

CURSO PARA PROFESIONALES DE LA ENSEÑANZA

ENERGÍA NUCLEAR DE FISIÓN

Lorenzo Francia González.

Ingeniero Industrial. Dirección de Energía Nuclear de UNESA.

Eduardo Gallego Díaz.

Dr. Ingeniero Industrial. Profesor Titular de la Universidad
Politécnica de Madrid.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Dpto. de
Ingeniería Nuclear.

0. INTRODUCCIÓN

La energía nuclear es la energía proveniente de reacciones nucleares o de la desintegración de los núcleos de algunos átomos. Procede de la liberación de la energía almacenada en el núcleo de los mismos.

Una central nuclear es una central termoeléctrica, es decir, una instalación que aprovecha una fuente de calor para convertir en vapor a alta temperatura un líquido que circula por un conjunto de conductos; y que utiliza dicho vapor para accionar un grupo turbina-alternador, produciendo así energía eléctrica.

La diferencia esencial entre las centrales termoeléctricas convencionales y las centrales termoeléctricas nucleares reside en la reacción que libera la energía necesaria para conseguir la fuente de calor para la producción del vapor. En el caso primero, se trata de la reacción de combustión del carbono (carbón, gas o fuelóleo), en el segundo de la reacción nuclear de fisión de núcleos de uranio. En este último caso, la energía liberada por reacción es del orden de millones de veces superior a la del caso primero, lo que explica el menor consumo de combustible y producción de residuos, éstos de naturaleza distinta, en una central nuclear en comparación con una central convencional, a igualdad de potencias de producción.

1. EL URANIO COMO COMBUSTIBLE NUCLEAR

Una de las razones para explotar la energía nuclear en forma comercial se relaciona con la gran abundancia del combustible nuclear en la Naturaleza. Los combustibles que cumplen este requisito son el uranio y el torio. El plutonio también se puede usar como combustible, aunque no existe en la Naturaleza.

El plutonio de número atómico 94 no se encuentra en la Naturaleza, ya que sus isótopos^(*) (Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242) tienen vidas medias inferiores a la de la Tierra, razón por la cual ha desaparecido el posible plutonio existente en épocas remotas.

El torio es más abundante que el uranio, pero al ser el Th-232 el único isótopo disponible en forma natural, su empleo en reactores nucleares es muy limitado, ya que no es directamente fisiónable.

El uranio, de número atómico 92, es el combustible nuclear por excelencia. Se encuentra en la Naturaleza en una proporción del 0,004 por 1000 de la corteza terrestre y se presenta como mezcla de tres isótopos: U-238 y U-235 principalmente, en las proporciones de 99,28% y 0,71%,

^(*) Isótopos son especies (nucleidos) de un mismo elemento que, teniendo las mismas características químicas y eléctricas, tienen un comportamiento nuclear diferente. Sus núcleos tienen el mismo número de protones (número atómico Z) pero distinto número de neutrones y, por tanto, diferente masa (número másico A).

respectivamente, y U-234 a nivel de trazas (0,005%), teniendo el U-235 la propiedad de que puede fisiónarse (Fig. 1).

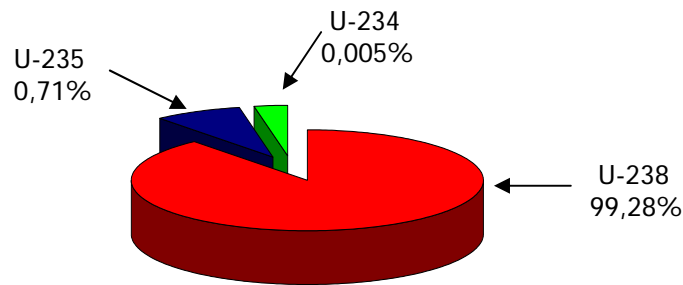


Figura 1.- Porcentaje de los diferentes isótopos de uranio en la Naturaleza.

Es interesante hacer observar que las proporciones anteriores no constituyen una frontera fija, variando con el tiempo, si bien con una velocidad lentísima. La razón se encuentra en el hecho de que tanto el U-238 como el U-235 son radiactivos. El período de semidesintegración^(**) del primero es de $4,5 \times 10^9$ años, mientras que el del segundo es de $7,1 \times 10^8$ años. Esta diferencia hace que el U-235 desaparezca por desintegración un poco más rápidamente que el U-238. Por tanto, su proporción relativa disminuye con el tiempo.



Figura 2.- Yacimiento de mineral de uranio de Oklo (Gabón).

Es fácil calcular que si nos remontamos hacia el pasado, en la escala de millones de años, la proporción de U-235 debió ser más elevada, cabiendo la

^(**) El período de semidesintegración indica el tiempo necesario para que el número de átomos radiactivos de una determinada especie se reduzca a la mitad.

especulación de que haya podido haber reactores nucleares naturales. Esta previsión se demostró cierta cuando se descubrieron en los yacimientos de mineral de uranio de Oklo (Gabón) los restos de dichos reactores nucleares de origen natural (Fig. 2). La hipótesis quedó confirmada cuando se comprobó por espectrometría de masas que los elementos químicos (distintos del uranio) contenidos en el mineral tenían una composición isotópica típica de los elementos estables generados por fisión, que difiere de la habitual de los elementos químicos naturales, los cuales tienen una composición que es el resultado de los muchos procesos de nucleosíntesis que intervinieron en la formación de la Tierra.

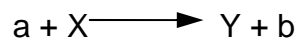
2. REACCIONES NUCLEARES

2.1. Generalidades

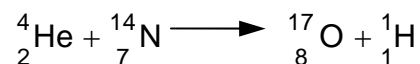
El estudio de las reacciones nucleares es una de las partes esenciales de la Ingeniería Nuclear, tanto por la gran información que proporciona sobre la estructura y dinámica del núcleo de los átomos, como por sus numerosas aplicaciones.

En las reacciones nucleares habrá unos agentes reaccionantes, uno de los cuales debe ser núcleo atómico, y unos productos, que en general serán también núcleos atómicos más partículas emergentes, aunque éstas no siempre aparezcan.

En general, se puede decir que, en una reacción nuclear, se produce un encuentro entre una partícula nuclear llamada normalmente "proyectil" y un núcleo llamado "blanco", obteniéndose otro "núcleo" y la emisión de una partícula nuclear y/o un fotón. Una reacción nuclear se expresa por,



en donde **X** e **Y** son los núcleos inicial y final, **a** es la partícula o núcleo ligero incidente (proyectil) y **b** es la partícula, núcleo ligero o fotón emitido. A título de ejemplo, una reacción nuclear sería:



Se define como factor **Q** de una reacción nuclear el defecto de masa de la misma, es decir, la diferencia entre la masa total de los reactivos (**a** y **X**) y la masa total de los productos (**b** e **Y**) multiplicada por c^2 (velocidad de la luz al cuadrado), según la expresión:

$$Q = (M_a + M_X - M_Y - M_b) \times c^2$$

La **Q** de cualquier reacción puede obtenerse a partir de tablas de masas nucleares, disponibles en la bibliografía. Si el balance de masas es positivo, la

reacción produce energía (exoenergética), es decir, la pérdida de masa se ha transformado en energía, y si el balance de masas es negativo, la reacción absorbe energía (endoenergética), es decir, los productos iniciales han perdido energía, transformándose en una ganancia de masa.

Cuando una partícula choca contra un núcleo, no todos los choques producen una reacción. Para que el choque sea eficiente, la partícula tiene que incidir sobre una porción eficiente del núcleo, que se llama **sección eficaz** [σ], cuya determinación es un proceso complejo en el cual intervienen modelos teóricos que explican el comportamiento del núcleo, o bien se determinan experimentalmente. De una forma intuitiva se puede decir que es el área de un disco imaginario asociado a cada núcleo de tal forma que sólo cuando el proyectil pasa por ella tiene lugar la reacción. Indirectamente, mide la probabilidad de que la reacción se realice. La sección eficaz se mide en cm^2 o en *barn* (1 barn = 10^{-24} cm^2).

2.2. Clasificación de reacciones nucleares

Las reacciones nucleares pueden clasificarse según diversos criterios. De éstos, típicamente pueden considerarse tres: clasificación según las partículas reaccionantes; clasificación según los productos obtenidos; y clasificación según los mecanismos a través de los cuales ha tenido lugar la reacción nuclear.

Respecto del primero de los criterios, en la ingeniería nuclear de fisión interesan sobre todo las reacciones inducidas por neutrones, es decir, aquellas en las que un núcleo blanco sufre bombardeo neutrónico.

De entre éstas cobra especial significación la fisión, pero como se verá más adelante, también son importantes las capturas y las dispersiones, tanto *elásticas* como *inelásticas*.

Otro tipo de reacciones de importancia energética, especialmente para el futuro, son las reacciones de fusión, en las que las partículas reaccionantes son núcleos ligeros que se unen para dar un núcleo más pesado, y en algunos casos partículas residuales.

En cuanto a los productos, las reacciones nucleares admiten una amplia clasificación, comenzando por distinguir si entre los productos aparecen sólo núcleos o existen además otras partículas, y especialmente neutrones. Las reacciones típicas de producción de neutrones son las fisiones. Otras reacciones que producen neutrones, y que son de importancia para la ingeniería nuclear como base de fuentes neutrónicas, son las provocadas, bien por fotones (γ), bien por partículas alfa (α) procedentes de desintegraciones, sobre materiales o núcleos de cierta abundancia neutrónica.

En cuanto a los mecanismos de la reacción, en el campo estricto de la ingeniería de reactores, interesan fundamentalmente las reacciones que transcurren a través de *núcleo compuesto*, es decir, en las que el neutrón se

agrega a la estructura nuclear del núcleo blanco, para formar transitoriamente un núcleo con un neutrón adicional, que a la postre puede finalizar la reacción de diversos modos, incluido el de la fisión en el caso de tratarse de un combustible nuclear.

Junto a éstas, tienen cierta importancia las reacciones directas, que se dan tan sólo cuando el neutrón incidente tiene una energía considerablemente alta. En las reacciones directas, en vez de existir una interacción global con todos los nucleones del núcleo, la partícula incidente prácticamente no interacciona más que con los nucleones de su inmediata vecindad en la zona de impacto y el período necesario para que transcurra la reacción (del orden de 10^{-21} segundos) es notablemente más corto que en el caso de los núcleos compuestos (de alrededor de 10^{-14} s.).

2.3. Reacciones nucleares con neutrones

Las reacciones en las que se utiliza como proyectil el neutrón son fundamentales desde todos los puntos de vista en la ingeniería nuclear, tanto por la producción energética como por la generación de residuos radiactivos, bien a través del mecanismo de fisión, bien por capturas.

Las probabilidades de reacción entre núcleos y neutrones son mucho mayores que entre núcleos y partículas cargadas o que entre núcleos distintos, debido a las fuerzas de repulsión que hay que vencer para entrar en el corto radio de acción de las fuerzas nucleares, por lo que se necesitan altas energías cinéticas relativas.

Aunque existen varias familias de reacciones, las auténticamente significativas que tienen lugar en un reactor nuclear y gobiernan su población neutrónica pueden catalogarse en dos grandes bloques: **dispersiones** y **absorciones**.

En las **dispersiones**, el neutrón interacciona con el núcleo y emerge de la colisión con menor energía de la inicial, siempre que el neutrón tenga una energía muy por encima de la energía de agitación térmica del medio. Cuando el neutrón tiene una energía comparable a esta última, se denomina **neutrón térmico**.

Las dispersiones se clasifican a su vez en dos tipos: dispersiones *elásticas* y dispersiones *inelásticas*.

En la **dispersión elástica** el núcleo que experimenta la colisión no sufre ninguna excitación residual, por lo cual sólo hay transferencia de energía cinética entre uno y otro cuerpo (factor $Q = 0$).

En la **dispersión inelástica** el núcleo blanco queda en estado excitado, por lo cual emitirá posteriormente radiación electromagnética. En esta reacción

el neutrón no sólo pierde energía por transferencia de energía cinética al núcleo, sino por la excitación en la que queda dicho núcleo.

Las reacciones de dispersión elástica son posibles con todos los núcleos, pero de cara a la deceleración neutrónica, es decir, a la transferencia de energía cinética del neutrón al núcleo, son más efectivas las sufridas contra núcleos ligeros. La dispersión inelástica, sin embargo, requiere la participación de la estructura nuclear, por lo que sólo puede ocurrir cuando la energía cinética del neutrón incidente es tal que puede dejar al núcleo blanco en estado excitado, lo cual es tanto más difícil cuanto más ligero sea el núcleo.

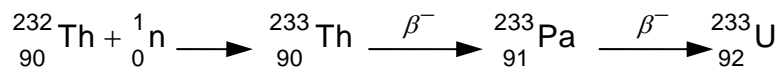
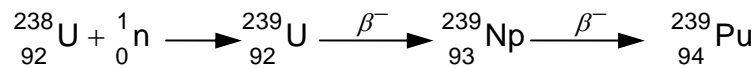
La dispersión inelástica prácticamente sólo se verifica con núcleos pesados, como los del combustible. Este mecanismo de dispersión inelástica con núcleos pesados no es el proceso fundamental para la deceleración de neutrones necesaria en un reactor térmico, sino que ésta se logra gracias a las reacciones elásticas con núcleos ligeros, fundamentalmente el hidrógeno, conociéndose este proceso por el nombre de **moderación** neutrónica.

Las **absorciones** son reacciones caracterizadas por la desaparición del neutrón que provoca la reacción. Dentro de esta clase de reacciones cabe distinguir dos tipos fundamentales: las *capturas* y la *fisión*.

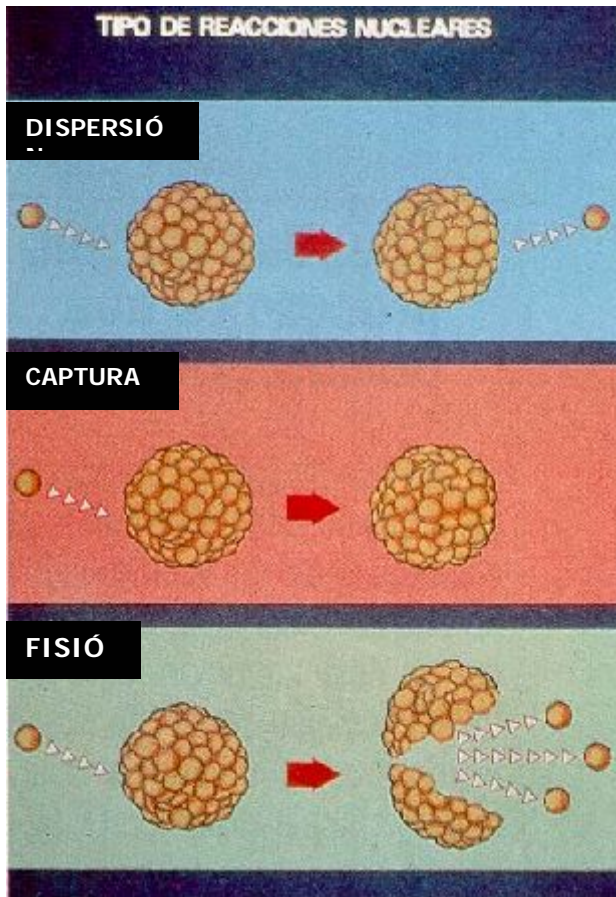
En las **capturas** no aparece ningún neutrón entre los productos resultantes, que generalmente se restringen al propio núcleo compuesto, más algún fotón de desexcitación en su caso. En este sentido cabe distinguir las capturas radiactivas de las capturas no radiactivas, según produzcan o no núcleos resultantes radiactivos.

En las capturas que producen radiaciones subsiguientes, caben distinguir a su vez dos grupos: las *capturas radiantes*, en las que el núcleo resultante es un núcleo estable, pero se produce en estado excitado, por lo que se desexcita emitiendo un fotón; y las *capturas de activación*, en las cuales el producto resultante es inestable, generalmente radiactivo de tipo β negativo, y de acuerdo con su vida media sufrirá en su momento la desintegración correspondiente, incluyendo normalmente radiación electro-magnética asociada a esta desintegración.

Dentro del campo de las capturas con producción de nucleidos radiactivos hay que hacer mención de las denominadas **capturas fértiles**, por la importancia que revisten en la ingeniería nuclear, y particularmente en la evolución de la composición isotópica del combustible durante el quemado. Los dos ejemplos fundamentales de capturas fértiles son los del uranio-238 y torio-232, aunque en un sentido más amplio habría que incluir también el de otros nucleidos de tipo par-par (Z par, A par) como el plutonio-240, pero son sólo los dos anteriormente citados los que proceden de materias primas naturales. Las reacciones son



en las cuales se aprecia una misma estructura, en la que el nucleido par-par original captura un neutrón pasando a un núcleo compuesto β^- emisor, que a su vez da un descendiente también β^- emisor de vida ligeramente más larga, para en definitiva proporcionar un nucleido **fisible**, es decir, un nucleido par-impar, fisionable por neutrones de cualquier energía. Así pues, a través de las capturas del U-238 se genera Pu-239, lo que da origen a la producción de los plutonios en el reactor.



Similarmente en el caso de utilizarse el ciclo del torio, a partir del torio natural (todo el Th-232) se obtiene U-233 a través de la reacción antes citada. El U-233 es un combustible nuclear de magníficas cualidades, al igual que el Pu-239, de propiedades nucleares magníficas como combustible fisionable, tanto a bajas energías como a altas energías. Aunque ambos nucleidos son α emisores, sus períodos de semidesintegración son lo suficientemente largos como para que se consideren prácticamente estables en cuanto a la economía del combustible. Al U-238 y Th-232 se les denomina nucleidos **fértiles**, ya que pueden producir núcleos fisionables por captura neutrónica.

Dentro de las capturas hay que tener en cuenta que el fenómeno de fertilidad es muy importante en los nucleidos pesados, mientras que el resto de las capturas no tienen ninguna utilidad, ni siquiera a largo plazo, respecto de la economía neutrónica. De ahí que las capturas que no conlleven ninguna fertilidad en el combustible se denominan *capturas parásitas*, aunque habría que distinguir en este contexto dos casos: La captura parásita deseada, como es la que se produce en los *absorbentes de control*, y gracias a la cual se elimina el exceso de población

neutrónica para evitar que haya reactividades improcedentes; y la captura parásita indeseable producida por la mayor parte de los nucleidos presentes en el reactor, desde el hidrógeno hasta los productos de fisión, sin olvidar el material estructural.

En el cuadro adjunto, se ilustra un esquema resumen de las reacciones nucleares con neutrones descritas a lo largo de este apartado.

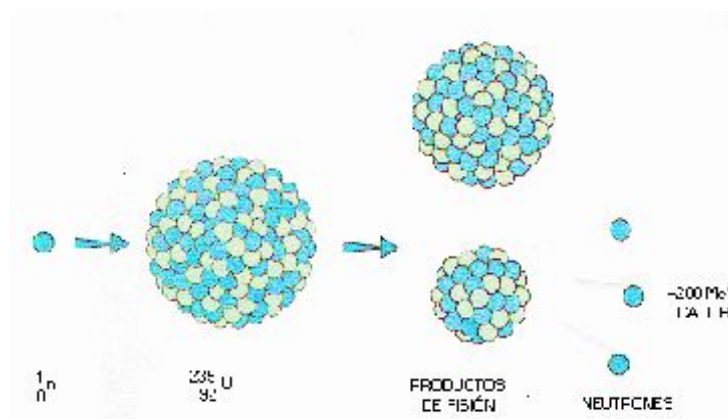
Reacciones nucleares con neutrones		Aprovechamiento
Dispersiones	Elásticas	Moderación neutrones
	Inelásticas (núcleo excitado)	Calentamiento
Absorciones	Capturas - Radiantes (núcleo excitado)	Control del reactor / Calentamiento
	-De Activación (núcleo radiactivo)	Indeseada
	- Fértiles	Producción núcleos fisionables
	Fisión	Producción energía

La fisión, por ser el mecanismo fundamental en que se basa la explotación de la energía nuclear en las centrales nucleares actuales, requiere el siguiente apartado específico.

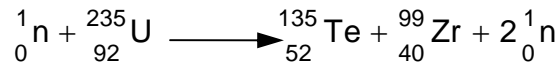
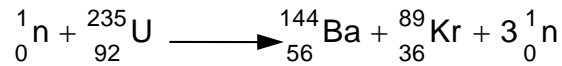
3. LA FISIÓN NUCLEAR

Los núcleos de átomos pesados, al ser bombardeados con neutrones, pueden dividirse o escindir en dos fragmentos (raramente en tres) formados por núcleos de átomos más ligeros, con emisión de neutrones y con un gran desprendimiento de energía, como consecuencia de la mayor estabilidad del producto resultante. A este tipo de reacciones nucleares se las denomina reacciones de **fisión nuclear** (Fig. 4).

Figura 4.- Reacción de fisión nuclear.



Unas reacciones típicas de fisión podrían ser las siguientes:



La probabilidad de la reacción de fisión aumenta cuando disminuye la energía de los neutrones proyectiles, que por esta razón han de ser frenados (moderados) antes de que interaccionen con el combustible.

El núcleo que absorbe el neutrón queda "excitado" (núcleo compuesto), se estira y se rompe brutalmente (productos de fisión) liberando dos o tres neutrones muy energéticos. Estos neutrones podrán, a su vez y en condiciones adecuadas (moderándolos mediante reacciones de dispersión elástica) provocar nuevas fisiones que liberarán otros neutrones, y así sucesivamente. Este efecto multiplicador se llama "reacción en cadena" (Fig. 5).

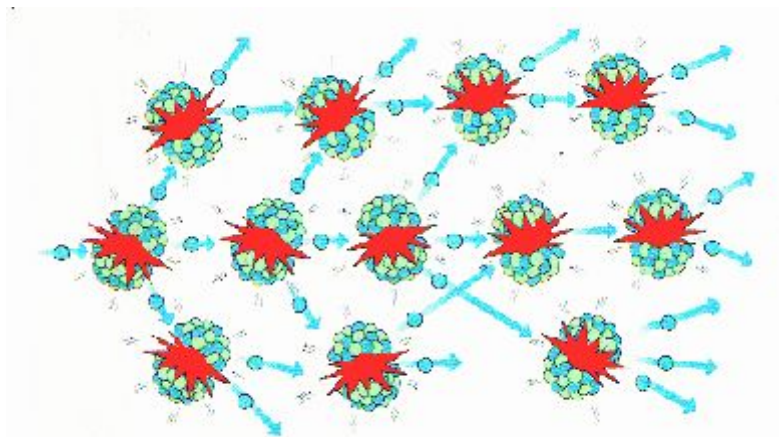


Figura 5.- Reacción en cadena.

Si se logra mantener una población de neutrones tal que el número de fisiones que tienen lugar por unidad de tiempo permanece constante, se dice que la reacción está controlada. Este es el principio de funcionamiento en el que están basados los reactores nucleares, que son fuentes controlables de energía nuclear de fisión.

Las reacciones de fisión fueron descubiertas por Otto Hahn y Fritz Strassman en 1939, y el artífice encargado de la puesta en práctica de la idea de desarrollar la reacción en cadena fue Enrico Fermi, que reunía la doble condición de ser un magnífico teórico y un hábil experimentador. El 2 de diciembre de 1942 consiguió, con su equipo, la reacción de fisión en cadena autosostenida en la famosa Chicago Pile 1 (abreviadamente CP-1), construida en una pista de squash bajo las gradas del estadio de fútbol de la Universidad de Chicago. Se trataba de un apilamiento de aproximadamente 7m × 7m constituido por bloques de grafito (moderador de neutrones), atravesado de

lado a lado por barras de uranio natural (combustible nuclear) de una pulgada de diámetro.

Las reacciones de fisión que tienen lugar en los reactores nucleares se producen al ser bombardeados con neutrones núcleos de átomos pesados (U, Pu, Th, ...), pero no se producen de la misma forma en todos los núcleos. Como ya se ha mencionado anteriormente, existen los llamados núcleos **fisionables** que pueden sufrir reacciones de fisión con neutrones de cualquier energía, y los llamados núcleos **fértiles** que pueden producir núcleos fisionables mediante reacciones de captura neutrónica, a lo que alude su nombre; también fisionan, pero sólo con neutrones de muy alta energía.

Los isótopos fértiles son aquellos que tienen un número par de nucleones, mientras que los fisionables son los que disponen de un número impar de ellos. De entre los primeros: U-238, Pu-240, Pu-242, Th-232 son los más importantes; mientras que entre los fisionables: U-233, U-235, Pu-239, Pu-241.

La capacidad de fisión de los núcleos se mide a través del valor de la sección eficaz que presentan para la fisión, la cual depende de la energía de los neutrones que interactúan con dichos núcleos. A medida que dicha energía disminuye la sección eficaz aumenta, y por tanto la capacidad de fisión. Por tanto, la fisión es más probable con neutrones térmicos (lentos) que con los rápidos. Así pues, los núcleos fisionables, a pesar de sufrir estas reacciones con cualquier neutrón, fisionarán en mayor cantidad cuando los neutrones sean térmicos; mientras que los núcleos fértiles, al tener umbrales de fisión (normalmente a energías del orden de los keV o MeV), sólo fisionarán con los rápidos, pudiendo, eso sí, producir núcleos fisionables con cualquier energía del neutrón.

Según se vio anteriormente, el uranio, empleado como combustible de un reactor nuclear, aparece en forma natural con los isótopos U-235 y U-238. El primero es el elemento fisionable, y el segundo es fértil.

Mientras que en el U-235 se producen cerca del 97% de todas las fisiones de un reactor con neutrones térmicos, el U-238 puede producir Pu-239 mediante reacciones de captura. Este elemento fisiona de forma similar al U-235, aumentando la proporción de fisiones. Las reacciones que tienen lugar para formar Pu-239 son las que se formularon en el apartado anterior.

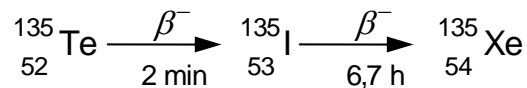
Como resultado de las reacciones de fisión inducidas por neutrones aparecen instantáneamente unos núcleos más ligeros que el núcleo fisionado, generalmente dos fragmentos, que se desprenden con una elevada energía cinética que se transforma en calor. Además, aparecen también instantáneamente neutrones con una energía media de 2 MeV (neutrones rápidos), y fotones. A todos estos productos de la fisión se les denomina inmediatos, ya que aparecen a los 10^{-14} segundos después de tener lugar la fisión.

Los productos de fisión inmediatos o primarios son radiactivos, emisores de partículas β , y dan lugar a unas series radiactivas formadas por varios nucleidos, generalmente dos o tres. En la desintegración de los productos de fisión también se libera energía que, asimismo, se transforma en calor; es el calor de desintegración o **energía residual** del combustible irradiado del reactor, que sigue produciéndose aunque ya no se estén llevando a cabo reacciones de fisión.

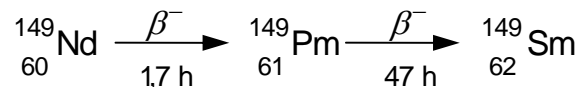
Las masas de los productos de fisión se suelen clasificar en dos grupos, uno contiene los ligeros y el otro los pesados, siendo muy poco probable la llamada fisión simétrica, en la que los productos de fisión tienen la misma masa.

De las series radiactivas formadas se suelen destacar aquellas en las que aparecen dos productos de fisión: el xenón-135 y el samario-149, que tienen un especial interés en el funcionamiento de los reactores nucleares, ya que poseen secciones eficaces de captura de neutrones lentos muy elevada, y por tanto actúan como elementos activos para disminuir la población de neutrones en el reactor.

El xenón-135 se obtiene como producto de fisión primario y como elemento de serie radiactiva encabezada por el telurio-135 mediante dos desintegraciones beta, apareciendo el yodo-135:



A su vez, el samario-149 se forma como elemento de la serie radiactiva encabezada por el neodimio-149, con dos desintegraciones β^- :



Para tener una idea del número de productos radiactivos obtenidos en la fisión inducida por neutrones, por ejemplo en el U-235, la fisión se produce en más de 40 formas distintas, lo que significa que se producen más de 80 diferentes productos de fisión, los cuales mediante los núcleos que aparecen en las series radiactivas dan lugar a la formación de unos 200 nucleidos radiactivos, algunos de los cuales no existen en la Naturaleza.

En la Fig. 6 se muestran los porcentajes de aparición de los productos de fisión para fisiones térmicas inducidas en el U-235 (similares curvas se tienen para el Pu-239 y U-233). Se aprecia que las curvas tienen un mínimo muy significativo en el centro, indicativo de una fisión o rotura simétrica, suceso raro comparado con las fisiones ligeramente asimétricas de mayor probabilidad. En todo caso, el número másico (A) de los productos de fisión del U-235 está

comprendido entre 70 y 160, aproximadamente, y no existen productos de fisión por debajo del primer límite ni por encima del segundo, porque dichas escisiones tan asimétricas conllevarían muy poca ganancia de estabilidad.

En las series radiactivas provocadas por los productos de fisión inmediatos, puede aparecer un núcleo que tenga todavía una energía en exceso, la cual necesite eliminar mediante la emisión de un neutrón. Al núcleo que provoca esta emisión se le denomina *precursor*, y al neutrón que aparece se le denomina **neutrón diferido**, porque se emite con un retardo característico de los períodos de semidesintegración de los núcleos previos de la cadena, y para diferenciarlo de los **neutrones inmediatos** producidos en el momento de la fisión. Para tener una idea comparativa, los neutrones diferidos suelen emitirse varios segundos después de la fisión. Aunque los inmediatos constituyen más del 99% del total de

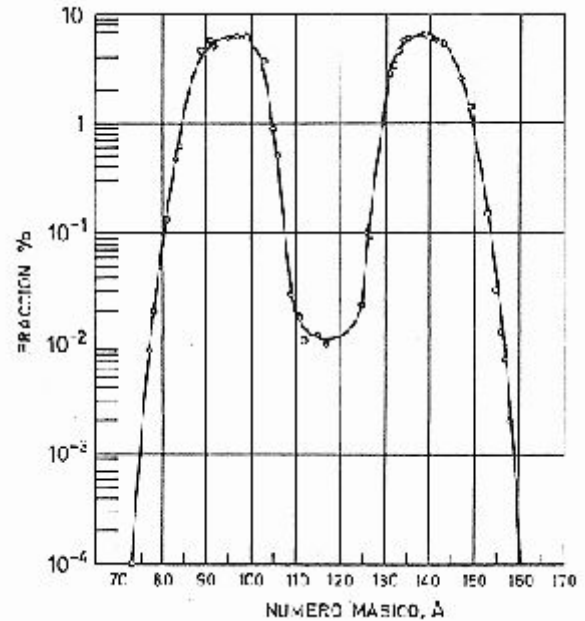


Figura 6.-
Curva de los productos de fisión del U-235.

los neutrones producidos, los diferidos juegan un papel fundamental en el funcionamiento de los reactores nucleares. Su presencia es necesaria para que se pueda sostener la reacción en cadena, y el hecho de que aparezcan con un retardo facilita la operación y el control del reactor, contribuyendo así a la seguridad intrínseca de éste.

Desde el punto de vista energético, la energía que se libera o desprende en la fisión nuclear inducida por neutrones procede de que un 0,1% de la masa reaccionante en la fisión desaparece como tal, convirtiéndose en energía que se manifiesta de diversos modos.

La razón de esta liberación de energía es la siguiente: Los núcleos de los átomos (por ejemplo, en este caso, el U-235) están constituidos por sus nucleones –partículas elementales: neutrones y protones–, cuyas masas están perfectamente establecidas. Si se determinan las masas de los núcleos atómicos, se observa que éstas resultan inferiores a la suma de las partículas que los constituyen. Esta diferencia de masa equivale, según la fórmula de Albert Einstein ($E = m \cdot c^2$), a una cantidad de energía representativa de la empleada en la constitución de dichos núcleos (energía de ligadura).

Si se tiene en cuenta el factor Q, anteriormente definido, de la reacción de fisión, su defecto de masa viene a decir que los núcleos hijos que se

generan (productos de fisión) están más fuertemente ligados individualmente (son más estables) que el U-235, transformándose el citado defecto de masa del 0,1% en energía.

Por término medio, en cada fisión de un núcleo de un átomo pesado (U, Pu, ...) se produce una energía de 200 MeV, que se manifiesta en energía cinética de los productos de fisión, en un 80% aproximadamente, y el restante 20% en forma de radiación y energía cinética de los neutrones y fotones inmediatos, y fotones y partículas β diferidos.

Como referencia, si todos los núcleos contenidos en 1 gramo de U-235 fisionaran, se llegaría a producir una energía de 1 MW·día en números redondos:

$$200 \text{ MeV / fisión} \times 1,6 \times 10^{-13} \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{MeV}} \times \frac{6,02 \times 10^{23}}{235} \text{ núcleos} = 24 \text{ 000 kW} \cdot \text{h} = 1 \text{ MW} \cdot \text{d}$$

4. EL REACTOR NUCLEAR

Tal como se ha indicado, en las reacciones de fisión inducidas por neutrones aparecen nuevos neutrones (inmediatos y diferidos) en número comprendido entre 2 y 3 según sea el núcleo que sufra la fisión. Estos neutrones pueden, a su vez, provocar nuevas fisiones, existiendo la probabilidad de que se produzca una reacción en cadena como la representada en la Fig. 5 para el U-235.

A partir de este concepto, se define un reactor nuclear como una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena. Éstas tienen lugar en el núcleo del reactor, compuesto por el combustible a base de núcleos fértiles y fisionables, el refrigerante, los elementos de control, materiales estructurales, y moderador en los reactores nucleares térmicos.

Los neutrones producidos en la fisión, al moverse en el núcleo del reactor, pueden producir nuevas fisiones, ser capturados en los materiales constituyentes o fugarse de los límites del núcleo. Así, si en un cierto instante existen n neutrones en el reactor como consecuencia de los procesos indicados, al cabo de un cierto tiempo han desaparecido todos, y dan lugar a una nueva generación de neutrones n' que aparecen por fisiones. Se denomina constante de multiplicación a la relación entre los neutrones de dos generaciones sucesivas:

$$K = \frac{n'}{n}$$

Esta relación puede tomar varios valores:

- $K=1$, en cuyo caso se producen tantos neutrones como desaparecen, denominándose al reactor **crítico**.
- $K<1$, en cuyo caso la reacción en cadena no se puede mantener, pues al producirse menos neutrones de los que desaparecen, al cabo de un cierto tiempo el número total de neutrones se anulará. Este estado del reactor es el denominado **subcrítico**.
- $K>1$, en esta situación denominada **supercrítica**, la aparición de más neutrones que los que desaparecen dará lugar a un estado divergente.

La operación normal de un reactor deberá realizarse siempre en condiciones de criticidad, es decir con $K=1$; salvo en los instantes de la puesta en marcha, y en las paradas, en los que será subcrítico. Solamente se podrán tener estados supercríticos durante breves instantes de tiempo, durante las subidas de potencia, provocando estados transitorios que nunca podrán dar situaciones divergentes con crecimiento de la potencia y de la población neutrónica. El tamaño crítico de un reactor se consigue mediante la óptima disposición del combustible y el resto de materiales del núcleo, entre los cuales la presencia de los absorbentes de neutrones en los materiales de control, permiten mantener la criticidad durante la operación, y los estados subcríticos de la parada y puesta en marcha.

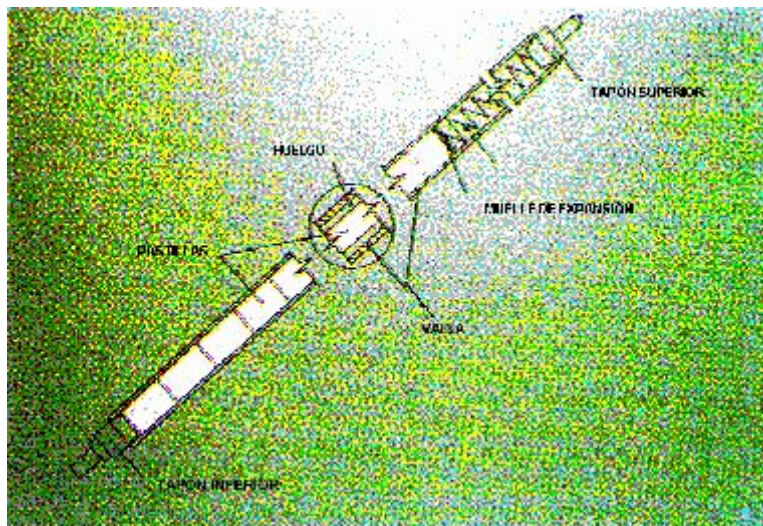
5. COMPONENTES DE UN REACTOR NUCLEAR

Un reactor nuclear está formado por distintas partes, cada una de las cuales juega un papel importante en la generación de calor. Dichas partes son:

5.1. Combustible

El combustible de un reactor nuclear es un material fisionable en cantidades tales que se alcance la masa crítica, y dispuesto de tal forma que sea posible extraer rápidamente el calor que se produce en su interior debido a la reacción de fisión en cadena.

Figura 7.- Varilla de combustible.



5.3. Refrigerante

Como se ha dicho, el calor producido en la reacción de fisión hay que extraerlo rápidamente del núcleo del reactor, formado por los elementos combustibles, por medio del refrigerante.

Los refrigerantes más usuales son fluidos, que pueden ser gases o líquidos.

Para que un fluido sea buen refrigerante debe de tener ciertas características, como

- no ser corrosivo para las vainas de los elementos combustibles ni para otras partes del reactor con las que esté en contacto;
- tener gran capacidad calorífica; y,
- tener una sección de captura neutrónica relativamente baja, así como las impurezas que le acompañen.

Los materiales más utilizados como refrigerantes son el agua ligera, el agua pesada y el anhídrido carbónico.

5.4. Reflector

En una reacción nuclear en cadena que tiene lugar en un reactor nuclear, un cierto número de neutrones tienden a escapar de la región donde aquélla se produce, con la consiguiente pérdida de los mismos. Esta fuga neutrónica puede reducirse, con lo que obtendremos un reactor nuclear más eficiente.

En la práctica, al medio utilizado para cambiar la dirección de muchos neutrones que normalmente escaparían del reactor y no volverían a reaccionar, se le conoce como reflector. Este es un material de baja sección eficaz de captura que rodea al núcleo del reactor.

La elección del material reflector depende de la clase de reactor. Si el reactor es un reactor térmico, el reflector puede ser de un material moderador, pero si es un reactor rápido entonces el reflector tiene que ser de un elemento de masa atómica grande (no moderador) para que los neutrones se reflejen en el núcleo con su original energía cinética.

5.5. Blindaje

Cuando un reactor nuclear está en operación, sale gran cantidad de radiación en todas las direcciones. En un reactor nuclear se producen todas las formas de radiación atómica. Los rayos α y β emitidos tienen relativamente poco poder de penetración y no son causa de grandes problemas. Sin embargo,

los rayos γ y los neutrones tienen un poder grande de penetración, y por esto no es posible trabajar en las proximidades del reactor sin tener protección adecuada para evitar el riesgo a las radiaciones. Por ello es necesario colocar un *blindaje biológico* alrededor del reactor para interceptar las radiaciones γ y neutrónica.

Los materiales más usados para construir un blindaje en un reactor son hormigón, el agua y el plomo.

6. CONTROL DE LOS REACTORES NUCLEARES

Para que un reactor nuclear funcione durante un período de tiempo tiene que tener un exceso de reactividad sobre el valor crítico, para compensar las pérdidas de neutrones que por diversos fenómenos tiende a reducirlos.

Este exceso de reactividad es máximo con el combustible fresco y va disminuyendo con la vida del mismo hasta que se anula, en cuyo momento hay que cambiar o recargar el combustible.

El reactor tiene que funcionar en condiciones de criticidad ($K=1$), lo que significa que el exceso de reactividad tiene que mantenerse en un valor cero.

Para controlar la reactividad se puede proceder de varias formas, que pueden actuar de forma simultánea o no. La introducción de absorbentes de neutrones en el núcleo por medio de barras llamadas de control, es un medio rápido y eficaz de control (Fig. 9). Estas barras están fabricadas con material de carburo de boro o de gran sección eficaz de captura, como metales o aleaciones de plata, indio y cadmio. En determinadas circunstancias puede disolverse en el moderador, cuando éste es líquido, un absorbente de neutrones como el ácido bórico. Este procedimiento de control es lento, pero tiene la ventaja que no distorsiona el flujo neutrónico como ocurre con las barras de control, lo que puede originar puntos calientes en los elementos combustibles, cosa no deseable.

En funcionamiento normal, un reactor nuclear tiene las barras de control en posición extraída del núcleo, pero el diseño de las centrales nucleares es tal que un fallo en un sistema de seguridad, siempre actúa en el sentido de seguridad del reactor. Así, por ejemplo, ante un fallo en el sistema de control del reactor, las barras de control se introducirían dentro del núcleo, compensando instantáneamente la reactividad del núcleo y parándose el reactor.

Otro tipo de control se realiza con materiales absorbentes o venenos consumibles que van desapareciendo por captura neutrónica, que están dentro del núcleo y no son extraíbles.

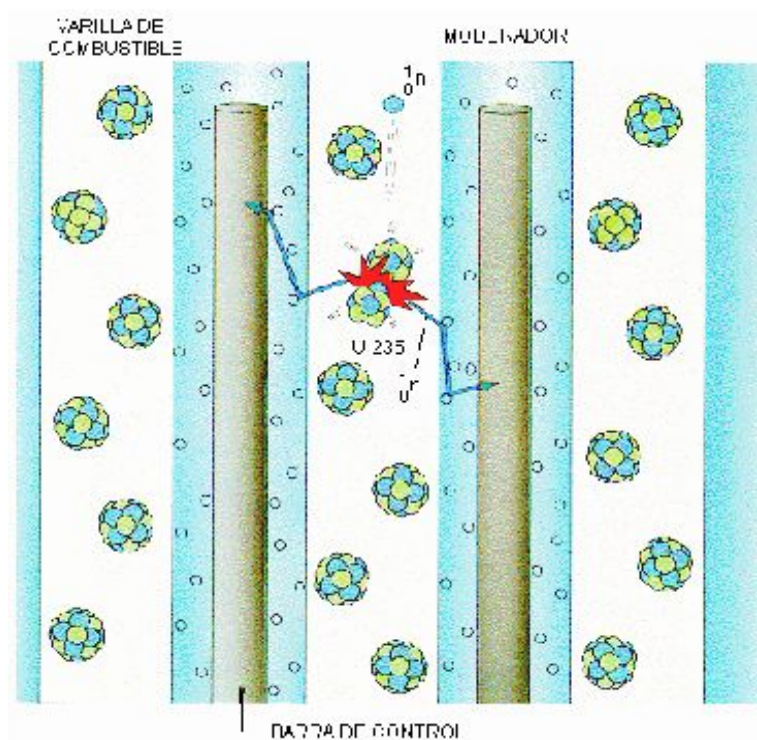


Figura 9.- Efecto de las barras de control en una reacción de fisión.

7.- FAMILIAS DE REACTORES NUCLEARES

Las diversas combinaciones de combustible, moderador y refrigerante configuran los diversos tipos de reactores nucleares posibles. Éstos pueden clasificarse según varios criterios; los más comunes son los siguientes:

- Según la velocidad de los neutrones que producen las reacciones de fisión: Reactores rápidos y reactores térmicos.
- Según el combustible utilizado: Reactores de uranio natural, en los que la proporción de U-235 en el combustible es la misma que se encuentra en la Naturaleza, esto es, aproximadamente 0,7%; Reactores de uranio enriquecido, en los que la proporción de U-235 se ha aumentado hasta alcanzar entre un 3 y un 5%.
- Según el moderador utilizado: Los que utilizan agua ligera, agua pesada o grafito.
- Según el material usado como refrigerante: Los materiales más utilizados son el agua (ligera o pesada) o un gas (anhídrico carbónico y helio), que a veces actúan simultáneamente como refrigerante y moderador. Otros refrigerantes posibles son: aire, vapor de agua, metales líquidos o sales fundidas.

A continuación se indican de forma esquemática los principales tipos de reactores nucleares existentes actualmente en el mundo en operación comercial, a saber:

a) Reactor de agua a presión (*PWR - Pressurized Water Reactor*).

El reactor de agua a presión es el tipo de reactor más ampliamente utilizado en el mundo y ha sido desarrollado principalmente en Estados Unidos, Alemania, Francia y Japón. Las de diseño soviético se denominan VVER.

En este reactor el agua se utiliza como moderador y como refrigerante. El combustible, de naturaleza cerámica, es uranio enriquecido en forma de óxido. El agua de refrigeración, que circula a gran presión, lleva la energía desprendida en el núcleo del reactor a un intercambiador de calor (generador de vapor), donde se genera el vapor que alimentará al turbo-grupo.

Las centrales españolas de José Cabrera (Zorita), Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo pertenecen a este tipo.

b) Reactor de agua en ebullición (*BWR - Boiling Water Reactor*).

El reactor de agua en ebullición, al igual que el anterior, es ampliamente utilizado y su tecnología ha sido desarrollada, principalmente, en Estados Unidos, Suecia, Alemania y Japón.

En este reactor el agua se utiliza como moderador y como refrigerante. El combustible es uranio enriquecido en forma de óxido, también de naturaleza cerámica. En este tipo de reactores la ebullición del agua ligera tiene lugar en el interior del núcleo del reactor, en el que la presión es inferior a la del sistema anterior. El vapor producido se separa del caudal del agua refrigerante por medio de unos separadores y unos secadores y a continuación fluye a la turbina.

En España pertenecen a este tipo las centrales de Santa María de Garoña y Cofrentes.

c) Reactor de grafito-gas (*GCR - Gas Cooled Reactor*).

Estos reactores, cuyo combustible es uranio natural en forma de metal, introducido en tubos de una aleación de magnesio, emplean grafito como moderador y se refrigeran por anhídrido carbónico.

Este tipo de reactores, desarrollado principalmente en Francia y Reino Unido, genera el vapor mediante un circuito cambiador de calor, exterior o interior a la vasija que contiene el núcleo.

A este tipo pertenecía la central española de Vandellós I, actualmente en fase de desmantelamiento.

d) Reactor avanzado de gas (*AGR - Advanced Gas Reactor*).

Ha sido desarrollado en el Reino Unido como sucesor del de grafito-gas. Las principales diferencias introducidas son que el combustible, en forma de óxido de uranio enriquecido, está introducido en tubos de acero inoxidable y que la vasija, de hormigón pretensado, contiene en su interior los cambiadores de calor.

e) Reactor refrigerado por gas a alta temperatura (*HTGR - High Temperature Gas Reactor*).

Este reactor representa una siguiente etapa en la serie de reactores refrigerados por gas. Existen prototipos y desarrollos en Alemania, Reino Unido y Estados Unidos, no existiendo centrales nucleares que los utilicen.

Difiere del anterior en tres aspectos principales: utilización del helio como refrigerante, en lugar del anhídrido carbónico, combustible cerámico, en vez de metálico, y temperaturas del gas mucho más elevadas.

f) Reactor de grafito y agua ligera (*LWGR - Light Water Graphite Reactor*).

Estos reactores utilizan uranio ligeramente enriquecido (2%) como combustible, grafito como moderador y agua ligera como refrigerante, que se transforma en vapor en el propio reactor. Este tipo de reactor también se conoce por las siglas RBMK, y pertenece a la serie de las centrales tipo Chernobil, tristemente conocida. Es un diseño único de origen soviético, de gran tamaño y con características esencialmente distintas a las de los reactores occidentales.

g) Reactor de agua pesada (*HWR - Heavy Water Reactor*).

Este tipo de reactor ha sido desarrollado principalmente en Canadá (reactores CANDU) y la India.

Emplea como combustible uranio natural o enriquecido, en forma de óxido, introducido en tubos de circonio aleado. Su principal característica es el uso de agua pesada como moderador y refrigerante.

En su diseño más común, los tubos de combustible están introducidos en una vasija (calandria) que contiene el moderador, agua pesada. El refrigerante, también agua pesada, se mantiene a presión para que no entre en ebullición, produciéndose el vapor en unos cambiadores de calor por los que circula el agua ligera.

h) Reactor reproductor rápido (*FBR - Fast Breeder Reactor*).

La principal característica de los reactores rápidos es que no utilizan moderador y que, por tanto, la mayoría de las fisiones se producen por neutrones rápidos. El núcleo del reactor consta de una zona fisionable, rodeada de una zona fértil en la que el U-238 o uranio natural se transforma en plutonio. El refrigerante suele ser sodio líquido y el vapor se produce en intercambiadores de calor. Su nombre de «reproductor» alude a que en la zona fértil se produce mayor cantidad de material fisionable que la que consume el reactor en su funcionamiento.

Existen centrales con este tipo de reactor en Francia (Phenix), Japón (Monju) y Rusia, entre otros países.

De los tipos de reactores existentes, los reactores de agua ligera, en sus dos versiones de agua a presión (PWR) y en ebullición (BWR), representan el 90% de los reactores de potencia que existen en el mundo, y constituyen los tipos de centrales nucleares que operan actualmente en España.