

UNIDAD 3. LA ENERGÍA NUCLEAR

INTRODUCCIÓN

Recuerda

- Si designamos por **Z** al número de protones de un núcleo y por **N** al número de neutrones, se denomina **número atómico**, Z, de un elemento al número de protones y **número másico**, A, a la suma del número de protones más el número de neutrones ($A = Z + N$).
- Los elementos químicos vienen definidos por el número atómico.
- Los elementos químicos se representan con la notación siguiente: ${}^A_Z E$
- Se denominan **isótopos** a los átomos de un mismo elemento (mismo número atómico) con diferente número másico (diferente número de neutrones). Por ejemplo ${}^{238}_{92}U$ y ${}^{235}_{92}U$.

1. LA ENERGÍA NUCLEAR

En 1942 se pone en funcionamiento el primer reactor nuclear, entrando el mundo en la Era Nuclear. En 1945 se lanzan dos bombas atómicas sobre Japón, dando fin a la 2ª Guerra Mundial. La humanidad ha disfrutado de los logros de la tecnología nuclear en medicina, agricultura, investigación y en la industria, pero también ha padecido las consecuencias de desastres nucleares como el de Chernobyl. Estas son la cara y la cruz de una forma de energía tan discutida hoy día y que cuenta con defensores y detractores en todas las partes del mundo.

1.1. Radiactividad natural

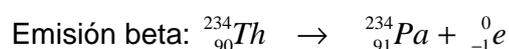
La radiactividad natural fue descubierta por el físico Becquerel en 1896. Consiste en la emisión espontánea de radiaciones por parte de algunos elementos existentes en la naturaleza como el uranio, el radio y el polonio, llamados por ello *elementos radiactivos*.

Las radiaciones emitidas son de tres tipos:

- **Radiación alfa (α)**, constituida por núcleos de helio (4_2He). Es poco penetrante. Es absorbida por una simple hoja de papel o por la piel del cuerpo humano. Es muy difícil que pueda penetrar en el organismo humano.
- **Radiación beta (β)**, constituida por electrones (${}^0_{-1}e$). Es más penetrante. Para detenerla se requiere una lámina metálica de varios milímetros o una plancha de madera de varios centímetros.
- **Radiación gamma (γ)**, consistente en radiación electromagnética (no partículas) de gran poder de penetración. Es capaz de recorrer centenares de metros en el aire. Para detenerla se necesita una lámina gruesa de plomo o una pared de hormigón.

Estas radiaciones son ionizantes y pueden dañar seriamente el metabolismo de un ser vivo.

Ejemplos de radiactividad natural:



Nota: Las radiaciones alfa y beta suelen ir acompañadas casi siempre de radiación gamma, aunque también pueden ser puras. También se conocen casos de radiación gamma pura, que se da en las transiciones entre isómeros nucleares de distinta energía de un mismo isótopo.

1.2. Transmutación artificial

Consiste en la transformación de núcleos de algunos elementos en otros diferentes de forma artificial mediante el bombardeo con determinados tipos de partículas: partículas alfa (${}^4_2\text{He}$), protones (${}^1_1\text{H}$), neutrones (${}^1_0\text{n}$) o núcleos de deuterio (${}^2_1\text{H}$).

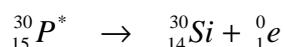
Ejemplo de transmutación artificial: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$

1.3. Radiactividad artificial

Consiste en la obtención artificial de elementos radiactivos que no existen en la naturaleza a través del bombardeo con partículas de determinados elementos químicos.

Ejemplo de radiactividad artificial: ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P}^* + {}^1_0\text{n}$

El isótopo del fósforo obtenido no existe en la naturaleza y se desintegra de forma espontánea:



Nota: ${}^0_1\text{e}$ es un *positrón*, que es una partícula elemental con la misma masa que el electrón y con la misma carga pero con signo positivo.

1.4. La energía nuclear

En todas las **reacciones nucleares**, como las anteriores, se cumple siempre la **ley de conservación de la carga y del índice de masa**, la cual establece que **las sumas de los números atómicos y de los números másicos de los elementos han de ser las mismas en los dos miembros de la ecuación**.

En la mayor parte de las reacciones nucleares, se forman núcleos más estables (con un mayor valor de energía de enlace¹) teniendo lugar una pérdida de masa (la masa de los reactivos es mayor que la de los productos). Esta masa se transforma en energía de acuerdo con la ecuación de **Einstein**:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

siendo **c** la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s).

A esta energía se le denomina energía nuclear.

Nota: la masa del núcleo de un átomo es menor que la suma de las masas de los protones y neutrones que lo forman. Esta diferencia se conoce como defecto de masa.

A nivel atómico se suele expresar la masa en unidades de masa atómica², **u**, y la energía en megaelectronvoltios³, **MeV**, siendo las equivalencias:

$$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Aplicando la ecuación de Einstein, y teniendo en cuenta que todos los datos anteriores se han aproximado, se deduce: $1 \text{ u} \Rightarrow 931,57 \text{ MeV}$ (tomando $c = 299.792 \text{ km/s}$)

¹ Cada núcleo atómico tiene asociado un valor de energía de enlace, que es la energía que se libera cuando los protones y neutrones se combinan para formar dicho núcleo, produciéndose una ligera pérdida de masa.

² 1 u es igual a la doceava parte de la masa de un átomo de carbono 12 (${}^{12}_6\text{C}$)

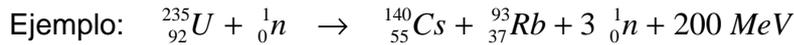
³ 1 eV es igual a la energía cinética que adquiere un electrón al ser acelerado en el vacío por una diferencia de potencial de 1 V.

2. REACCIONES NUCLEARES DE INTERÉS ENERGÉTICO

Los dos tipos de reacciones nucleares desde el punto de vista de aprovechamiento energético son las de **fisión** y las de **fusión**.

2.1. Reacciones de fisión nuclear

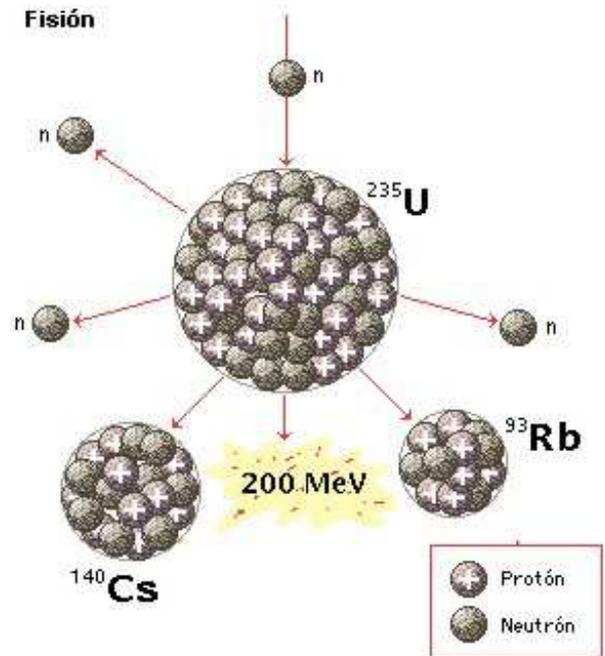
La **fisión nuclear** consiste en la ruptura de núcleos pesados de determinados elementos en núcleos más ligeros de otros elementos con liberación de energía.



Al bombardear un núcleo de uranio 235 con un neutrón lento (de baja energía), éste se hace inestable y se desdobra en dos núcleos más ligeros, uno de cesio 140 y otro de rubidio 93, y además se desprenden 3 neutrones y 200 MeV de energía. Estos neutrones pueden colisionar con otros átomos de uranio y proseguir la reacción en cadena.

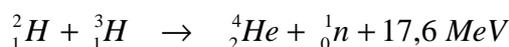
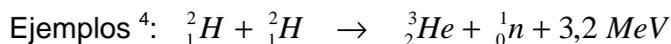
En el proceso se produce una pérdida de masa, de la cual proceden los 200 MeV de energía liberada.

La fisión de un núcleo de uranio 235 produce 50 millones de veces más energía que la combustión de un átomo de carbono.

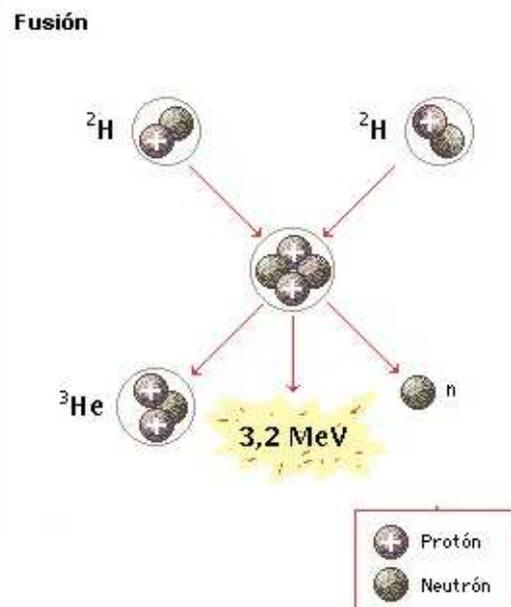
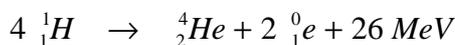


2.2. Reacciones de fusión nuclear

La fusión nuclear consiste en la unión de núcleos ligeros para formar un núcleo más pesado con liberación de energía.



El problema práctico de las reacciones de fusión es que para conseguir que dos núcleos cargados entren en contacto es necesario vencer las enormes fuerzas de repulsión electrostática entre ellos, por lo que deben poseer velocidades muy elevadas que sólo se consiguen a muy elevadas temperaturas (del orden de 10^8 °C). Estas condiciones sí se dan en las estrellas, donde se produce la reacción:

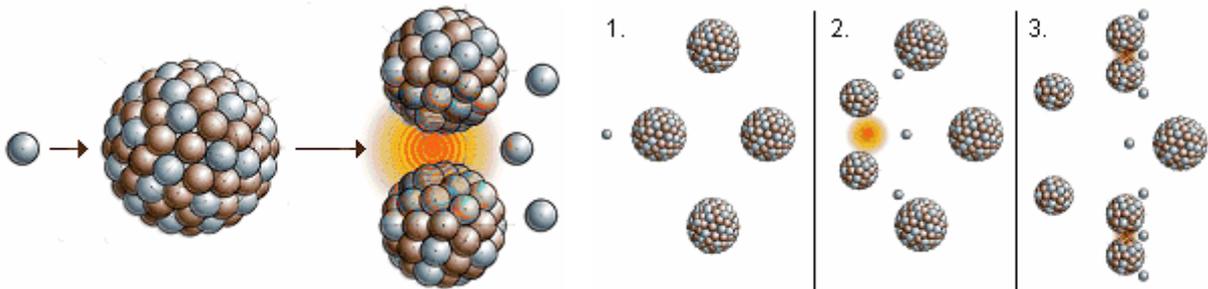


⁴ Existen tres isótopos del hidrógeno, el hidrógeno normal o protio (${}_1^1\text{H}$), el deuterio (D ó ${}_1^2\text{H}$) y el tritio (T ó ${}_1^3\text{H}$).

3. EL REACTOR NUCLEAR

3.1. Consideraciones sobre las reacciones de fisión nuclear producidas por la colisión de neutrones con núcleos de uranio.

- Estas reacciones de fisión pueden desarrollarse **en cadena** pues por cada átomo de uranio desintegrado se desprenden nuevos neutrones que pueden provocar nuevas reacciones.



- Los neutrones desprendidos poseen una energía demasiado elevada y no son aptos para producir reacciones de fisión (neutrones rápidos), por lo que se hace necesario frenarlos para disminuir su energía. Para ello se les hace chocar con átomos de determinadas sustancias denominadas **moderadores**, tales como agua ordinaria (H_2O), agua pesada (D_2O), grafito, etc.
- Parte de los neutrones producidos pueden escaparse del material o ser absorbidos por impurezas o por otros isótopos no fisionables del uranio (como el 238). Para que se produzca la reacción en cadena es necesaria una masa mínima de material fisionable, conocida como **masa crítica**, que en el caso del U-235 oscila entre 1 y 2 kg.
- Para que transcurra la reacción en cadena, el número de neutrones producidos por unidad de tiempo debe ser al menos igual a la suma de los neutrones absorbidos (tanto si producen fisión como si no) más los neutrones perdidos. Si definimos el **factor de multiplicación**, **k**, por la siguiente expresión:

$$k = \frac{n \text{ producidos}}{n \text{ absorbidos} + n \text{ perdidos}}$$

Puede ocurrir:

k = 1, la reacción en cadena será **crítica** o estacionaria

k > 1, la reacción será **supercrítica**, cada vez más rápida, dando lugar a una explosión.

k < 1, la reacción será **subcrítica**, decreciendo con el tiempo.

Existen **sustancias absorbentes de neutrones**, como el boro y el cadmio, que permiten disminuir el valor de **k**, manteniendo la reacción en estado crítico.

3.2. El reactor nuclear

El **reactor nuclear** es el dispositivo donde tiene lugar la reacción nuclear. En su parte central se encuentra el **núcleo del reactor**, el cual contiene el material **combustible** (material fisionable), el material **moderador** y las **barras de control** (material absorbente de neutrones).

El **combustible** adopta formas diversas (placas, cilindros, esferas,...) y está recubierto por una vaina metálica que lo aísla del exterior. El combustible más habitual es O_2U^{235} (óxido de uranio), enriquecido en U^{235} hasta el 5%. El uranio natural posee menos del 1% de U^{235} , siendo el resto U^{238} que no es fisionable.

El **moderador** envuelve al combustible y lleva inmersa una fuente de neutrones.

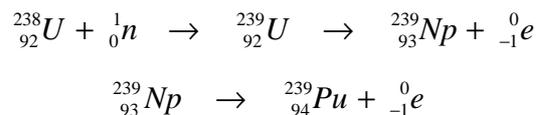
Las **barras de control** son barras móviles que se pueden introducir más o menos en el núcleo. Si están totalmente introducidas en el núcleo la absorción de neutrones es total, por lo que la reacción se detiene. Conforme se van extrayendo va aumentando el valor de **k**.

La energía liberada en forma de calor es transferida al **fluido refrigerante**, que puede ser agua ordinaria, agua pesada (D₂O), gas (CO₂, aire,...) o metal líquido. Este fluido se hace circular mediante una bomba, sacando el calor fuera del reactor.

El reactor está rodeado por un **blindaje de hormigón** de varios metros de espesor que frena las radiaciones hacia el exterior.

Tipos de reactores nucleares según su uso

- **Reactores de potencia:** son los de las centrales nucleares para producir electricidad.
- **Reactores de propulsión:** se utilizan en la propulsión de buques de superficie, como el portaaviones estadounidense Nimitz, y submarinos.
- **Reactores de investigación:** se dedican a la formación, investigación o la producción de isótopos radiactivos para su empleo en medicina, investigación y en la industria.
- **Reactores reproductores o regenerativos:** se utilizan para convertir material fértil en material fisionable. El que más interés ha presentado hasta ahora es el que obtiene Pu²³⁹ (que es fisionable) a partir de U²³⁸, que no lo es.



4. LAS CENTRALES NUCLEARES

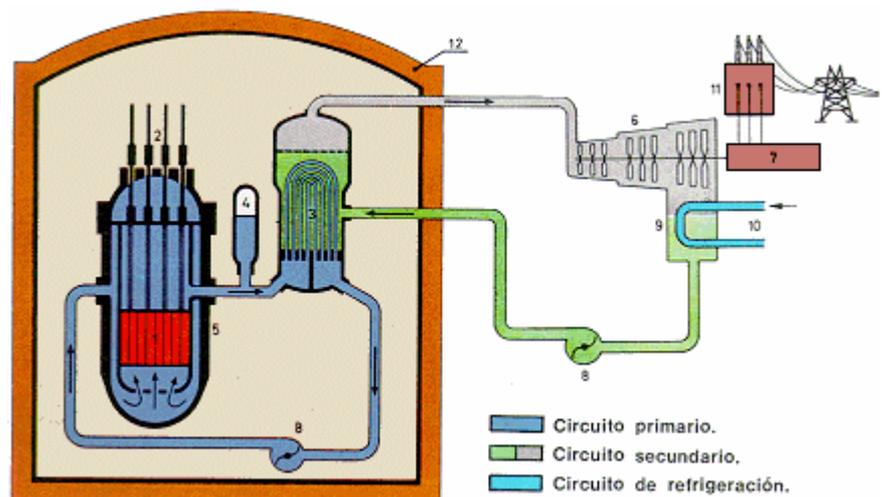
Las centrales nucleares son las instalaciones que transforman la energía nuclear en energía eléctrica. Los tipos de reactores de potencia de mayor uso en el mundo son dos:

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

El refrigerante es agua que circula a través de un circuito primario a una elevada presión (más de 150 atm) lo que permite que se mantenga líquida a temperaturas de más de 300 °C.

Esta agua pasa a un **generador de vapor** donde cede calor al agua del circuito secundario que sí se transforma en vapor a presión que se dirige hacia las turbinas.

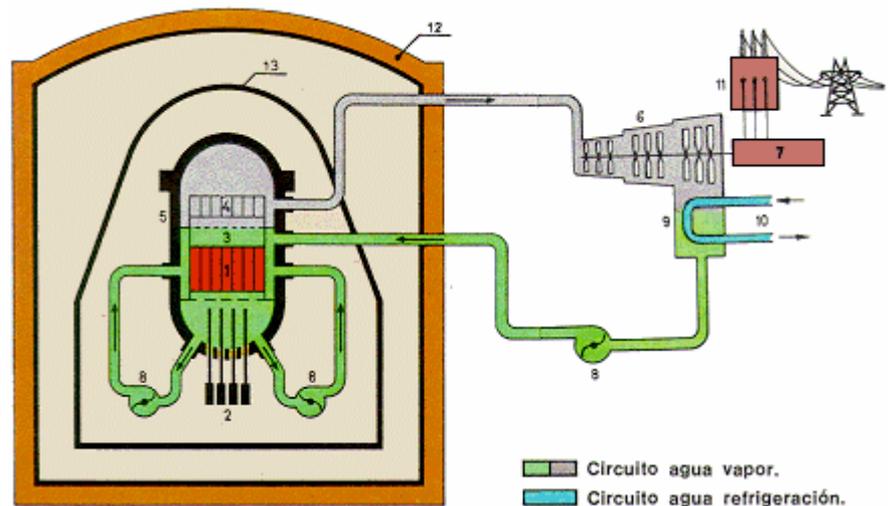
El circuito secundario está aislado del agua del núcleo, por lo que no es radiactivo.



• **Reactores de agua en ebullición (BWR = Boiling Water Reactor)**

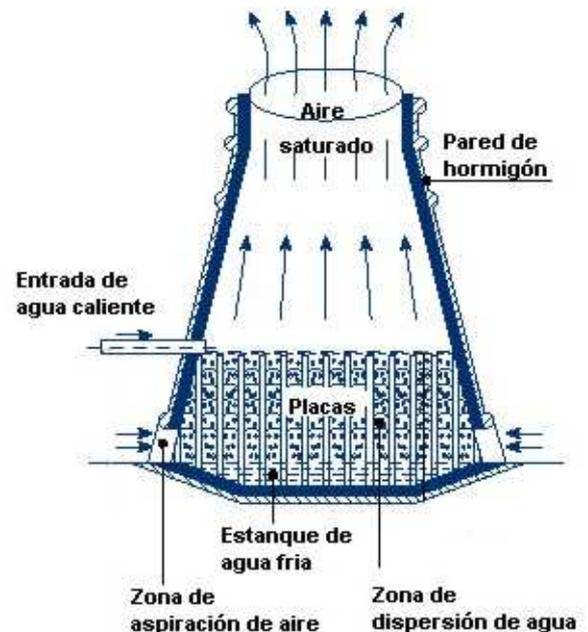
El agua de refrigeración, que también actúa como moderador, está sometida a menos presión, por lo que se convierte en vapor en el propio reactor y de aquí pasa directamente a las turbinas.

Este tipo de reactor no tiene generador de vapor. El vapor que pasa a las turbinas sí es, en este caso, radiactivo.



En cualquiera de los dos casos, el vapor procedente del generador de vapor (caso PWR) o directamente del reactor (caso BWR) es canalizado hacia las **turbinas**, haciéndolas girar. Estas turbinas se acoplan a un **generador eléctrico** que transforma la energía cinética de giro en energía eléctrica. Unos **transformadores elevadores** elevan la tensión de la energía eléctrica para su distribución.

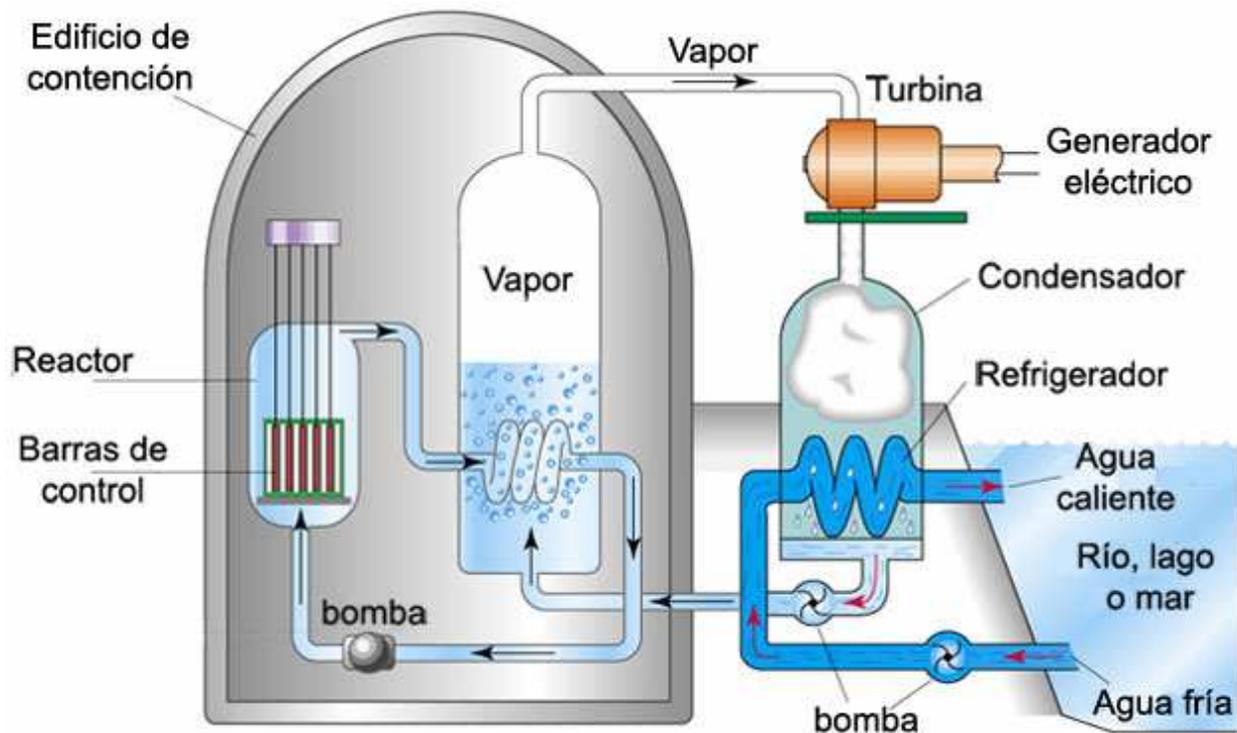
El vapor ya sin presión procedente de las turbinas se encamina hacia el **condensador**, donde se licua debido a un circuito de refrigeración que toma agua de un río o del mar o usa una **torre de refrigeración**.



Finalmente, el vapor condensado se conduce de nuevo al generador de vapor o al reactor mediante una **bomba**.

En las centrales de potencia el combustible gastado se almacena temporalmente en la propia instalación, en una piscina especialmente adecuada para ello, lo que permite bajar la actividad de los productos de fisión de vida corta.

Posteriormente, estos residuos son introducidos en contenedores blindados y trasladados hasta su almacenamiento definitivo o bien a las **plantas de reprocesamiento**, donde se recuperan el uranio no empleado y el plutonio 239 producido en el reactor.



5. LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD EN LOS REACTORES NUCLEARES

La mayor fuente de radiactividad en los reactores son los elementos de combustible. Una serie de **barreras de contención** impide que los productos de fisión pasen a la biosfera.

- La primera barrera la constituye la vaina resistente a la corrosión que contiene al combustible.
- Las gruesas paredes de acero del sistema de refrigeración primario de los reactores PWR forman una segunda barrera. La propia agua de refrigeración absorbe parte de los isótopos biológicamente importantes, como el yodo.
- El edificio de acero y hormigón supone una tercera barrera.

Pero, además, los sistemas de seguridad de los reactores emplean una compleja instrumentación para vigilar constantemente su situación y desconectar el reactor en circunstancias anómalas. Veamos algunos ejemplos de estas **medidas de seguridad**:

- Una de las medidas que se pueden tomar en caso de emergencia es la **introducción total de las barras de control** en el núcleo para detener la reacción en cadena.
- Otra medida consiste en **inyectar boro en el refrigerante** para absorber neutrones y detener la reacción en cadena, con lo que la desconexión está aún más garantizada.
- En caso de que se produjera una descompresión en el circuito de refrigeración por una rotura importante en una tubería, gran parte del refrigerante se convertiría en vapor, y el núcleo dejaría de estar refrigerado. Para evitar una pérdida total de refrigeración del núcleo, los reactores están dotados con **sistemas de refrigeración de emergencia** que empiezan a funcionar automáticamente en cuanto se pierde presión en el circuito primario de refrigeración.

- En caso de que se produzca una fuga de vapor al edificio de contención desde una tubería rota del circuito primario de refrigeración, se ponen en marcha **refrigeradores por aspersión** para condensar el vapor y evitar un peligroso aumento de la presión en el edificio.

6. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA NUCLEAR DE FISIÓN

Entre las **ventajas** figuran:

- Representan una alternativa energética viable ante el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, y las escasas potencias obtenidas actualmente con las energías alternativas.
- No produce emisiones contaminantes o de efecto invernadero como los combustibles fósiles.

Entre los **inconvenientes**:

- Elevados costos de las instalaciones y de las medidas de seguridad.
- Algunos residuos radiactivos presentan actividad radiológica durante miles de años, por lo que su almacenamiento seguro representan un problema en el presente y en el futuro.
- El enorme peligro que representan los accidentes nucleares o las fugas radiactivas, ya que pueden producir la muerte o muy graves enfermedades a un enorme número de personas y afectar a lugares muy alejados.

7. LA ENERGÍA NUCLEAR DE FUSIÓN

Los **problemas** básicos para alcanzar las condiciones para la fusión nuclear útil son:

- Calentar el gas a las altísimas temperaturas necesarias (del orden de 10^8 °C).
- 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 plasma ⁵.

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.

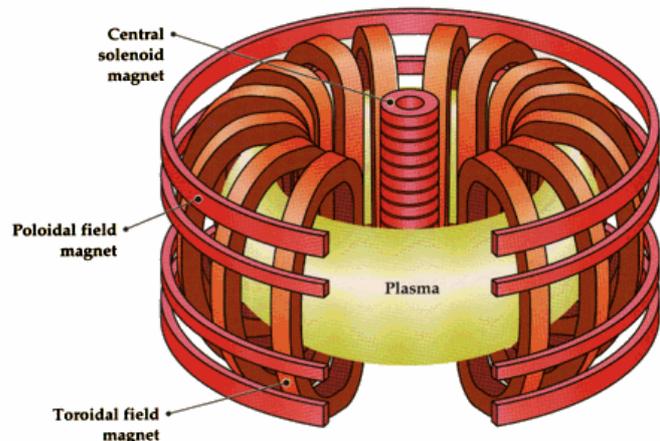
Sin embargo, como el plasma está formado por núcleos y electrones cargados, el plasma puede contenerse en una zona de campo magnético intenso de la forma apropiada (botellas magnéticas). No obstante, debemos considerar que para que un dispositivo de fusión resulte útil, la energía producida debe ser mayor que la energía necesaria para confinar y calentar el plasma.

Desde 1950 se han llevado a cabo numerosos proyectos para el **confinamiento magnético de plasma** en EE.UU., la antigua URSS, Gran Bretaña, Japón y otros países. Uno de los

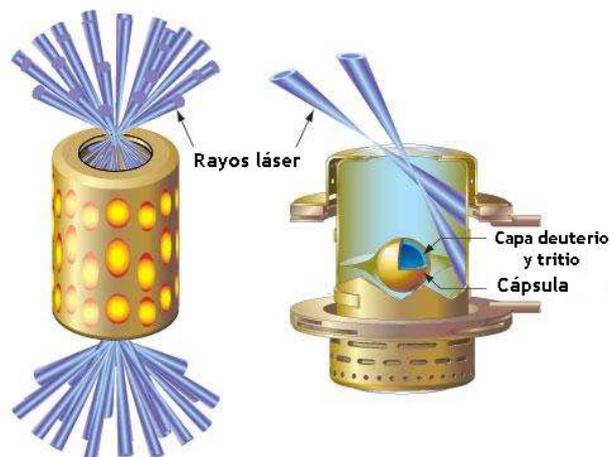
⁵ Se denomina **plasma** al estado de la materia, generalmente gaseoso, en el que todos o parte de los átomos o moléculas se encuentran disociados en forma de iones. En el caso del hidrógeno, núcleos con carga positiva por un lado y electrones libres por otro. El plasma es conductor de la electricidad.

dispositivos, el Tokamak, sugerido originalmente en la URSS, 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 mediante grandes electroimanes. La intensidad de este campo es unas 100.000 veces mayor que la del campo magnético de la Tierra. Las bobinas que rodean la cámara inducen en el plasma una corriente eléctrica de varios millones de amperios. Las líneas de campo magnético resultantes son espirales dentro de la cámara, que confinan el plasma. El plasma alcanza una temperatura elevada por el calentamiento resistivo producido por la inmensa corriente toroidal.



Otra posible vía para obtener energía de la fusión es el **confinamiento inercial**. En esta técnica, el combustible (tritio y deuterio) está contenido en una pequeña bolita que se bombardea desde distintas direcciones con un haz láser de pulsos de alta potencia. Esto provoca la implosión de la bolita y desencadena una reacción termonuclear que causa la ignición del combustible.



Hoy en día ni un método ni otro son económicamente rentables, pues es mayor la energía consumida en el proceso que la obtenida con él. No obstante, 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.

Si en un futuro la energía de fusión llega a ser practicable, ofrecería las siguientes **ventajas**:

- 1) Una fuente ilimitada de combustible, el deuterio, aunque es un isótopo del hidrógeno porcentualmente escaso, abunda en la naturaleza dada la enorme cantidad de hidrógeno existente en el agua de los océanos. El tritio es un isótopo más escaso, pero puede obtenerse a partir del litio.
- 2) Residuos mucho menos radiactivos (neutrones energéticos) y más sencillos de manejar que los procedentes de sistemas de fisión.

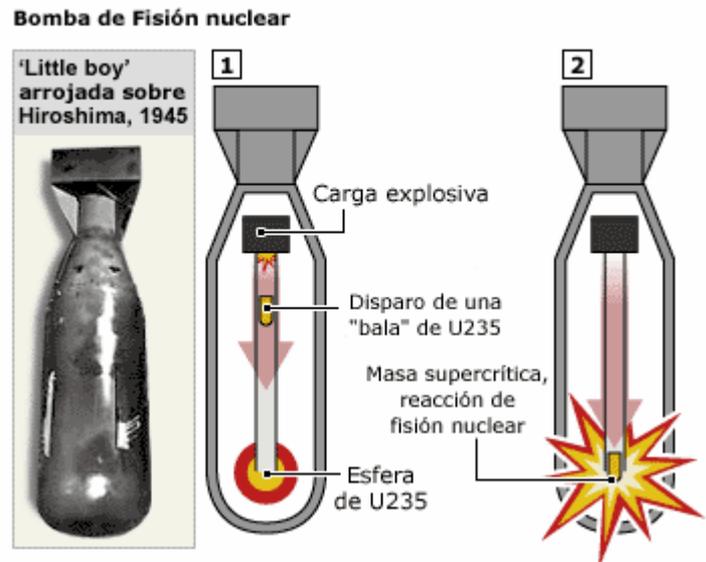
8. EL USO MILITAR DE LA ENERGÍA NUCLEAR

La gran energía liberada en tan corto espacio de tiempo en las reacciones nucleares ha posibilitado su utilización con fines destructivos, dando lugar a la bomba atómica (A) y la bomba de hidrógeno (H).

8.1. La bomba atómica o de fisión

Su fundamento es una reacción de fisión con factor de multiplicación $k > 1$. La reacción en cadena se inicia cuando un neutrón incide sobre una masa de combustible (U^{235} ó Pu^{239}) superior a la crítica.

Para manipular esta arma es preciso que no se alcance la masa crítica antes del impacto. Uno de los métodos para conseguirlo consiste en mantener dividido el combustible en dos partes inferiores a la masa crítica y haciendo que se junten en el momento del impacto utilizando un explosivo convencional (dinamita).

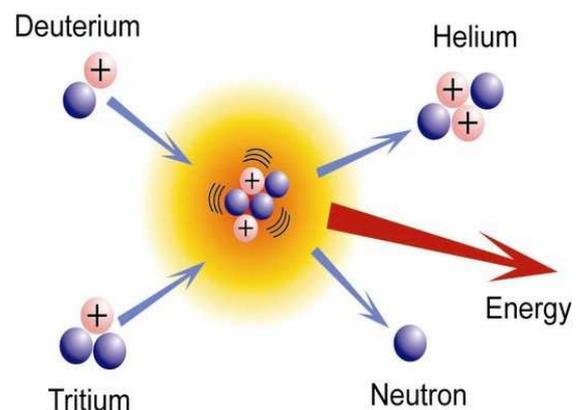


8.2. La bomba de hidrógeno o de fusión

Consiste en un dispositivo provisto de determinadas masas de deuterio (2_1H) y de tritio (3_1H) y de un detonador capaz de acelerar los núcleos y desencadenar la reacción:



Para iniciar esta reacción se requiere una temperatura del orden de 10^8 °C actuando durante una millonésima de segundo, lo que se consigue utilizando como detonador una pequeña bomba atómica de fisión.



8.3. Potencia y efectos de las bombas nucleares

Para medir la **potencia explosiva** de las armas nucleares se utilizan:

- El **kilotón** (kt), correspondiente a la energía producida por la explosión de 1000 toneladas de trinitrotolueno (TNT), con un valor de $4,18 \cdot 10^{12}$ J.
- El **megaton** (Mt) igual a 1000 kt.

La bomba lanzada en Hiroshima fue de 12,5 kt. La bomba H de mayor potencia construida fue detonada por los rusos en 1961 y tenía una potencia de 50 Mt.

Los **efectos de las explosiones atómicas** son de tres tipos: de choque o presión, térmicos y radiactivos.

- **Efectos de presión:** la explosión produce un elevado aumento de la presión en el punto del impacto que produce una onda expansiva en el aire circundante, la cual genera vientos de fuerzas muy superiores a los de un huracán. Son los efectos más destructivos.

- **Efectos térmicos:** la explosión produce una masa de gas incandescente muy caliente que emite un fogonazo de radiación térmica que provoca quemaduras e incendios. También ceguera o daños en la retina de quienes miran hacia la bola de fuego.
- **Efectos radiactivos:** una explosión nuclear produce dos tipos de radiaciones:
 - La **radiación inmediata**, que son radiaciones de neutrones y de rayos gamma que se propagan unos cuantos km² alrededor del punto de impacto. Estas radiaciones son absorbidas por el cuerpo humano pudiendo dañar algunas de sus células, lo que se traduce en posteriores trastornos físicos o incluso la muerte.
 - La **radiación residual** o **lluvia radiactiva**, que consiste en la caída sobre el suelo de partículas radiactivas que se han elevado a la atmósfera por la explosión y que, arrastradas por los vientos, pueden afectar a zonas muy alejadas y de muchos miles de km² de extensión.

Por el contrario, las bombas de hidrógeno apenas originan radiactividad y ésta es de tipo inmediato, afectando sólo a la zona cercana a la explosión. En este sentido se les llama bombas *limpias*.

9. LA ENERGÍA NUCLEAR EN ESPAÑA

En 2005 existían en funcionamiento 443 centrales nucleares en el mundo, destacando países como EE.UU. con 104, Francia con 59 y Japón con 57.

España cuenta actualmente con **7 reactores nucleares en activo**, distribuidos en 5 centrales.

Reactor	Provincia	Año puesta en servicio	Potencia (MW)
Almaraz I	Cáceres	1981	973,5
Almaraz II	Cáceres	1983	982,6
Cofrentes	Castellón	1984	1025,4
Ascó I	Tarragona	1983	1028,0
Ascó II	Tarragona	1985	1014,8
Vandellós II	Tarragona	1987	1081,7
Trillo	Guadalajara	1988	1066,0
TOTAL			7172,0



Además, se cuenta con un **centro de almacenamiento de residuos de baja y media actividad**, **El Cabril**, que está situado en la provincia de Córdoba, y la **fábrica de elementos combustibles** de **Juzbado** (Salamanca) que tiene una capacidad de producción anual equivalente a 300 toneladas de uranio enriquecido.

La central Vandellós I está en proceso de desmantelación, la central José Cabrera (Guadalajara) se desconectó en 2006 y la central de Santa M^a de Garoña (Burgos) en 2013.

Durante el año 2005, se produjo en España 57.550 GWh de energía eléctrica de origen nuclear, lo que representó el 19,5% de la producción total de electricidad.

En el año 1983 el gobierno español aprobó la **moratoria nuclear**, lo que significó la parada definitiva de algunas centrales (como Vandellós I) y que algunas ya construidas no llegasen a entrar en funcionamiento.

Todo el uranio utilizado en las centrales españolas es importado.