Estados Unidos, escrita por Leó Szilárd, en la que se prevenía sobre este hecho.⁴

El 2 de diciembre de 1942, como parte del proyecto Manhattan dirigido por J. Robert Oppenheimer, se construyó el primer reactor del mundo hecho por el ser humano (existió un reactor natural en Oklo): el Chicago Pile-1 (CP-1).

Como parte del mismo programa militar, se construyó un reactor mucho mayor en Hanford, destinado a la producción de plutonio, y al mismo tiempo, un proyecto de enriquecimiento de uranio en cascada. El 16 de julio de 1945 fue probada la primera bomba nuclear (nombre en clave Trinity) en el desierto de Alamogordo. En esta prueba se llevó a cabo una explosión equivalente a 19 000 000 kg de TNT (19 kilotones), una potencia jamás observada anteriormente en ningún otro explosivo. Ambos proyectos desarrollados finalizaron con la construcción de dos bombas, una de uranio enriquecido y una de plutonio (Little Boy y Fat Man) que fueron lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima (6 de agosto de 1945) y Nagasaki (9 de agosto de 1945) respectivamente. El 15 de agosto de 1945 acabó la segunda guerra mundial en el Pacífico con la rendición de Japón. Por su parte el programa de armamento nuclear alemán (liderado este por Werner Heisenberg), no alcanzó su meta antes de la rendición de Alemania el 8 de mayo de 1945.

Posteriormente se llevaron a cabo programas nucleares en la Unión Soviética (primera prueba de una bomba de fisión el 29 de agosto de 1949), Francia y Gran Bretaña, comenzando la carrera armamentística en ambos bloques creados tras la guerra, alcanzando límites de potencia destructiva nunca antes sospechada por el ser humano (cada bando podía derrotar y destruir varias veces a todos sus enemigos).

Ya en la década de 1940, el almirante Hyman Rickover propuso la construcción de reactores de fisión no encaminados esta vez a la fabricación de material para bombas, sino a la generación de electricidad. Se pensó, acertadamente, que estos reactores podrían constituir un gran sustituto del diésel en los submarinos. Se construyó el primer reactor de prueba en 1953, botando el primer submarino nuclear (el USS Nautilus (SSN-571)) el 17 de enero de 1955 a las 11:00. El Departamento de Defensa estadounidense propuso el diseño y construcción de un reactor nuclear utilizable para la generación eléctrica y propulsión en los submarinos a dos empresas distintas norteamericanas: General Electric y Westinghouse. Estas empresas desarrollaron los reactores de agua ligera tipo BWR y PWR respectivamente.

Estos reactores se han utilizado para la propulsión de buques, tanto de uso militar (submarinos, cruceros, portaaviones,...) como civil (rompehielos y cargueros), donde presentan unas características de potencia, reducción del tamaño de los motores, reducción de las necesidades de almacenamiento de combustible y autonomía no superadas por ninguna otra técnica existente.

Los mismos diseños de reactores de fisión se trasladaron a diseños comerciales para la generación de electricidad. Los únicos cambios producidos en el diseño con el transcurso del tiempo fueron un aumento de las medidas de seguridad, una mayor eficiencia termodinámica, un aumento de potencia y el uso de las nuevas tecnologías que fueron apareciendo.

Entre 1950 y 1960 Canadá desarrolló un nuevo tipo, basado en el PWR, que utilizaba agua pesada como moderador y uranio natural como combustible, en lugar del uranio enriquecido utilizado por los diseños de agua ligera. Otros diseños de reactores para su uso comercial utilizaron carbono (Magnox, AGR, RBMK o PBR entre otros) o sales fundidas (litio o berilio entre otros) como moderador. Este último tipo de reactor fue parte del diseño del primer avión bombardero (1954) con propulsión nuclear (el US Aircraft Reactor Experiment o ARE). Este diseño se abandonó tras el desarrollo de los misiles balísticos intercontinentales (ICBM).

Otros países (Francia, Italia, entre otros) desarrollaron sus propios diseños de reactores nucleares comerciales para la generación de energía eléctrica.

En 1946 se construyó el primer reactor de neutrones rápidos (*Clementine*) en Los Álamos, con plutonio como combustible y mercurio como refrigerante. En 1951 se construyó el EBR-I, el primer reactor rápido con el que se consiguió generar electricidad. En 1996, el Superfénix o SPX, fue el reactor rápido de mayor potencia construido hasta el momento (1200 MWe). En este tipo de reactores se pueden utilizar como combustible los radioisótopos del plutonio, el torio y el uranio que no son fisibles con neutrones térmicos (lentos).

En la década de los 50 Ernest Lawrence propuso la posibilidad de utilizar reactores nucleares con geometrías inferiores a la criticidad (reactores subcríticos cuyo combustible podría ser el torio), en los que la reacción sería soportada por un aporte externo de neutrones. En 1993 Carlo Rubbia propone utilizar una instalación de espalación en la que un acelerador de protones produjera los neutrones necesarios para mantener la instalación. A este tipo de sistemas se les conoce como *Sistemas asistidos por aceleradores* (en inglés *Accelerator driven systems*, ADS sus siglas en inglés), y se prevé que la primera planta de este tipo (MYRRHA) comience su funcionamiento entre el 2016 y el 2018 en el centro de Mol (Bélgica).⁵

En física nuclear, la fusión nuclear es el proceso por el cual varios núcleos atómicos de carga similar se unen y forman un núcleo más pesado. Simultáneamente se libera o absorbe una cantidad enorme de energía, que permite a la materia entrar en un estado plasmático. La fusión de dos núcleos de menor masa que el hierro (en este elemento y en el níquel ocurre la mayor energía de enlace nuclear por nucleón) libera energía en general. Por el contrario, la fusión de núcleos más pesados que el hierro absorbe energía. En el proceso inverso, la fisión nuclear, estos fenómenos suceden en sentidos opuestos. Hasta el principio del siglo XX no se entendía la forma en que se generaba energía en el interior de las estrellas necesaria para contrarrestar el colapso gravitatorio de estas. No existía reacción química con la potencia suficiente y la fisión tampoco era capaz. En 1938 Hans Bethe logró explicarlo mediante reacciones de fusión, con el ciclo CNO, para estrellas muy pesadas. Posteriormente se descubrió el ciclo protón-protón para estrellas de menor masa, como el Sol.

En los años 1940, como parte del proyecto Manhattan, se estudió la posibilidad del uso de la fusión en la bomba nuclear. En 1942 se investigó la posibilidad del uso de una reacción de fisión como método de ignición para la principal reacción de fusión, sabiendo que podría resultar en una potencia miles de veces superior. Sin embargo, tras finalizar la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de una bomba de estas características no fue considerado primordial hasta la explosión de la primera bomba atómica rusa en 1949, RDS-1 o *Joe-1*. Este evento provocó que en 1950 el presidente estadounidense Harry S. Truman anunciara el comienzo de un proyecto que desarrollara la bomba de hidrógeno. El 1 de noviembre de 1952 se probó la primera bomba nuclear (nombre en clave *Mike*, parte de la *Operación Ivy* o Hiedra), con una potencia equivalente a 10 400 000 000 de kg de TNT (10,4 megatonnes). El 12 de agosto de 1953 la Unión Soviética realiza su primera prueba con un artefacto termonuclear (su potencia alcanzó algunos centenares de kilotonnes).

Las condiciones necesarias para alcanzar la ignición de un reactor de fusión controlado, sin embargo, no fueron derivadas hasta 1955 por John D. Lawson.⁶ Los criterios de Lawson definieron las condiciones mínimas necesarias de tiempo, densidad y temperatura que debía alcanzar el combustible nuclear (núcleos de hidrógeno) para que la reacción de fusión se mantuviera. Sin embargo, ya en 1946 se patentó el primer diseño de reactor termonuclear.⁷ En 1951 comenzó el programa de fusión de Estados Unidos, sobre la base del stellarator. En el mismo año comenzó en la Unión Soviética el desarrollo del primer Tokamak, dando lugar a sus primeros experimentos en 1956. Este último diseño logró en 1968 la primera reacción termonuclear cuasi-estacionaria jamás conseguida, demostrándose que era el diseño más eficiente conseguido hasta la época. ITER, el diseño internacional que tiene fecha de comienzo de sus operaciones en el año 2016 y que intentará resolver los problemas existentes para conseguir un reactor de fusión de confinamiento magnético, utiliza este diseño.

En 1962 se propuso otra técnica para alcanzar la fusión basada en el uso de láseres para conseguir una implosión en pequeñas cápsulas llenas de combustible nuclear (de nuevo núcleos de hidrógeno). Sin embargo hasta la década de los 70 no se desarrollaron láseres suficientemente potentes. Sus inconvenientes prácticos hicieron de esta una opción secundaria para alcanzar el objetivo de un reactor de fusión. Sin embargo, debido a los tratados internacionales que prohibían la realización de ensayos nucleares en la atmósfera, esta opción (básicamente microexplosiones termonucleares) se convirtió en un excelente laboratorio de ensayos para los militares, con lo que consiguió financiación para su continuación. Así, se han construido el National Ignition Facility (NIF, con inicio de sus pruebas programadas para 2010) estadounidense y el Laser Mégajoule francés (LMJ), que persiguen el mismo objetivo de conseguir un dispositivo que consiga mantener la reacción de fusión a partir de este diseño. Ninguno de los proyectos de investigación actualmente en marcha predicen una ganancia de energía significativa, por lo que está previsto un proyecto posterior que pudiera dar lugar a los primeros reactores de fusión comerciales (DEMO con confinamiento magnético e HiPER con confinamiento inercial).

Con la invención de la pila química por Volta en 1800 se dio lugar a una forma compacta y portátil de generación de energía. A partir de entonces fue incesante la búsqueda de sistemas que fueran aún menores y que tuvieran una mayor capacidad y duración. Este tipo de pilas, con pocas variaciones, han sido suficientes para muchas aplicaciones diarias hasta nuestros tiempos. Sin embargo, en el siglo XX surgieron nuevas necesidades, a causa principalmente de los programas espaciales. Se precisaban entonces sistemas que tuvieran una duración elevada para consumos eléctricos moderados y un mantenimiento nulo. Surgieron varias soluciones (como los paneles solares o las células de combustible), pero según se incrementaban las necesidades energéticas y aparecían nuevos problemas (las placas solares son inútiles en ausencia de luz solar), se comenzó a estudiar la posibilidad de utilizar la energía nuclear en estos programas.

A mediados de la década de los 50 comenzaron en Estados Unidos las primeras investigaciones encaminadas a estudiar las aplicaciones nucleares en el espacio. De estas surgieron los primeros prototipos de los *generadores termoelectrónicos de radioisótopos* (RTG). Estos dispositivos mostraron ser una alternativa sumamente interesante tanto en las aplicaciones espaciales como en aplicaciones terrestres específicas.