

ENERGÍA NUCLEAR 2

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 termoeléctricos de radioisótopos* (RTG). Estos dispositivos mostraron ser una alternativa sumamente interesante tanto en las aplicaciones espaciales como en aplicaciones terrestres específicas. En estos artefactos se aprovechan las desintegraciones alfa y beta, convirtiendo toda o gran parte de la energía cinética de las partículas emitidas por el núcleo en calor. Este calor es después transformado en electricidad aprovechando el efecto Seebeck mediante unos termopares, consiguiendo eficiencias aceptables (entre un 5 y un 40 % es lo habitual). Los radioisótopos habitualmente utilizados son ^{210}Po , ^{244}Cm , ^{238}Pu , ^{241}Am , entre otros 30 que se consideraron útiles. Estos dispositivos consiguen capacidades de almacenamiento de energía 4 órdenes de magnitud superiores (10 000 veces mayor) a las baterías convencionales.

En 1959 se mostró al público el primer *generador atómico*.⁸ En 1961 se lanzó al espacio el primer RTG, a bordo del SNAP 3. Esta batería nuclear, que alimentaba a un satélite de la armada norteamericana con una potencia de 2,7 W, mantuvo su funcionamiento ininterrumpido durante 15 años.

Estos sistemas se han utilizado y se siguen usando en programas espaciales muy conocidos (Pioneer, Voyager, Galileo, Apolo y Ulises entre otros). Así por ejemplo en 1972 y 1973 se lanzaron los Pioneer 10 y 11, convirtiéndose el primero de ellos en el primer objeto humano de la historia que abandonaba el sistema solar. Ambos satélites continuaron funcionando hasta 17 años después de sus lanzamientos.

La misión Ulises (misión conjunta ESA-NASA) se envió en 1990 para estudiar el Sol, siendo la primera vez que un satélite cruzaba ambos polos solares. Para poder hacerlo hubo que enviar el satélite en una órbita alrededor de Júpiter. Debido a la duración del RTG que mantiene su funcionamiento se prolongó la misión de modo que se pudiera volver a realizar otro viaje alrededor del Sol. Aunque pareciera extraño que este satélite no usara paneles solares en lugar de un RTG, puede entenderse al comparar sus pesos (un panel de 544 kg generaba la misma potencia que un RTG de 56). En aquellos años no existía un cohete que pudiera enviar a su órbita al satélite con ese peso extra.

Estas baterías no solo proporcionan electricidad, sino que en algunos casos, el propio calor generado se utiliza para evitar la congelación de los satélites en viajes en los que el calor del Sol no es suficiente, por ejemplo en viajes fuera del sistema solar o en misiones a los polos de la Luna.

En 1966 se instaló el primer RTG terrestre para el faro de la isla deshabitada Fairway Rock, permaneciendo en funcionamiento hasta 1995, momento en el que se desmanteló. Otros muchos faros situados en zonas inaccesibles cercanas a los polos (sobre todo en la Unión Soviética), utilizaron estos sistemas. Se sabe que la Unión Soviética fabricó más de 1000 unidades para estos usos.

Una aplicación que se dio a estos sistemas fue su uso como marcapasos.⁹ Hasta los 70 se usaba para estas aplicaciones baterías de mercurio-zinc, que tenían una duración de unos 3 años. En esta década se introdujeron las baterías nucleares para aumentar la longevidad de estos artefactos, posibilitando que un paciente joven tuviera implantado solo uno de estos artefactos para toda su vida. En los años 1960, la empresa Medtronic contactó con Alcatel para diseñar una batería nuclear, implantando el primer marcapasos alimentado con un RTG en un paciente en 1970 en París. Varios fabricantes construyeron sus propios diseños, pero a mediados de esta década fueron desplazados por las nuevas baterías de litio, que poseían vidas de unos 10 años (considerado suficiente por los médicos aunque debiera sustituirse varias veces hasta la muerte del paciente). A mediados de los años 1980 se detuvo el uso de estos implantes, aunque aún existen personas que siguen portando este tipo de dispositivos.

Sir James Chadwick descubrió el neutrón en 1932, año que puede considerarse como el inicio de la física nuclear moderna.¹⁰

El modelo de átomo propuesto por Niels Bohr consiste en un núcleo central compuesto por partículas que concentran la mayoría de la masa del átomo (neutrones y protones), rodeado por varias capas de partículas cargadas casi sin masa (electrones). Mientras que el tamaño del átomo resulta ser del orden del angstrom (10^{-10} m), el núcleo puede medirse en fermis (10^{-15} m), o sea, el núcleo es 100.000 veces menor que el átomo.

Todos los átomos neutros (sin carga eléctrica) poseen el mismo número de electrones que de protones. Un elemento químico se puede identificar de forma inequívoca por el número de protones que posee su núcleo; este número se llama número atómico (Z). El número de neutrones (N) sin embargo puede variar para un mismo elemento. Para valores bajos de Z ese número tiende a ser muy parecido al de protones, pero al aumentar Z se necesitan más neutrones para mantener la estabilidad del núcleo. A los átomos a los que solo les distingue el número de neutrones en su núcleo (en definitiva, su masa), se les llama isótopos de un mismo elemento. La masa atómica de un isótopo viene dada por A , el número de protones más el de neutrones (nucleones) que posee en su núcleo.

Para denominar un isótopo suele utilizarse la letra que indica el elemento químico, con un superíndice que es la masa atómica y un subíndice que es el número atómico (p. ej. el isótopo 238 del uranio se escribiría como ${}^{238}_{92}\text{U}$).

Los neutrones y protones que forman los núcleos tienen una masa aproximada de 1 u, estando el protón cargado eléctricamente con carga positiva +1, mientras que el neutrón no posee carga eléctrica. Teniendo en cuenta únicamente la existencia de las fuerzas electromagnética y gravitatoria, el núcleo sería inestable (ya que las partículas de igual carga se repelerían deshaciendo el núcleo), haciendo imposible la existencia de la materia. Por este motivo (ya que es obvio que la materia existe) fue necesario añadir a los modelos una tercera fuerza: la fuerza fuerte (hoy en día *fuerza nuclear fuerte residual*). Esta fuerza debía tener como características, entre otras, que era muy intensa, atractiva a distancias muy cortas (solo en el interior de los núcleos), siendo repulsiva a distancias más cortas (del tamaño de un nucleón), que era central en cierto rango de distancias, que dependía del espín y que no dependía del tipo de nucleón (neutrones o protones) sobre el que actuaba. En 1935, Hideki Yukawa dio una primera solución a esta nueva fuerza estableciendo la hipótesis de la existencia de una nueva partícula: el mesón. El más ligero de los mesones, el pion, es el responsable de la mayor parte del potencial entre nucleones de largo alcance (1 rfm). El potencial de Yukawa (potencial OPEP) describe adecuadamente la interacción para dos partículas de espines $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{2}$ respectivamente.

Otros experimentos que se realizaron sobre los núcleos indicaron que su forma debía de ser aproximadamente esférica de radio $r_0 A^{1/3}$ fm, siendo A la masa atómica, es decir, la suma de neutrones y protones. Esto exige además que la densidad de los núcleos sea la misma (ρ , es decir el volumen es proporcional a A). Como la densidad se halla dividiendo la masa por el volumen ($\rho = \frac{A}{V}$). Esta característica llevó a la equiparación de los núcleos con un líquido, y por tanto al modelo de la gota líquida, fundamental en la comprensión de la fisión de los núcleos.

Fermi, tras el descubrimiento del neutrón, realizó una serie de experimentos en los que bombardeaba distintos núcleos con estas nuevas partículas. En estos experimentos observó que cuando utilizaba neutrones de energías bajas, en ocasiones el neutrón era absorbido emitiéndose fotones.

Para averiguar el comportamiento de esta reacción repitió el experimento sistemáticamente en todos los elementos de la tabla periódica. Así descubrió nuevos elementos radiactivos, pero al llegar al uranio obtuvo resultados distintos. Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann consiguieron explicar el nuevo fenómeno al suponer que el núcleo de uranio al capturar el neutrón se escindía en dos partes de masas aproximadamente iguales. De hecho detectaron bario, de masa aproximadamente la mitad que la del uranio. Posteriormente se averiguó que esa escisión (o fisión) no se daba en todos los isótopos del uranio, sino solo en el ^{235}U . Y más tarde aún, se supo que esa escisión podía dar lugar a muchísimos elementos distintos, cuya distribución de aparición es muy típica (similar a la doble joroba de un camello).

En la fisión de un núcleo de uranio, no solo aparecen dos núcleos más ligeros resultado de la división del de uranio, sino que además se emiten 2 o 3 (en promedio 2,5 en el caso del ^{235}U) neutrones a una alta velocidad (energía). Como el uranio es un núcleo pesado no se cumple la relación $N=Z$ (igual número de protones que de neutrones) que sí se cumple para los elementos más ligeros, por lo que los productos de la fisión poseen un exceso de neutrones. Este exceso de neutrones hace inestables (radiactivos) a esos productos de fisión, que alcanzan la estabilidad al

desintegrarse los neutrones excedentes por desintegración beta generalmente. La fisión del ^{235}U puede producirse en más de 40 formas diferentes, originándose por tanto más de 80 productos de fisión distintos, que a su vez se desintegran formando cadenas de desintegración, por lo que finalmente aparecen cerca de 200 elementos a partir de la fisión del uranio.

La energía desprendida en la fisión de cada núcleo de ^{235}U es en promedio de 200 MeV. Los minerales explotados para la extracción del uranio suelen poseer contenidos de alrededor de 1 gramo de uranio por kg de mineral (la pechblenda por ejemplo). Como el contenido de ^{235}U en el uranio natural es de un 0,7 %, se obtiene que por cada kg de mineral extraído tendríamos . átomos de ^{235}U . Si fisiónamos todos esos átomos (1 gramo de uranio) obtendríamos teóricamente una energía liberada de . por gramo. En comparación, por la combustión de 1 kg de carbón de la mejor calidad (antracita) se obtiene una energía de unos , es decir, se necesitan más de 10 toneladas de antracita (el tipo de carbón con mayor poder calorífico) para obtener la misma energía contenida en 1 kg de uranio natural.

La aparición de los 2,5 neutrones por cada fisión posibilita la idea de llevar a cabo una reacción en cadena, si se logra hacer que de esos 2,5 al menos un neutrón consiga fisiónar un nuevo núcleo de uranio. La idea de la reacción en cadena es común en otros procesos químicos. Los neutrones emitidos por la fisión no son útiles inmediatamente si lo que se quiere es controlar la reacción, sino que hay que frenarlos (moderarlos) hasta una velocidad adecuada. Esto se consigue rodeando los átomos por otro elemento con un Z pequeño, como por ejemplo hidrógeno, carbono o litio, material denominado moderador.

Otros átomos que pueden fisiónar con neutrones lentos son el ^{233}U o el ^{239}Pu . Sin embargo también es posible la fisión con neutrones rápidos (de energías altas), como por ejemplo el ^{238}U (140 veces más abundante que el ^{235}U) o el ^{232}Th (400 veces más abundante que el ^{235}U).

La teoría elemental de la fisión la proporcionaron Bohr y Wheeler, utilizando un modelo según el cual los núcleos de los átomos se comportan como gotas líquidas.

La fisión se puede conseguir también mediante partículas alfa, protones o deuterones.

Así como la fisión es un fenómeno que aparece en la corteza terrestre de forma natural (si bien con una frecuencia pequeña), la fusión es absolutamente artificial en nuestro entorno (aunque es común el núcleo de las estrellas). Sin embargo, esta energía posee ventajas con respecto a la fisión. Por un lado el combustible es abundante y fácil de conseguir, y por otro, sus productos son elementos estables, ligeros y no radiactivos.

En la fusión, al contrario que en la fisión donde se dividen los núcleos, la reacción consiste en la unión de dos o más núcleos ligeros. Esta unión da lugar a un núcleo más pesado que los usados inicialmente y a neutrones. La fusión se consiguió antes incluso de comprender completamente las condiciones que se necesitaban en el desarrollo de armas, limitándose a conseguir condiciones extremas de presión y temperatura usando una bomba de fisión como elemento iniciador (Proceso Teller-Ulam). Pero no es hasta que Lawson define unos criterios de tiempo, densidad y temperatura mínimos cuando se comienza a comprender el funcionamiento de la fusión.

Aunque en las estrellas la fusión se da entre una variedad de elementos químicos, el elemento con el que es más sencillo alcanzarla es el hidrógeno. El hidrógeno posee tres isótopos: el hidrógeno común (^1H), el deuterio (^2H) y el tritio (^3H). Esto es así porque la fusión requiere que se venza la repulsión electrostática que experimentan los núcleos al unirse, por lo que a menor carga eléctrica, menor será esta. Además, a mayor cantidad de neutrones, más pesado será el núcleo resultante (más arriba estaremos en la gráfica de las energías de ligadura), con lo que mayor será la energía liberada en la reacción.

Una reacción particularmente interesante es la fusión de deuterio y tritio.

En esta reacción se liberan 17,6 MeV por fusión, más que en el resto de combinaciones con isótopos de hidrógeno. Además esta reacción proporciona un neutrón muy energético que puede aprovecharse para generar combustible adicional para reacciones posteriores de fusión, utilizando litio, por ejemplo. La energía liberada por gramo con esta reacción es casi 1.000 veces mayor que la lograda en la fisión de 1 gramo de uranio natural (unas 7 veces superior si fuera un gramo de ^{235}U puro).

Para vencer la repulsión electrostática, es necesario que los núcleos a fusionar alcancen una energía cinética de aproximadamente 10 keV. Esta energía se obtiene mediante un intenso calentamiento (igual que en las estrellas, donde se alcanzan temperaturas de 10^8 K), que implica un movimiento de los átomos igual de intenso. Además de esa velocidad para vencer la repulsión electrostática, la probabilidad de que se produzca la fusión debe ser elevada para que la reacción suceda. Esto implica que se deben poseer suficientes átomos con energía suficiente durante un tiempo mínimo. El criterio de Lawson define que el producto entre la densidad de núcleos con esa energía por el tiempo durante el que deben permanecer en ese estado debe ser ..

Los dos métodos en desarrollo para aprovechar de forma útil (no bélica) la energía desprendida en esta reacción son el confinamiento magnético y el confinamiento inercial (con fotones que provienen de láser o partículas que provienen de aceleradores).

Desintegración alfa

Esta reacción es una forma de fisión espontánea, en la que un núcleo pesado emite una partícula alfa (α) con una energía típica de unos 5 MeV. Una partícula α es un núcleo de helio, constituido por dos protones y dos neutrones. En su emisión el núcleo cambia, por lo que el elemento químico que sufre este tipo de desintegración muta en otro distinto.

Desintegración beta

Existen dos modos de desintegración beta. En el tipo β^- la fuerza débil convierte un neutrón (n^0) en un protón (p^+) y al mismo tiempo emite un electrón (e^-) y un antineutrino..

En el tipo β^+ un protón se transforma en un neutrón emitiendo un positrón (e^+) y un neutrino.