

INDICE

- 1.- Introducción**
- 2.- Estructura Atómica**
- 3.- Reacciones Nucleares**
- 4.- Fisión Nuclear**
- 5.- Productos de la Fisión Nuclear**
- 6.- Elementos Principales de un Reactor Nuclear**
- 7.- Tipos de Reactores Nucleares**
- 8.- Reactores Térmicos**
- 9.- Residuos Nucleares**

1.- Introdução

Los elementos fundamentales y el funcionamiento básico de una central termoeléctrica cuyo fluido de trabajo es agua (TV), puede observarse en la Figura 1.

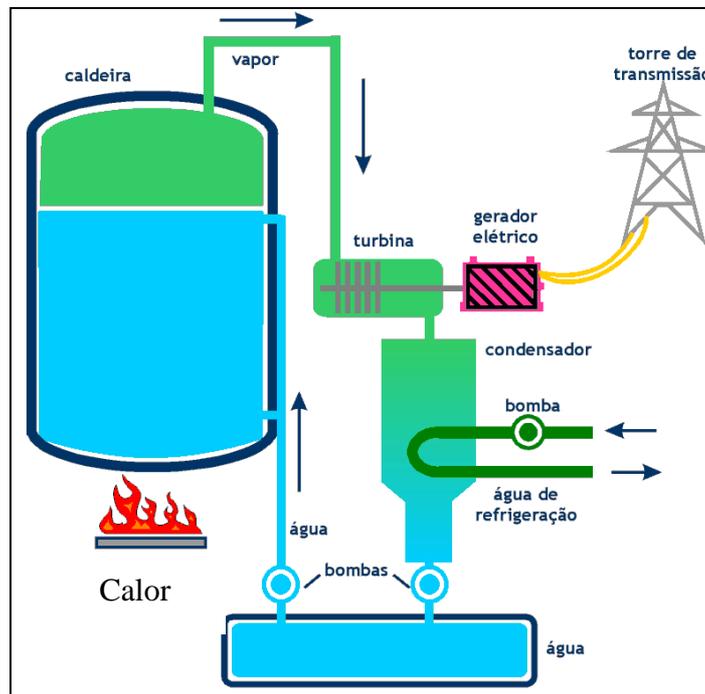


Fig. 1.- Esquema conceptual de una central termoeléctrica de vapor de agua

Para producir calor y evaporar el fluido de trabajo (agua), se usa un recurso energético que puede ser de origen:

- Fósil (carbón, fuel oil, gasoil, gas natural)
- Renovable (biomasa, radiación solar)
- Nuclear (uranio, plutonio)

Una central nuclear es una central termoeléctrica, donde la energía térmica que se origina en las reacciones nucleares de fisión del combustible es controlada. El combustible, sistema de control de la reacción nuclear, fluido refrigerante, moderador de velocidad de los neut, se encuentran en el interior de una vasija herméticamente cerrada, constituyendo este conjunto de elementos el reactor nuclear ("caldera").

El calor generado cuando se "quema" el combustible nuclear, es transmitido al refrigerante que puede usarse para producir vapor directamente (centrales BWR) o indirectamente por medio de un intercambiador de calor (centrales PWR). Este vapor es el que se emplea luego para accionar la turbina, a cuyo eje se acopla un generador de energía eléctrica (igual que una TV convencional).

2.- Estructura Atómica

El átomo es la unidad de materia más pequeña de un elemento químico, que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos. Está compuesto por un núcleo atómico, en el que se concentra casi toda su masa, formado por protones (p+) de carga positiva y neutrones (neut) eléctricamente neutros, rodeado de una nube de electrones (e-) de carga negativa, que permanecen ligados a este núcleo mediante la fuerza electromagnética (Figura 2). Un átomo en estado natural es eléctricamente neutro, es decir $n^{\circ} p^{+} = n^{\circ} e^{-}$

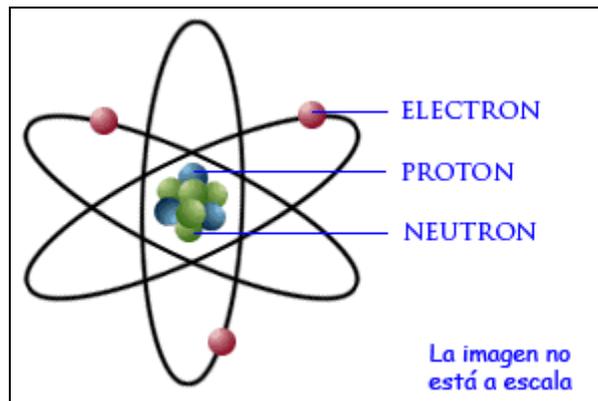


Fig. 2.- Esquema de un átomo

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 10^5 veces \ll que el átomo.

El número atómico, representado por la letra Z , es el número total de p^{+} o e^{-} (son iguales en un átomo neutro eléctricamente) que tiene el átomo. El comportamiento químico está asociado al $n^{\circ} Z$.

El número másico o número de masa, representado por la letra A , es la suma del número de p^{+} y el número de neut.

$$A = Z + n^{\circ} \text{ de neut}$$

La notación general que se usa para representar a un elemento X es: ${}^A_Z X$

Ejemplos: Silicio $\rightarrow {}^{28}_{14} Si$ Cobre $\rightarrow {}^{63}_{29} Cu$ Uranio $\rightarrow {}^{235}_{92} U$ Plutonio $\rightarrow {}^{239}_{94} Pu$

El n° de neut y p^{+} tiende a ser igual en átomos livianos, pero a medida que el átomo se hace más pesado crece gradualmente el n° de neut. Debido a que los p^{+} se repelen, cuanto mayor es su n° en el núcleo, mayor deberá ser la energía necesaria para mantenerlos juntos. Si bien los neut no tienen carga, su n° está relacionado con la estabilidad del núcleo. Más allá del elemento Bismuto, con 83 p^{+} y 126 neut, no hay más núcleos estables y todos los elementos siguientes son radiactivos.

Si un átomo pierde o gana un e^- , se obtiene el mismo elemento químico pero cargado, llamado ión (no neutro eléctricamente).

Si un átomo se divide en el seno de su núcleo, da lugar a otros átomos o elementos químicos diferentes.

Si un átomo se une a otro(s), se obtiene una molécula (O_2 , H_2O , CO_2 , etc.).

Isótopos: Existe una variedad de átomos que poseen cantidades diferentes de neut. y se denominan isótopos. Se caracterizan entonces por tener el mismo n° atómico Z que otro, pero difieren en su n° de masa A . Dado que las propiedades químicas no dependen de la cantidad de neut, los isótopos reaccionan químicamente de la misma manera. Ejemplos de isótopos son:

- El átomo de hidrógeno H se presenta en tres variedades o isótopos, como muestra la Figura 3:

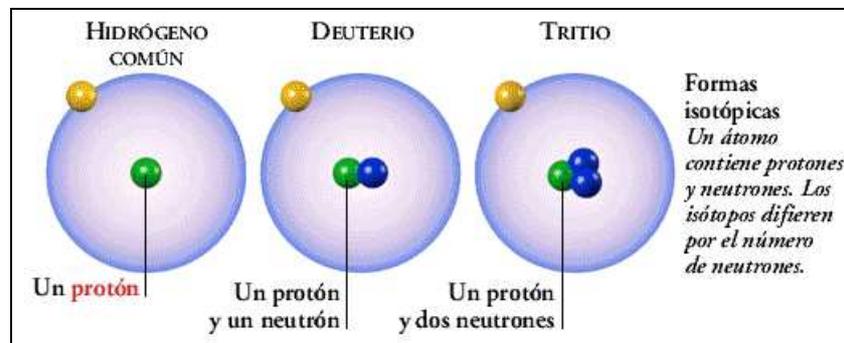


Fig. 3.- Isótopos de H

- El uranio natural (UN) está formado por tres isótopos de U que se presentan con los siguientes porcentajes (ver Figura 4):

- 99,284% de ${}^{238}_{92}U$ (su núcleo posee 92 p+ y 146 neut)
- 0,711% de ${}^{235}_{92}U$ (su núcleo posee 92 p+ y 143 neut)
- 0,0085% de ${}^{234}_{92}U$ (su núcleo posee 92 p+ y 142 neut)

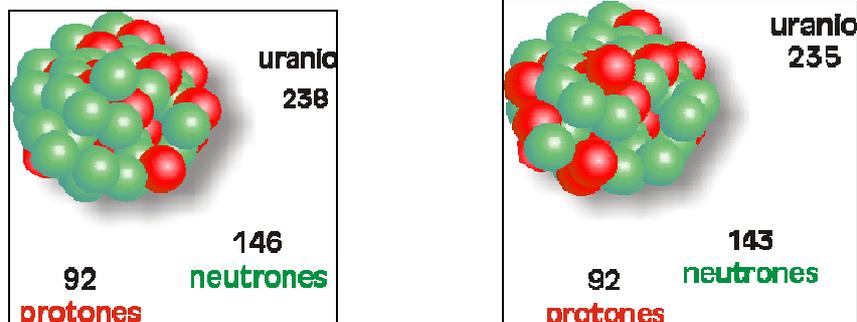


Fig. 4.- Núcleos del ${}^{238}U$ y del ${}^{235}U$

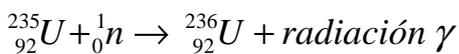
Nota: El ${}^{234}U$ es no fisionable, no fértil y de vida media de 245400 años

3.- Reacciones Nucleares

Los núcleos atómicos tienden a la estabilidad. Es estable cuando existen fuerzas nucleares atractivas que son iguales o mayores a las repulsivas, en otras palabras, las interacciones nucleares que experimentan los neut y p+ son mayores que las fuerzas de repulsión eléctrica entre los p+. Si sucede lo contrario, el núcleo sufrirá alguna transformación con el fin de estabilizarse.

Existen diferentes tipos de reacciones nucleares, donde un átomo original se transforma en un átomo de naturaleza distinta (Transmutación):

a) Captura: Un núcleo al ser bombardeado por una partícula la absorbe, sin que se produzca ninguna partícula emergente, con la excepción de rayos gamma (ver punto 4 y Figura 7). Por ejemplo la reacción de captura del ^{235}U es:



b) Cambio Radiactivo: Si un núcleo está en una configuración inestable, podrá estabilizarse emitiendo radiación de tipo:

- **Alfa** constituida por 2p+ y 2neut (${}^4_2\alpha$) que es un núcleo de He. La masa del átomo resultante disminuye en cuatro unidades y el n° atómico en dos. Posee poca energía. Puede ser usada en la medicina y en la industria (como fuente de energía).
- **Beta** que puede ser Beta - (${}^0_{-1}\beta$) o +. La masa atómica permanece cte. y el n° atómico aumenta en una unidad. Puede ser usada en la medic. e industria (medidor de espesores)
Beta- (la que interesa en centrales nucleares), es la emisión de un e- (resulta de la conversión de un neut en un p+ y un e-, debido a un exceso de neut en relación a los p+) acompañado de un antineutrino. La masa de un neut es ligeramente superior a la del p+ y esta diferencia de masa es igual a la masa del e- producido más su energía cinética. El resultado es un núcleo en que el exceso de neut o p+ se ha corregido en dos unidades y por tanto resulta más estable.
Beta+, es la emisión de un positrón acompañado de un neutrino.
- **Gama**, es una radiación electromagnética de alta frecuencia (alta energía). El núcleo no pierde su identidad (no varía su masa ni el n° atómico), sino que se desprende de energía que le sobra, pasando a otro estado de energía más bajo. La energía de esta radiación se puede calcular usando la siguiente expresión:

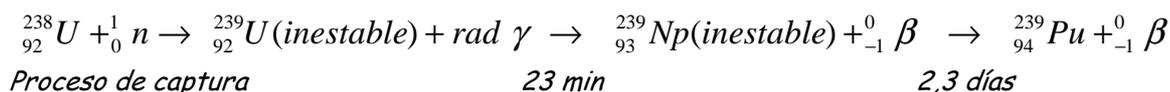
$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

h = cte de Planck λ = longitud de onda de la radiación
v = frecuencia de la radiación c = velocidad de la luz

Puede ser usada en medicina nuclear.

Esta propiedad que poseen algunos minerales de emitir espontáneamente partículas alfa, beta o rayos gamma al desintegrarse los núcleos inestables (o radiactivos) de sus átomos se llama radiactividad. En cada emisión de cada una de estas partículas (desintegración o declinación radiactiva), hay una variación del nº de p+ en el núcleo, por lo tanto el elemento se transforma o transmuta en otro elemento, que se comporta químicamente diferente. Son radiactivos todos los isótopos de los elementos con nº atómico ≥ 84 .

Ejemplo de captura y cambio radiactivo empleado para producir plutonio:



Nota: Un neutrón del ${}_{92}^{239}\text{U}$ inestable, se convierte en un p+ (permanece por lo tanto igual la masa atómica y aumenta el nº atómico) y en un e- que se emite (partícula Beta). Un neutrón del ${}_{93}^{239}\text{Np}$ inestable, se convierte en un p+ y en un e- que se emite (partícula Beta)

Según su energía, las radiaciones presentan diferentes grados de penetración (Fig.5).

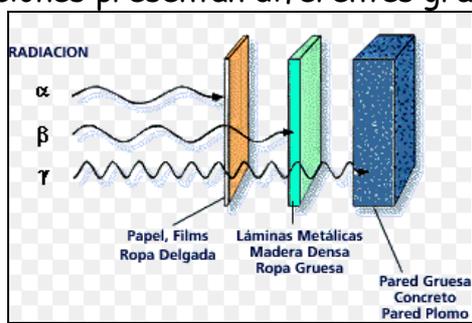


Fig. 5.- Penetración de las radiaciones

Una fuente radiactiva puede caracterizarse por el nº de partículas que emite por segundo (1 becquerel [Bq]) y por su periodo de semidesintegración. La tabla siguiente brinda estos parámetros para diferentes isótopos.

	${}^{238}\text{U}$	${}^{235}\text{U}$	${}^{239}\text{Pu}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{131}\text{I}$ (yodo)
Vida Media en [años]	$4,5 \times 10^9$	7×10^8	24000	28	0,022
Actividad de 1 gr	12000 Bq	79000 Bq	2300 MBq	5,3 TBq	4600 TBq

Nota: Período de semidesintegración o constante de semidesintegración (semivida), no debe confundirse con vida media. Es el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos de una muestra inicial de un radioisótopo (isótopo radiactivo). Se toma como referencia la mitad de ellos, debido al carácter aleatorio de la desintegración nuclear.

c) Fisión Nuclear: Un núcleo pesado al ser bombardeado con neut, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, con gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neut. En una pequeña fracción de segundo, los núcleos que se han fisionado liberan una energía un millón de veces mayor que la obtenida al quemar un bloque de carbón (tema desarrollado en punto 4).

d) Fusión Nuclear: Dos núcleos muy ligeros se unen venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión, para formar un núcleo estable más pesado, con una masa ligeramente inferior a la suma de las masas de los núcleos iniciales. Este defecto de masa da lugar a un gran desprendimiento de energía. La energía producida por el Sol tiene este origen (se necesita altísima temperatura y enorme presión). En una reacción de fusión nuclear se obtiene un átomo con distinta constitución nuclear que los átomos primitivos, como la de los isótopos de H en el Sol (ver Figura 6):

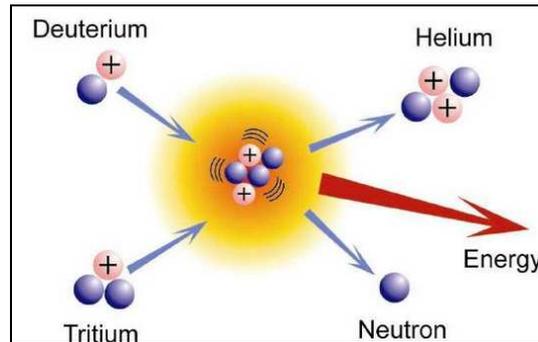
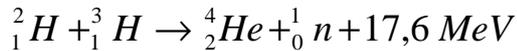


Fig. 6.- Reacción nuclear de fusión nuclear en el sol

Para crear la fusión en la Tierra, se debe contar con instalaciones muy especiales donde el isótopo de H debe interactuar en un espacio extremadamente confinado con temperaturas extremadamente altas y en funcionamiento continuo. Estas condiciones solo pudieron ser encontradas hasta ahora, durante pocos segundos. Se prevé que esta tecnología solo podrá estar comercialmente disponible recién en varias décadas.

4.- Fisión Nuclear

Los p+ pueden "convivir juntos" en el núcleo porque existe una fuerza de muy corto alcance que los mantiene unidos, llamada fuerza de enlace nuclear o directamente fuerza nuclear, que supera a la fuerza electrostática de repulsión.

La masa de un núcleo es siempre menor que la suma de las masas individuales de los p+ y neut que lo constituyen. Este defecto másico es una medida de la energía del enlace nuclear. Por lo tanto para calcular la energía nuclear que teóricamente se puede producir, se realiza la diferencia entre la masa inicial (antes de la reacción) y la masa resultante (después de la reacción) y se aplica la relación de Einstein ($E=\Delta m c^2$).

La energía que antes mantenía todo junto, ahora se libera en millonésimas de segundo, sobre todo en forma de calor (energía térmica).

El objetivo de dividir o fisionar el núcleo de un átomo en núcleos menores es entonces la liberación de la energía de enlace. Esto se logra por medio del impacto de un neut sobre un núcleo a una dada velocidad (velocidad de resonancia) para provocar su ruptura. Si no se impacta a esta velocidad, aumenta la probabilidad de captura o absorción del neutrón, con el riesgo que la reacción se apague. Es más fácil inestabilizar un núcleo de un átomo pesado (tal como el ^{235}U) formado por muchos p+, que un átomo liviano.

En la Figura 7 se observan estas dos reacciones en un núcleo del $^{235}_{92}\text{U}$

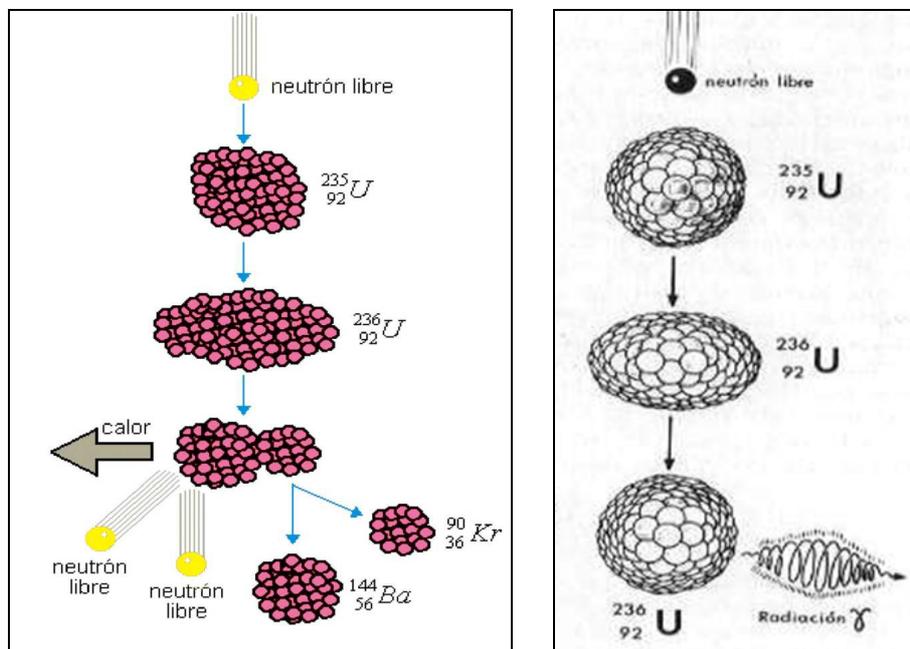
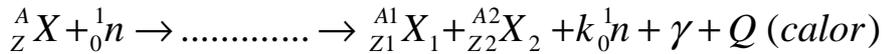


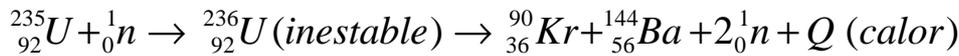
Fig. 7.- Reacción nuclear de fisión y captura

En la reacción de captura el neut es absorbido por el núcleo, formando un isótopo de U, con emisión de una onda electromagnética de alta energía (rayo gama).

En la reacción de fisión, el neut incide a una cierta velocidad sobre el núcleo del elemento X , lo inestabiliza y divide, produciendo nuevos elementos X_1 y X_2 , $p+$, calor y rayos γ :



La fisión más probable del ${}^{235}\text{U}$ es (ver Figura 7):



En esta reacción se producen 1, 2 o 3 neut rápidos (orden de 2000 km/s), a los que se les disminuye su velocidad empleando moderadores, a valores de unos 2,2 km/s (neut lentos o térmicos) y de esta manera aumentar la probabilidad de fisión. La energía desprendida en la fisión de cada núcleo de ${}^{235}\text{U}$ es en promedio de 200 MeV.

El ${}^{233}\text{U}$ y el ${}^{239}\text{Pu}$ son átomos que también pueden fisionar con neut lentos.

El ${}^{238}\text{U}$ y el ${}^{232}\text{Th}$ son átomos que pueden fisionar con neut rápidos.

Los neut libres producidos en cada fisión nuclear, van impactando sobre otros núcleos dividiéndolos y obteniéndose más neut libres que a su vez vuelven a impactar y así sucesivamente, formando lo que se llama una reacción en cadena (Figura 8).

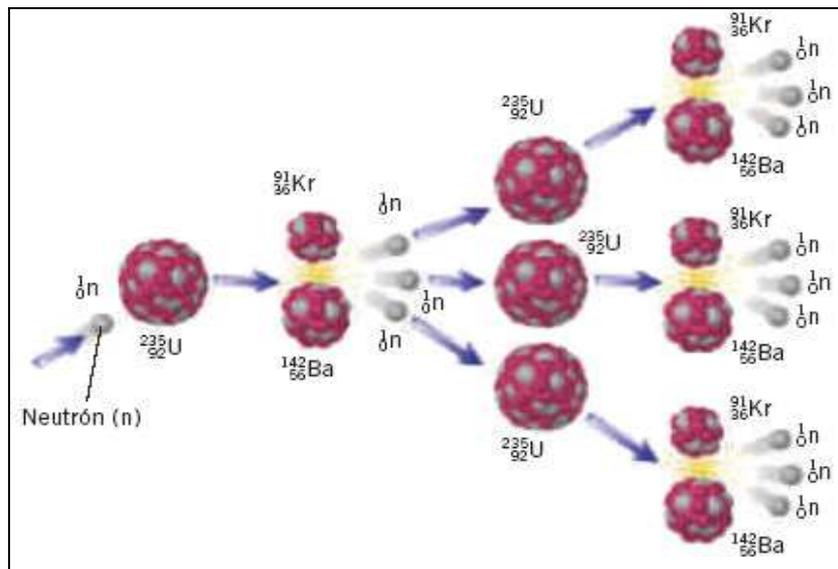


Fig. 8.- Fisión Nuclear y Reacción en Cadena

En el proceso de fisión del ${}^{235}\text{U}$ se producen \approx 25 millones de kWh/kg de comb.

Si la reacción en cadena no se controla, el resultado es una explosión nuclear. En una central nuclear lo que se controla es precisamente esta reacción. Para lograr esto, se usa solo 1 de los neut liberados para fisionar otro núcleo.

Para que se produzca la reacción en cadena es necesario que la:

- Masa del material fisionable \geq Masa crítica
- Velocidad de los neut producidos = Velocidad de resonancia del núcleo.

Masa crítica: La reacción en cadena requiere que por cada neut producido en la reacción, se disponga en promedio, de otro que origine la fisión nuclear. Un reactor con U_{235} produce en media 2,5 neut, por lo tanto hay 1,5 neut restantes que dan lugar a otras interacciones (en fn. de la composición y construcción interna del reactor) o escapan dependiendo del tamaño. Por eso cada reactor tiene un volumen crítico, donde se equilibra la absorción y las pérdidas de neut. Este volumen está asociado a una masa crítica, a un tipo de combustible y a un tipo de reactor. La masa crítica es entonces, la cantidad mínima del combustible nuclear necesario para mantener esa reacción nuclear en cadena. Depende de las propiedades físicas del combustible (densidad) y nucleares (grado de enriquecimiento y sección eficaz de fisión), forma geométrica (la mejor es una esfera) y pureza, además si cuenta o no con un reflector de neut. En el caso de una esfera desnuda (sin reflector de neut), la masa crítica para el ^{235}U es de 52 kg.

El estado de criticidad de un reactor puede dividirse en "crítica" cuando la reacción en cadena de fisión es autosostenida, en "supercrítica" cuando la producción de neut supera las pérdidas (se caracteriza por el aumento de nivel de potencia del reactor) y en "subcrítica" cuando las pérdidas dominan (se caracteriza por la disminución de potencia del reactor).

Velocidad de Resonancia: Es la velocidad de impacto de un neut contra el núcleo para que pueda ser dividido. Es distinta para cada clase de átomo.

5.- Productos de la Fisión Nuclear

➤ Energía Nuclear

La energía térmica obtenida a partir de la combustión de distintos materiales (madera, carbón, petróleo, gas) es producto de un proceso de transformación química, es decir, la energía útil se genera en función de alteraciones en la manera en que los distintos átomos se combinan para formar moléculas; no obstante la naturaleza propia de los átomos que intervienen, no experimenta modificaciones. Por lo tanto, el poder calorífico de los combustibles fósiles depende del enlace entre los átomos de sus moléculas y es fijo para cada sustancia, independiente de la tecnología que lo quema.

De forma opuesta, las reacciones nucleares establecen procesos de transformación física de los combustibles nucleares, en los cuales mediante cambios de n° de p^+ , neut, e^- y de la emisión de radiación electromagnética, se registran modificaciones en la naturaleza misma de los átomos que intervienen.

Desde el punto de vista energético, la principal diferencia existente entre las reacciones químicas y nucleares, es que en las segundas se libera velozmente una enorme cantidad de energía a partir de masas muy pequeñas. La energía térmica resultante de una reacción nuclear es $\approx 10^6$ veces más grande que una reacción química

Si bien el poder calorífico del combustible nuclear es fijo y es teóricamente conocido, en la práctica, por ejemplo para el U, depende de la relación ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) y de los materiales que lo rodean dentro del reactor.

La fisión de un núcleo de ^{235}U libera unas 200 MeV, frente a 4 eV de la combustión de un átomo de carbono. Por ejemplo 0,454 kg de U enriquecido al 3% producen la misma cantidad de energía térmica, que 45000 kg de carbón en un sistema convencional de vapor fósil (relación de $45000/0,454 \approx 10^5$).

Ocho pellets de uranio son suficientes para producir la energía que consume una casa familiar durante un año.

El combustible nuclear tiene una gran capacidad energética por unidad de masa. El consumo anual de combustible de una central nuclear estándar es de unas 25 tn de U. Para producir la misma cantidad de electricidad que esta central nuclear que consume 25 tn de U, una central térmica de carbón consume 2,5 millones de tn de carbón (relación de 10^5) y una central de gas de CC, 1700 millones de m^3 de gas natural.

Para una central de 500 MW de potencia eléctrica, en un sistema de vapor convencional, hay que usar $\approx 1.000.000$ Tn/año de carbón, mientras que en una planta nuclear sólo se precisan 10 Tn/año de combustible nuclear.

¿Cuánto consume de Uranio la central de Atucha I?

¿Cuánto consumiría de gas una central de CC de la misma potencia y Factor de Capacidad que Atucha I?

La contabilización de la producción de la Energía Nuclear, se hace a partir del combustible nuclear utilizado. De acuerdo a información suministrada por la empresa Nucleoelectrica Argentina S.A., operadora de las dos centrales nucleares en operación en el país, (Atucha I y Embalse), los poderes caloríficos son los mostrados en Tabla 1.

Tabla 1.- Poder calorífico por tipo de U y grado de enriquecimiento

Tipo de Uranio	Enriquecimiento en U235 (%)	Tipo de Central	Poder Calorífico kcal/kg
U Natural	0.71	Atucha I y II	124 000 000
U Natural	0.71	CN Embalse	151 000 000
ULE	0.85	Atucha I y II	234 000 000
U enriquecido	3.5	PWR	1 000 000 000

Poder cal. petróleo \approx 10000 kCal/kg

El poder calorífico de esta tabla se calculó en función del quemado medio de extracción de una Central Nuclear. Este quemado medio está relacionado con la porción del ^{235}U contenido en el elemento combustible que efectivamente se usó (% de átomos de ^{235}U iniciales que han fisionado).

La energía nuclear producida en [Tep] es:

$$\text{Energía Nuclear [kTep]} = (\text{UN[kg]} \times 15,100) + (\text{ULE[kg]} \times 23,400) / 1000$$

➤ **Residuos Atómicos** (se analizan en el punto 9)

Son los "residuos de la reacción", constituidos por:

- Material que puede regenerarse y aprovecharse nuevamente como material de fisión
- "Venenos atómicos" que deben retirarse periódicamente del reactor, ya que absorben los neut pudiendo parar la reacción (xenón 135, samario 149, etc.)
- Material muy radiactivo (cesio 137, estroncio 90, yodo 131, etc.)

6.- Elementos Principales de un Reactor Nuclear

Es una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena, y poseer los medios adecuados para extraer el calor generado.

Dos esquemas típicos de reactores nucleares (BWR y PWR) se muestran en la Figura 9

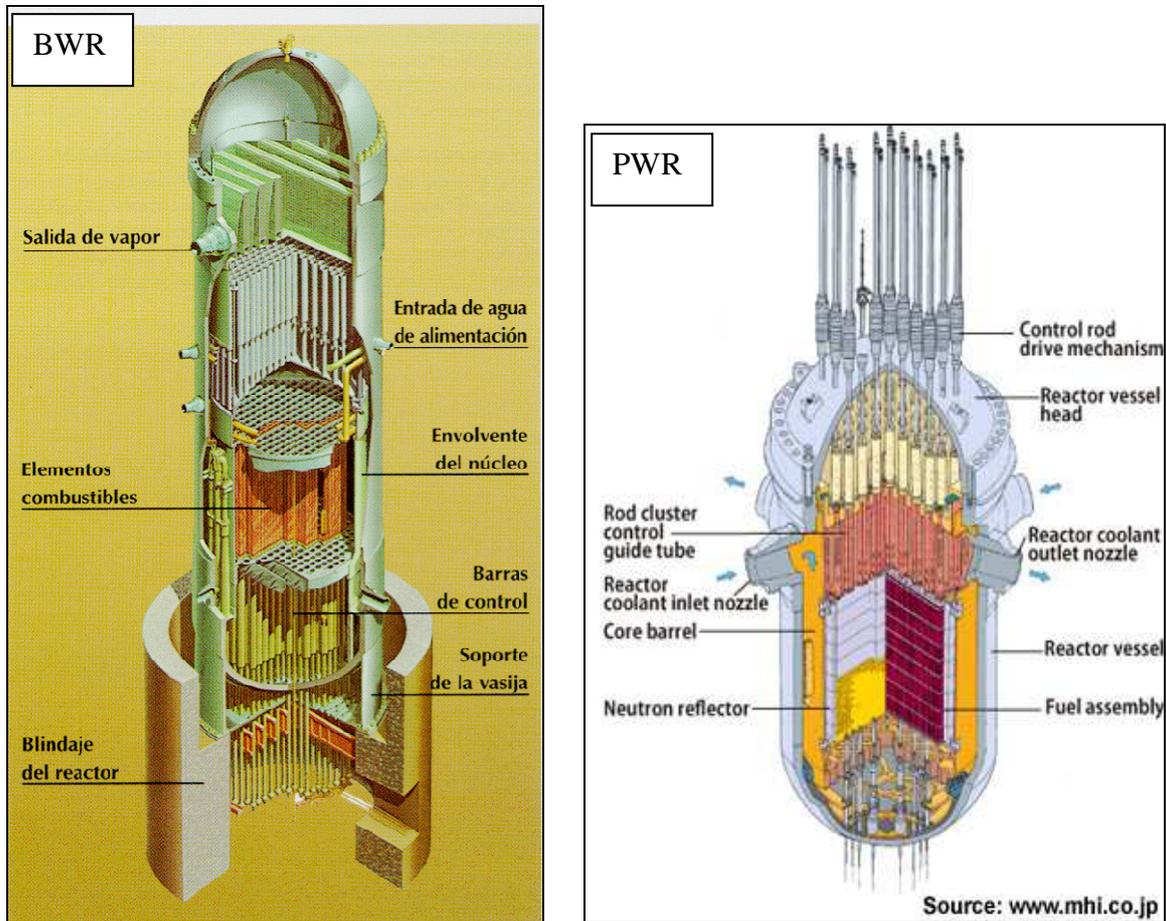


Fig.- 9 Esquema de un Reactor nuclear tipo BWR y PWR

El reactor consta fundamentalmente de los siguientes elementos:

- Combustible nuclear
- Moderador
- Elementos de control
- Refrigerante
- Reflector
- Blindaje

a) Combustible Nuclear

Los tres combustibles nucleares fisionables son el ^{235}U , ^{239}Pu y ^{233}U . El ^{235}U se encuentra disponible en cierta cantidad en la naturaleza, mientras que el ^{239}Pu se encuentra en muy pequeña cantidad, por lo que se lo produce artificialmente en reactores de cría, por procesos de captura y cambio radiactivo a partir del ^{238}U . El ^{233}U se produce a partir del ^{232}Th .

El ^{235}U puede ser dividido por neut de cualquier energía cinética (sobre todo por los de baja energía, es decir neut térmicos o lentos). Es el isótopo que más se usa como combustible en las centrales nucleares.

Si bien el ^{238}U es fisible por neut rápidos, se lo usa sobre todo como material fértil o reproductor, para obtener por transmutación y dentro de un reactor nuclear, el ^{239}Pu , como se puede ver en la siguiente reacción (ya vista en el punto 3):

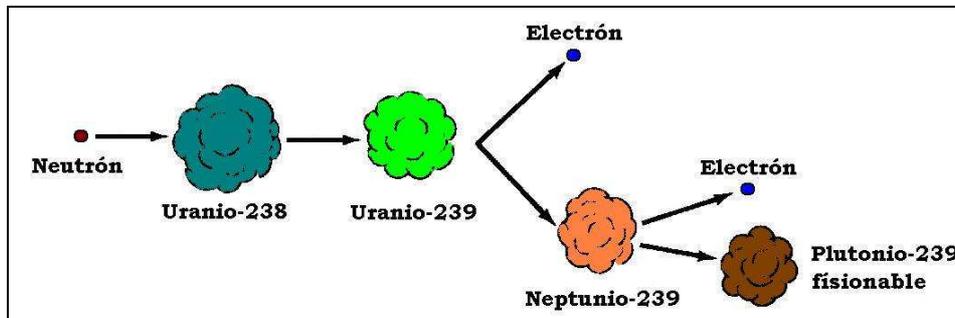
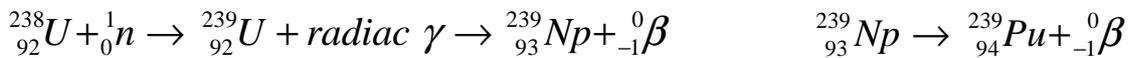


Fig. 10.- Formación de Plutonio a partir de ^{238}U

En el tiempo, el U decae muy lentamente emitiendo una partícula alfa. Para medirlo se usa el período de semidesintegración, que es el período de tiempo en que la mitad de los átomos decaerá, para cualquier muestra que se tome. El del ^{238}U es aproximadamente de 4.470 millones de años (se estabiliza como ^{206}Pb) y el del ^{235}U es 704 millones de años (se estabiliza como ^{207}Pb). De esta forma se puede deducir porque hay tan poco ^{235}U en relación al ^{238}U .

Fabricación del combustible nuclear: El uranio natural (UN) se encuentra en muchos tipos de rocas mezclado con otros minerales (mineral de uranio), por lo que es necesario realizar procesos mecánicos-químicos para concentrarlo y purificarlo (se podrían extraer tan solo unos 500 g a 10 kg de UN, por tn de mineral procesado). La uraninita pechblenda es el mineral con concentración económica de U de mayor relevancia en la naturaleza. Para obtener el combustible nuclear que se introduce en el reactor, se realizan los siguientes pasos (Figura 11):

- a) A partir del mineral uranífero que contiene de 0,1 a 2% de U_3O_8 y mediante un tratamiento con métodos hidrometalúrgicos, se produce el concentrado comercial de U_3O_8 , conocido internacionalmente como yellow cake (torta amarilla). El % restante está compuesto por impurezas propias del mineral y reactivos químicos usados en la concentración y recuperación de dicho elemento.
- b) Se purifica esta torta, es decir se elimina la mayoría de sus impurezas para reducir los elementos absorbedores de neut el reactor. Si ahora se la procesa directamente, se obtendrá polvo de dióxido de uranio natural (UO_2). Si antes de procesarla se procede a enriquecerla, se obtendrá polvo de UO_2 enriquecido. El U levemente enriquecido contiene $\approx 0,9\%$ de ^{235}U (combustible del reactor PHWR Atucha I y II), el U enriquecido posee $\approx 3,5\%$ de ^{235}U (combustible para un reactor tipo BWR y PWR).
- c) A partir del polvo de UO_2 (sea natural o enriquecido) se fabrican pastillas sinterizadas (pellets de óxido cerámico para resistir altas Temp.) mediante técnicas pulvimetalúrgicas.

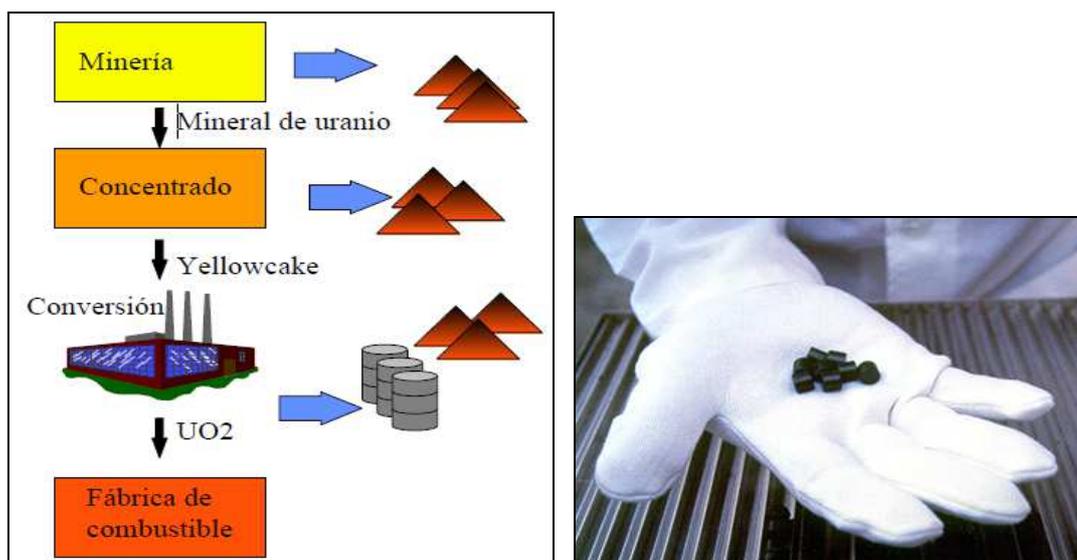


Fig. 11.- Proceso que va del mineral a la pastilla de combustible

Estos pellets son introducidos en tubos metálicos, llamadas vainas (≈ 1 cm de diámetro), que se cierran mediante tapones soldados en sus extremos, constituyendo una barra de combustible perfectamente estanca. Estas se agrupan formando haces de 100 a 400 barras de combustibles por haz. Un núcleo de un reactor nuclear contiene varios cientos de haces (Figura 12). Esta disposición facilita su carga y descarga del reactor y al mismo tiempo mantiene una distancia óptima (por razones neutrónicas) entre las barras y asegura el paso del agua refrigerante.

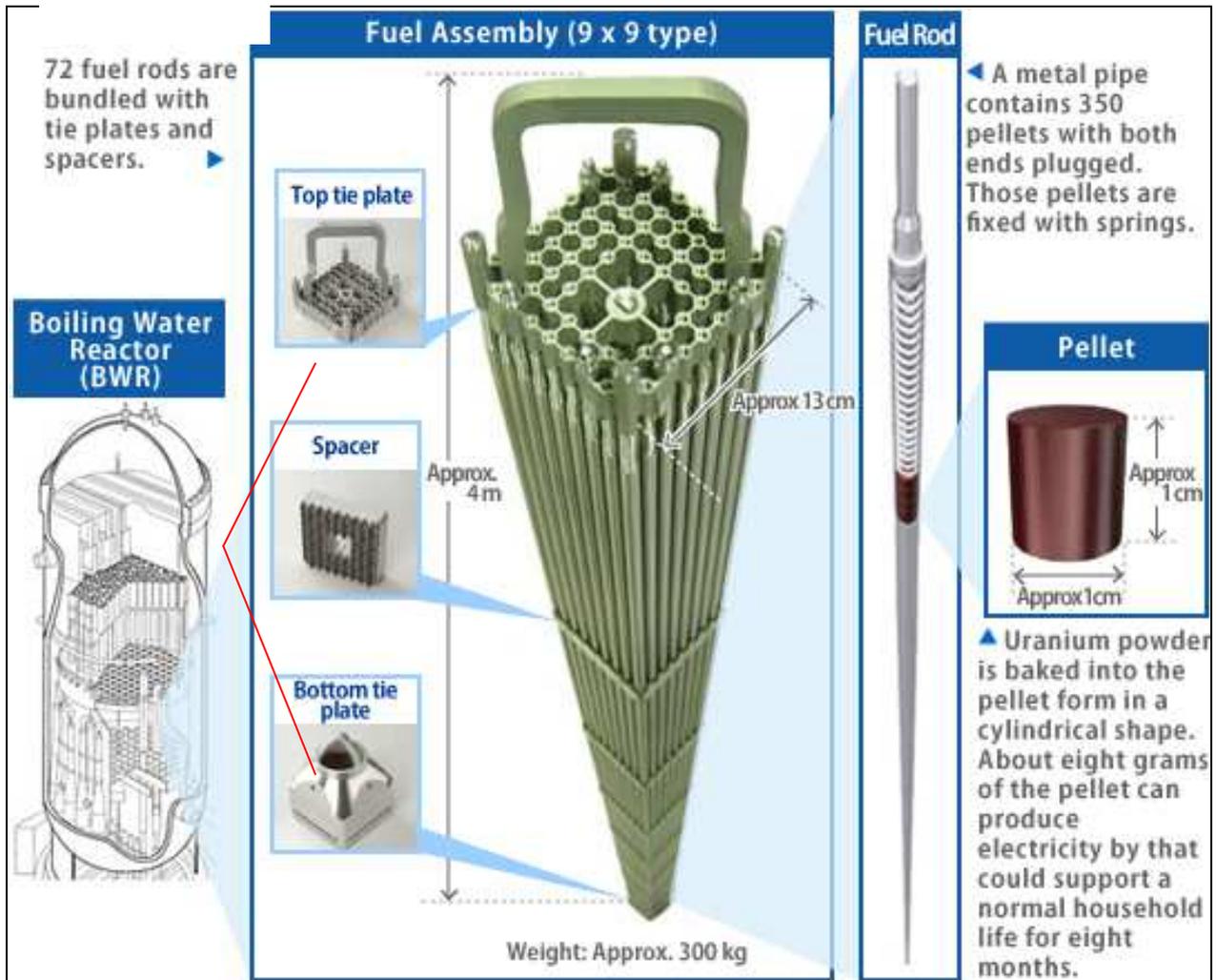


Fig. 12.- Ensamble del combustible nuclear: Barra (Fuel rod) y Haz (Fuel assembly)

La barra de combustible debe dar rigidez al conjunto, retener en su interior los productos de fisión gaseosos para impedir la contaminación del refrigerante y evitar la reacción de éste último con el combustible a alta temperatura. Para su fabricación, se seleccionan materiales o aleaciones con excelentes características mecánicas y de resistencia a la corrosión, elevada conductividad del calor y pequeñas secciones eficaces de absorción de neutrones, como por ejemplo el zircaloy (aleación de circonio con trazas de estaño, hierro, cromo y níquel).

Los haces de combustible para reactores tipo CANDU miden alrededor de medio metro de largo y 10 cm de diámetro y se muestran en la Figura 13.



Fig. 13.- Haz de combustible para un reactor tipo CANDU

Cada haz pesa alrededor de 20 kg y el núcleo de un reactor puede llegar a contener unos 4.500 haces. Los diseños actuales del CANDU no necesitan U enriquecido para alcanzar el punto crítico.

En nuestro país existe una sociedad anónima estatal encargada de garantizar el suministro del UO_2 a las CN:

<http://www.dioxitek.com.ar>

(b) Moderador

Los neut producidos en una reacción nuclear pueden clasificarse según su velocidad:

- Neut rápidos o de alta velocidad (de hasta 2000 km/s) son aquellos producidos durante la fisión nuclear. Los neut de unos 8000 km/s provocan algunas fisiones en los núcleos de ^{238}U y otros son capturados formando ^{239}U .
- Neut lentos o térmicos: Son neut con una energía cinética de ≈ 0.025 eV (de aquí se deduce que su velocidad es de 2.2 km/s) que es la energía correspondiente a la velocidad más probable a la temp de 290°K (modo de la distribución de Maxwell-Boltzmann para esta temperatura). Estos neut producen la fisión de núcleos de ^{235}U y muy pocas en el ^{238}U que en general los captura (^{239}U).
- Neut de muy baja veloc. El neut será capturado o escapará, pero no causará fisión.

El moderador tiene como objetivo disminuir la velocidad de los neut rápidos a neut lentos o térmicos, para aumentar la probabilidad que produzcan fisión. El proceso de retraso o de moderación, es una secuencia de colisiones elásticas entre las partículas de alta velocidad (neut) y las partículas prácticamente en reposo (núcleos atómicos). Como consecuencia de los sucesivos choques el neut va perdiendo velocidad en forma gradual, desde unos 2000 km/s (neut rápidos) a unos 2,2 km/s (neut térmicos). Cuanto más parecidas sean las masas del neut y el núcleo, mayor es la pérdida de energía cinética del neut. Por lo tanto, los elementos ligeros (tales como el H) de baja o nula tendencia a capturar neut, serán los moderadores más eficaces.

La mayoría de los reactores actuales son del tipo térmico y utilizan un moderador para frenar los neutrones producidos en la fisión nuclear. Los moderadores aumentan la Sección Transversal de fisión (se la define en la próxima hoja) en aquellos núcleos fisionables, tales como el ^{235}U y el ^{239}Pu . En cambio el ^{238}U presenta una ST de captura de neutrones térmicos mucho más baja, permitiendo por lo tanto contar con neutrones para provocar la fisión de los núcleos fisionables y propagar así la reacción en cadena.

Entre los moderadores más usados se encuentran:

- *Agua ligera*: posee buenas propiedades elásticas, frenando los neutrones rápidos, pero también capturando muchos de éstos. Por lo tanto, solo puede usarse en reactores nucleares de U enriquecido, donde se puede admitir la pérdida de neutrones rápidos. No se puede usar en cambio en reactores de U natural, ya que en los mismos es necesario aprovechar el máximo número de neutrones posible.
- *Agua pesada*: Está formada por dos átomos de deuterio y uno de O. Presenta casi las mismas propiedades físicas, termodinámicas y químicas que el agua ligera, pero se diferencia fundamentalmente en sus propiedades nucleares, por ejemplo casi no absorbe neutrones (unas 70 veces menos que el agua ligera), por lo que está indicada para usarse en reactores con UN. El agua pesada es más cara que la liviana y se requiere de 8 a 10 Tn en un reactor mediano. Las centrales nucleares de Argentina, Atucha I, II y Embalse usan UN y U levemente enriquecido como combustible y agua pesada como moderador. Existe una planta de producción de agua pesada en Arroyito, Neuquén.
- *Grafito*: Es carbono puro y se encuentra disponible en el mercado a buen precio, aunque su poder moderador es unas 4 veces inferior al del agua pesada, resultando un reactor de mayor volumen. Es estable térmicamente, pero a temperaturas elevadas puede reaccionar con el O_2 en el reactor, disminuyendo la eficiencia de la operación. También se pueden formar carburos después de reaccionar con algunos metales y óxidos. A pesar de no ser un metal, el grafito es buen conductor del calor, propiedad importante de los moderadores de neutrones. Los inconvenientes fundamentales es la posibilidad de oxidación en presencia de aire, baja resistencia y baja densidad. Sus dimensiones pueden cambiar bajo la influencia de las radiaciones en el reactor.

¿Por qué se usa agua pesada como moderador, en un reactor con combustible de UN?

En un reactor nuclear compite la generación de neutrones (obtenidos de las fisiones) con las pérdidas de neutrones (absorciones y escapes de neutrones). Si se quiere usar entonces el UN como combustible, se dispondrá de muy poco ^{235}U (0,7%) y se generarán pocos neutrones, por lo que habrá que reducir al máximo posible las pérdidas de neutrones. Por esta razón se usa como moderador el agua pesada, ya que captura menos neutrones que el agua liviana. Si el combustible es U enriquecido (3,5%), la cantidad de fisiones y el número de neutrones obtenido es mayor, por lo que se puede usar agua liviana o pesada (se usa agua liviana, que es más barata).

Esto se puede analizar también, usando el concepto de Sección Transversal (ST), que es una cierta probabilidad de ocurrencia de algún evento de dispersión o absorción (a mayor ST, mayor probabilidad). Dos ST son importantes:

- *ST de neut:* expresa la probabilidad de interacción entre un neutrón incidente y un núcleo atómico que es su blanco
- *ST de absorción o captura de neut:* expresa la probabilidad que un neut sea capturado o absorbido por un núcleo. Depende fundamentalmente de la energía del neut y en menor proporción de la energía térmica del núcleo a medida que aumentan las temperaturas. En particular, el ^{238}U aumenta su capacidad de absorber neut a temperaturas más altas, sin fisiónar, por lo que es un mecanismo de retroalimentación negativa que ayuda a mantener bajo control los reactores nucleares.

Los reactores moderados con agua pesada o grafito pueden utilizar como combustible UN, porque estos moderadores tienen ST de captura de neut mucho más bajas que los de agua ligera.

En combustibles altamente enriquecidos (superiores al 20%) no es necesario el moderador, porque la contribución del ^{235}U es superior al grado de captura del ^{238}U . Con este tipo de combustible se puede armar un reactor rápido (tiene menor tamaño que el térmico) basado en neut rápidos (energía alta, superior a 0,1 MeV).

(c) Elementos de Control

Un reactor nuclear funciona si su reactividad está por encima de su valor crítico*. Esto se logra controlando la relación de neut producidos y perdidos. Algunos elementos químicos como el boro y cadmio, tienen la propiedad de absorber neut porque sus núcleos pueden contener un n° de neut superiores al existente en su estado natural, resultando isótopos de boro y de cadmio.

En los reactores se accionan sistemas de control independientes y/o simultáneos:

- Disolución en el moderador de un absorbente de neutrones (ácido bórico). El control es lento.
- Introducción de barras de control (boro, cadmio). El control es rápido (del orden del segundo). Se introducen estas barras por unas guías entre las vainas del combustible y de esta forma absorben neut, deteniendo la reacción dentro del reactor nuclear en caso de accidente o de mantenimiento (Figura 14).

*Críticidad es la condición existente cuando el n° de neut producidos por la fisión coincide con el n° de neut absorbidos (por materiales fisibles y no fisibles) y fugados del reactor. Un reactor es crítico cuando se establece en él una reacción nuclear en cadena autosostenida (constante de multiplicación neutrónica igual a 1.0).

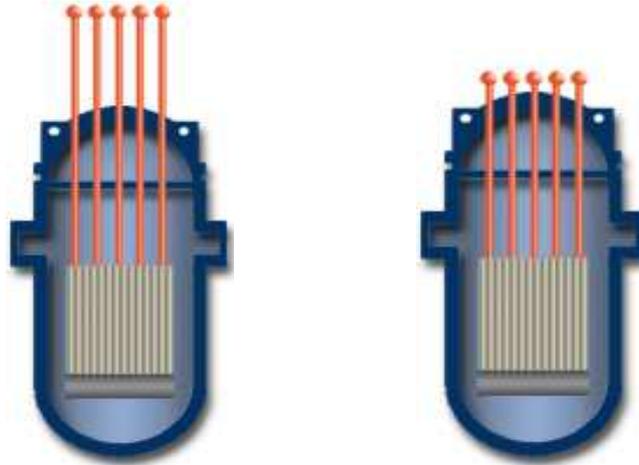


Fig. 14.- Reactor a su máxima potencia y Reactor parado

En la Figura 15 puede observarse como se produce la reacción nuclear cuando las barras de control se encuentran sin actuar. Los neutrones atraviesan sin problema las varillas de combustibles cuyo material es de zirconio y su velocidad es reducida por el moderador (en azul), aumentando de esta manera la probabilidad de fisión. Cuando se introducen las barras de control, estas absorben los neutrones, deteniendo la reacción.

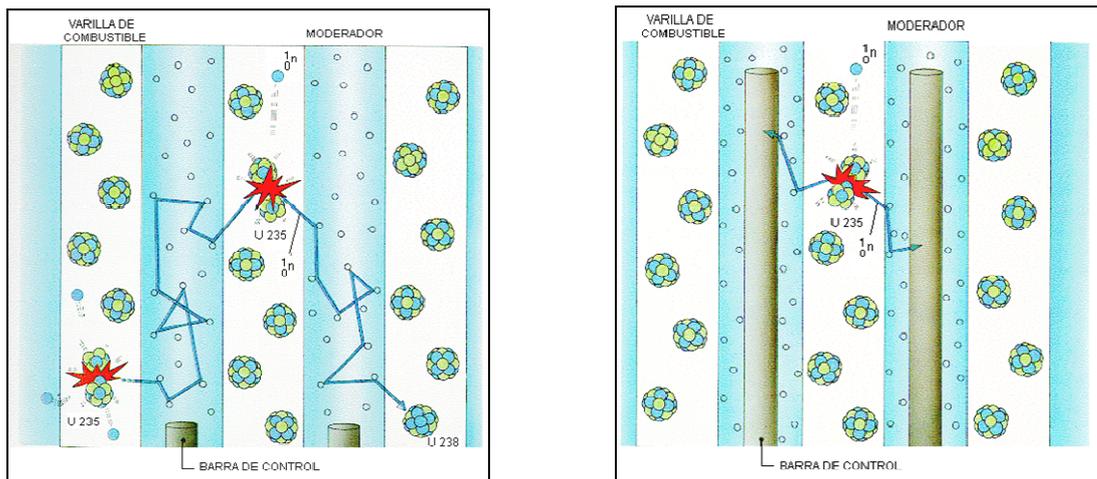


Fig. 15.- Control de la reacción por medio de barras

(d) Refrigerante

Los materiales refrigerantes transportan la energía térmica producida en el reactor y además refrigeran el reactor, evitando sobrecalentamiento del mismo. Generalmente se usan refrigerantes líquidos, como el agua ligera, el agua pesada o gases como el anhídrido carbónico y el helio o metálicos de bajo punto de fusión como el sodio.

Si bien la inserción completa de las barras de control detiene efectivamente la reacción en cadena, el combustible nuclear continúa generando Calor por Decaimiento Radiactivo (CDR), elevando peligrosamente la temp en pocas horas. El calor residual de un reactor BWR puede hacer hervir ≈ 300 tn de agua por día luego de estar parado una semana sin sistema de refrigeración. Para parar realmente una planta nuclear, se requiere por lo tanto de un enfriamiento activo por un período de días. Si la refrigeración falla luego de parar el reactor (como sucedió en el accidente de

Fukushima), este puede sobrecalentarse hasta temperaturas por encima de los 2200 °C, posibilitando la fusión parcial o total del núcleo. A esta temp. reacciona el zirconio de las barras de combustible con el agua, produciendo hidrógeno que puede explotar.

Nota: El CDR es el calor producido por la emisión de radiación alfa, beta y/o gamma de ciertos materiales. Se produce en la Tierra de manera natural por la descomposición de radioisótopos de larga duración que están presentes desde el inicio de la Tierra (origen de la energía geotérmica). En un reactor nuclear el CDR se genera durante un tiempo relativamente corto después que se detiene la fisión nuclear en cadena, siendo el principal foco de calor la radiación beta, proveniente de los nuevos elementos radiactivos producidos en el proceso de fisión. Cuantitativamente, en el momento de la parada del reactor, el CDR es todavía del 6,5% de la potencia del reactor, luego de 1 hora será de $\approx 1,5\%$, después de un día de $\approx 0,4\%$ y después de una semana $\approx 0,2\%$. Debido a la presencia de radioisótopos en los residuos nucleares, se continúa produciendo el CDR en las barras del combustible gastado, y se requiere que permanezcan como mínimo un año (típicamente de 10 a 20 años) en una piscina de agua, antes de su procesamiento futuro.

(e) Reflector

Es un elemento que refleja los neutrones producidos en la fisión, hacia dentro del reactor, evitando su escape, mejorando la economía del combustible nuclear. Los materiales usados deben tener baja absorción de neutrones y alta reflexión, tales como el agua liviana y pesada, grafito, berilio, plomo, acero.

(f) Blindaje

Cuando un reactor nuclear está en operación, produce todas las formas de radiación atómica. Los rayos α y β emitidos tienen relativamente poco poder de penetración y no causan grandes problemas, pero los rayos γ y los neutrones tienen un gran poder de penetración. La radiación producida es unas 10^{12} veces más grande que el nivel de radiación que una persona puede tolerar en un corto tiempo.

Por esta razón se necesita de un sistema de seguridad (blindaje) que evite el escape de radiación γ y de neutrones y asegure resistencia material frente a impactos (Figura 16).

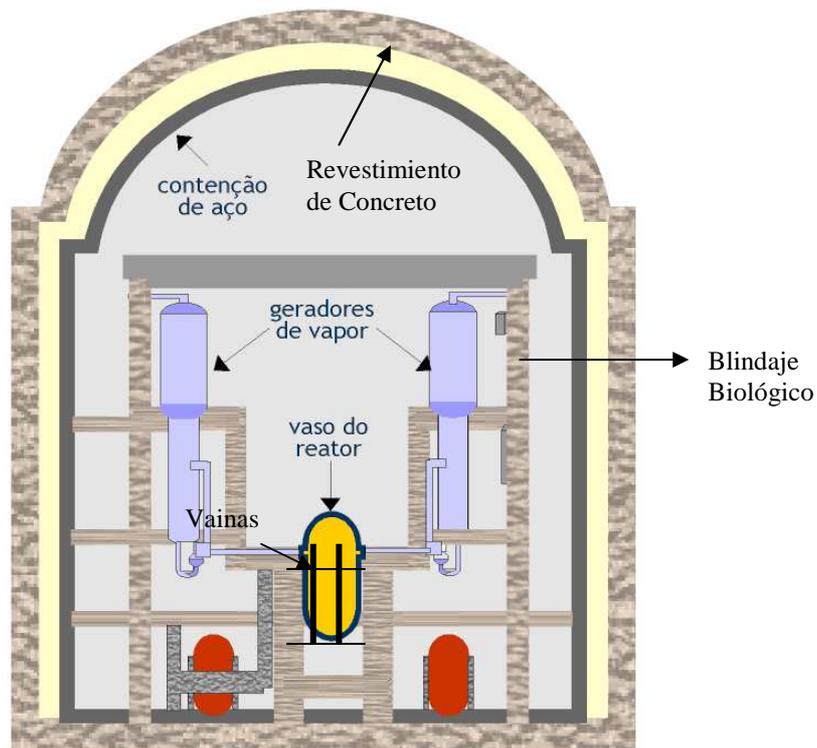


Fig. 16.- Blindaje de una central nuclear

El blindaje está compuesto de diferentes barreras físicas:

1a- Material cerámico que recubre el Uranio utilizado como elemento combustible.

2a- Vaina que alberga el combustible (zircaloy).

3a- Vasija del reactor, construida de un acero especial con un revestimiento interior de acero inoxidable (22 cm de espesor en Atucha I). Está montada sobre una estructura de concreto de hasta unos 5 m de espesor en la base.

4a- Blindaje biológico que rodea al reactor y a los equipos auxiliares, constituido por un muro de hormigón armado de más de 1,5 m de espesor.

5a- Recinto de contención, estructura esférica de acero de unos 3-4 cm de espesor y unos 50 m de diámetro.

6a- Revestimiento de concreto de hasta 1 m de espesor, por encima de la 5ª barrera. Se utiliza para prevenir posibles escapes de productos radiactivos al exterior, resistir fuertes impactos internos o externos (caídas de aviones, explosiones), soportar grandes variaciones de presión, grandes terremotos y mantener una ligera depresión en su interior que asegure una entrada constante de aire desde el exterior y evitar cualquier escape de material activado.