

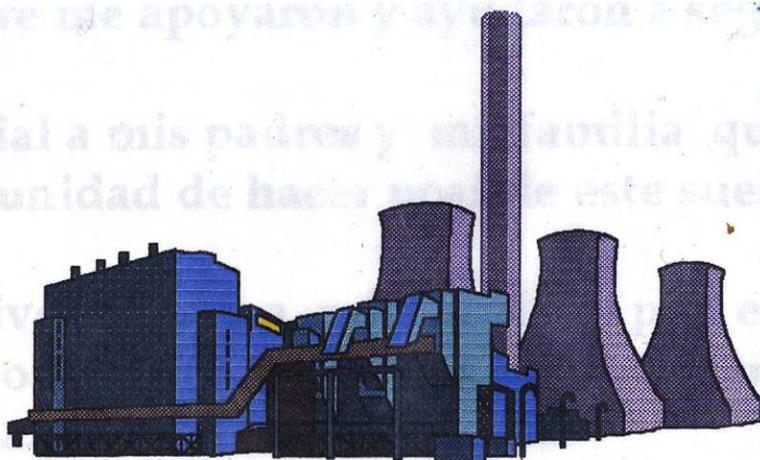
14586  
M. B. 1000

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica**



BIBLIOTECA



**Centrales Nucleoeléctricas**

**Javier Cabello Cisneros**

at. 524534

M.E.

**Ing. Cástulo Vela**

**Ing. Vicente Cantú**

T

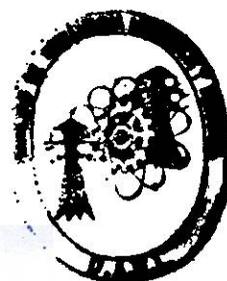
TK1360

C334

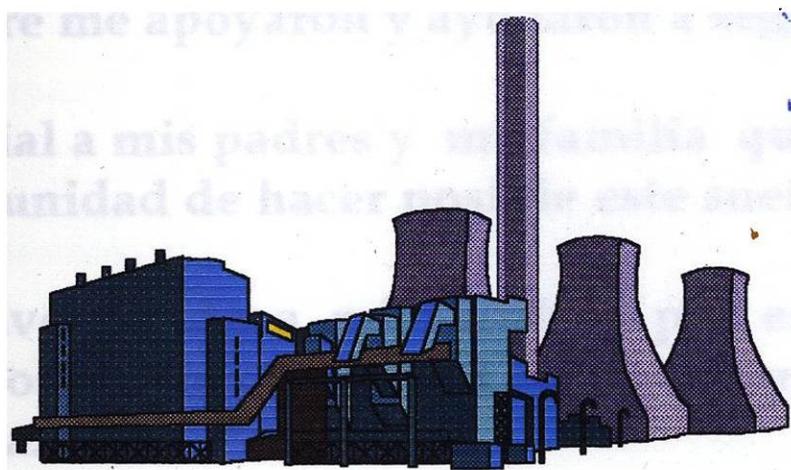
C.1

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica**



**BIBLIOTECA**

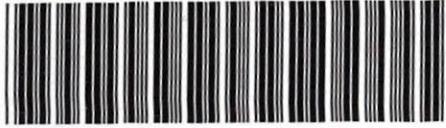


## **Centrales Nucleoeléctricas**

**Javier Cabello Cisneros**  
**Mat. 524534**  
**I.M.E.**

**Ing. Cástulo Vela**  
**Ing. Vicente Cantú**

T  
+ K 1340  
C 334



1080087033

BMU Raci Rongel F...  
UANL  
FONDO  
TESIS  
BURAGI  
UA  
TESIS LICENCIATURA

## **Dedicatoria:**

**Agradesco a todos mis maestros, compañeros y amigos que siempre me apoyaron y ayudaron a seguir adelante.**

**En especial a mis padres y mi familia que me dió la gran oportunidad de hacer posible este sueño.**

**A mi Universidad y a mi Facultad por esos años tan maravillosos que me dieron. Las llevaré en mi corazón toda la vida.**

**Atentamente**

**Javier Cabello Cisneros**

(9041)

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE FISICA NUCLEAR

### INTRODUCCION.-

Todos sabemos como funciona una central termoeléctrica: se aprovecha la combustión del carbón para hervir el agua que, a su vez, producirá vapor - este vapor, introducido a presión en la turbina, acciona las paletas de la misma de forma muy parecida a la acción del viento sobre las aspas de un molino. Esquemáticamente, una central térmica puede representarse como se muestra en la figura 440, consta de los siguientes elementos.

- 1.- Un depósito de combustible.
- 2.- Un hogar u horno donde se realiza la combustión, con los distintos dispositivos necesarios para regular esta combustión (por ejemplo, controlando el paso de aire).
- 3.- Una caldera o cualquier otro medio donde calentar el agua fría, convirtiéndola en vapor de agua a presión.
- 4.- Un grupo turbina-generador para la producción de energía eléctrica.
- 5.- Un condensador, para el enfriamiento del agua (o en otros casos del vapor), proceden de la turbina.
- 6.- Una bomba de recirculación, que inyecta nuevamente el agua sobre la caldera.

En una central nuclear, el combustible es, principalmente, uranio y se aprovecha el calor generado al romper o fisiónar los átomos constituyentes de dicho material. En la figura 441 se han representado esquemáticamente los elementos que constituyen una central de esta clase; estos son:

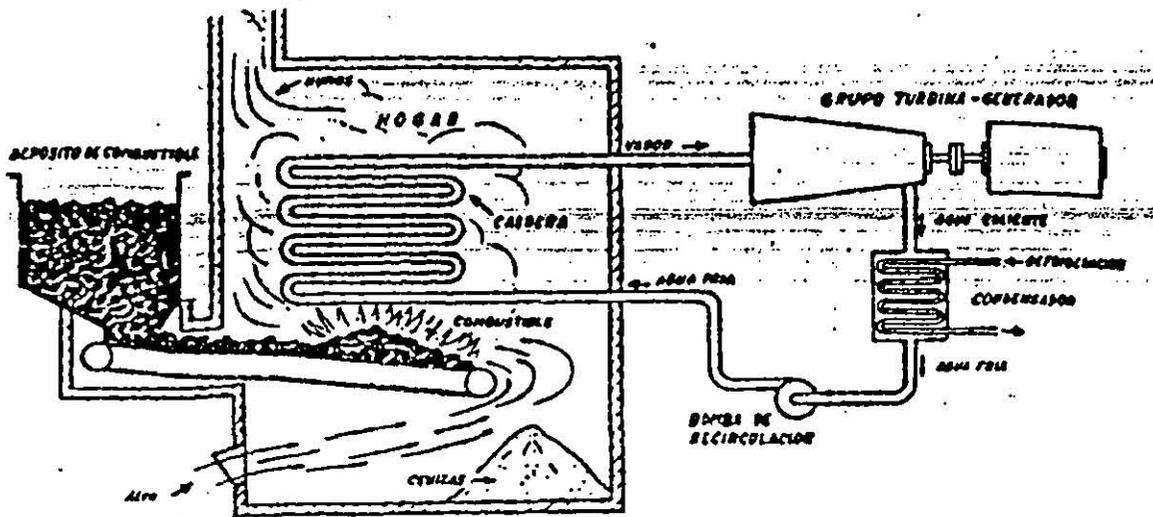


Fig. 440.- Representación esquemática de una central térmica convencional.

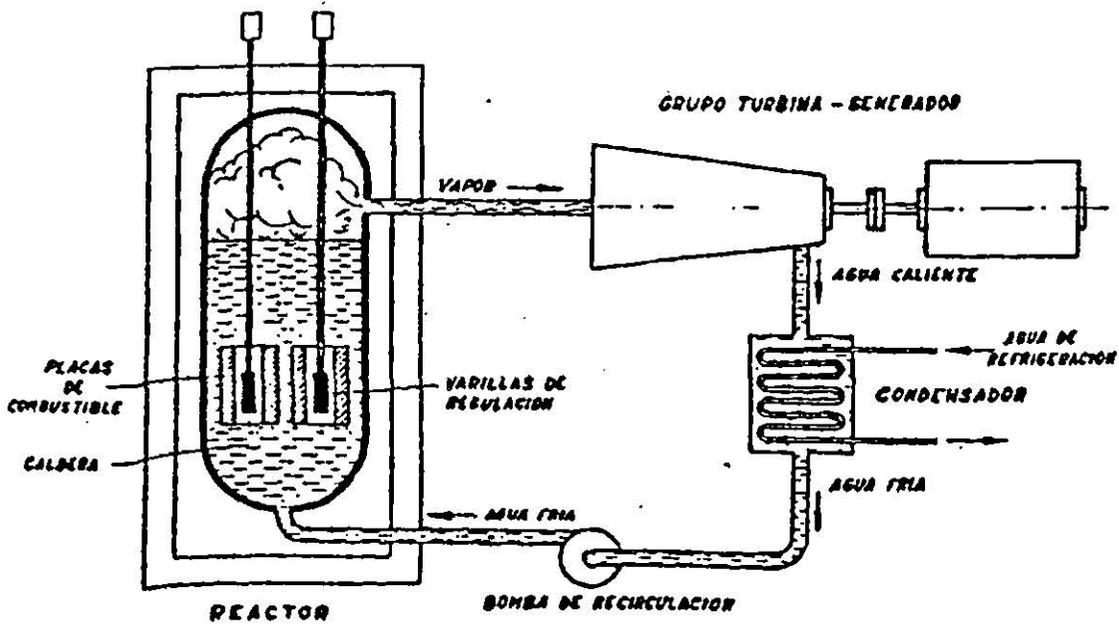


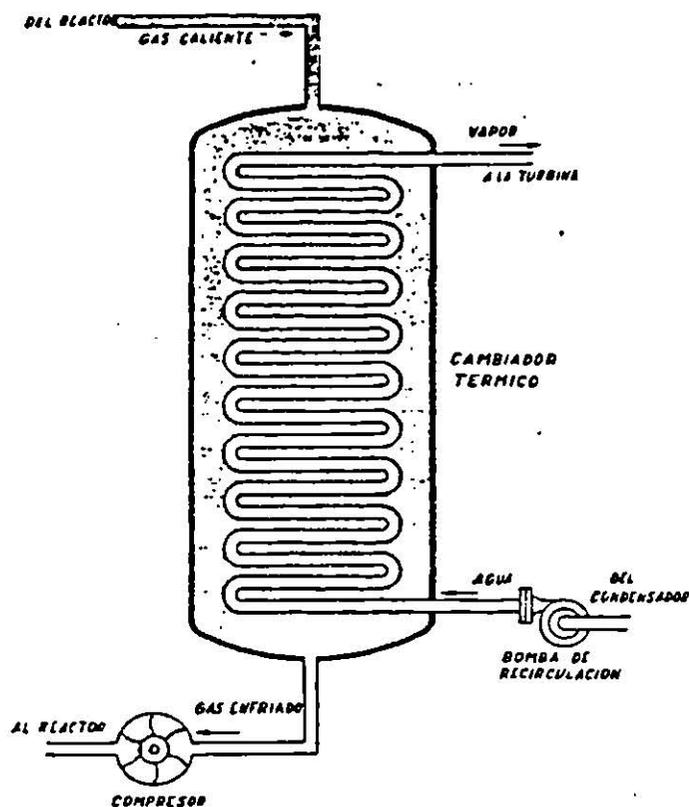
Fig. 441.- Representación esquemática de una central nuclear.

- 1.- Un depósito de combustible constituido por placas de uranio o de otro material fusionable.
- 2.- Un hogar u horno donde se realiza la combustión. En las centrales nucleares, el hogar se denomina reactor. Como en el caso de las centrales térmicas, este hogar va provisto de los correspondientes dispositivos de regulación de la combustión; en nuestro caso, varillas de boro o de otro material análogo.
- 3.- Una caldera donde calentar el agua fría convirtiéndola en vapor. En los reactores llamados "de agua hirviendo" el vapor se origina directamente en el reactor. En otros tipos de reactores (figura 442), el agua pasa por un serpentín, rodeado de un agente (anhídrido carbónico, helio, sodio líquido, etc.) a alta temperatura, que procede del reactor, y que se denomina refrigerante. El dispositivo donde se realiza el intercambio de calor, se denomina, en general, cambiador de calor o combinador térmico.
- 4.- Un grupo turbina-generado.
- 5.- Un condensador.
- 6.- Un bomba de recirculación de agua.

Por lo tanto, los apartador 4, 5 y 6 son los mismos si se trata de una central térmica, que si nos referimos a una central nuclear.

### *CONSTITUCION ATOMICA DE LA MATERIA.-*

Aún no hace muchos años, se creía que la materia estaba constituida por unas diminutas partículas denominadas moléculas, formadas, a su vez, por otras partículas todavía más pequeñas, llamadas átomos. Las moléculas podían estar formadas por uno, dos, tres ó más átomos; también se sabía que las moléculas podían descomponerse en sus átomos individuales.



**Fig. 442.- Cambiador térmico.**

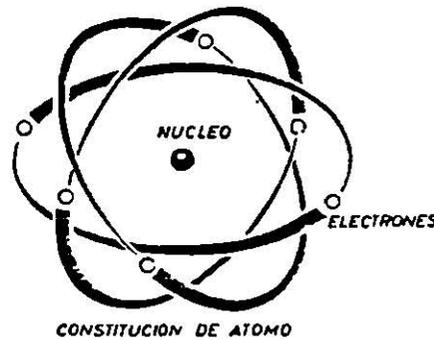
Pero, además, se decía que no era posible dividir los átomos en unidades aún más pequeñas, y se daba por sentado que los átomos eran partículas indivisibles de la materia. Primeramente, se imaginó el átomo como una diminuta esferilla sólida; posteriormente, se pudo comprobar que esta constituido por partículas aún más pequeñas.

Algunas de las ideas expuestas son válidas todavía. Pero, contra lo que se creía hasta no hace mucho tiempo, el átomo puede romperse o, dicho en términos científicos, fisionarse, resultando partículas libres aún más pequeñas. La energía desarrollada al fisionarse los átomos, es la energía atómica que, inmediatamente se transforma en calor o energía térmica. Y esta energía térmica es la que aprovechamos en las centrales nucleares. Pero sigamos con nuestra exposición.

Ahora se sabe que el átomo puede considerarse como un sistema solar en miniatura (figura 443). En el centro tiene un núcleo, que corresponde al sol de nuestro sistema planetario; y alrededor de este núcleo giran

unas partículas pequeñísimas, denominadas electrones y que vienen a ser como los planetas de este diminuto sistema solar; como ellos, los electrones giran alrededor del núcleo, describiendo las órbitas correspondientes.

Los electrones tienen carga eléctrica, y esta carga, como saben todos los electricistas, es negativa: recuérdese este detalle, pues enseguida haremos referencia a él.



**Fig. 443.- Constitución del átomo.**

El núcleo, por su parte, está también constituido por dos clases de partículas denominadas respectivamente protones y neutrones. Los protones tienen también carga eléctrica, pero positiva. Los neutrones tienen carga eléctrica propiedad de muchísimo interés como veremos adelante, pues gracias a ella se facilita extraordinariamente la fisión de los átomos.

Casi todos los cuerpos que conocemos son neutrones, es decir, no tienen carga eléctrica. Lo cual quiere decir que sus átomos constituyentes son también neutrones; o sea que las cargas eléctricas positivas de cada átomo están equilibradas. En resumen, que el número de protones del núcleo (carga positiva) es igual al número de electrones que giran alrededor de dicho núcleo (cargas negativas).

Solamente cuando se rompe el equilibrio (por ejemplo, por pérdidas de un electrón exterior o por captura de un electrón extraño), el cuerpo se vuelve buen conductor de la electricidad y adquiere carga eléctrica positiva (pérdidas de electrones o negativa (captura de electrones).

Por lo tanto, y de acuerdo con lo dicho, las fuerzas electrostáticas producidas por las cargas eléctricas positivas y negativas, mantienen el átomo unido, de forma muy parecida a como la fuerza de la gravitación mantiene a los planetas en sus órbitas alrededor del Sol. En cuanto a la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidas las partículas que constituyen el núcleo (protones y neutrones), aún no se conoce exactamente; pero sí se sabe que estas fuerzas son un millón de veces más intensas que las fuerzas que mantienen unidos unos átomos con otros; ahora, no parecerá tan extraño que, hasta hace pocos años, no se hubiera conseguido fisiónar el núcleo atómico, venciendo las enormes fuerzas que hacen posible la cohesión nuclear. Tampoco parecerá extraño que la energía liberada al romper un núcleo atómico, o energía nuclear sea fabulosa, puesto que procede de fuerzas también fabulosas.

Inciso: Hasta ahora, hemos hablado de energía atómica, producida al fisiónarse el átomo y de energía nuclear producida al fisiónarse el núcleo del átomo. La distinción es obvia y naturalmente, la energía nuclear es una parte de la energía nuclear es una parte de la energía atómica y está comprendida dentro de ella. La energía producida en las centrales nucleares es, naturalmente, energía nuclear.

Después de este inciso, volvamos a nuestra explicación. Todas las materias, todos los cuerpos que podemos conocer, están constituidos exclusivamente por los tres tipos de partículas atómicas, que hemos reseñado: neutrones, protones y electrones. La diferencia que hay entre unos cuerpos y otros (entre el hierro y la madera, por ejemplo) estriba en el número de partículas de cada clase que existen en sus átomos constituyentes. Nos explicaremos mejor con algunos ejemplos, advirtiendo que, aunque las órbitas electrónicas son espaciales y aproximadamente elípticas, nosotros, para simplificar la explicación las supondremos de forma circular y situadas en un plano.

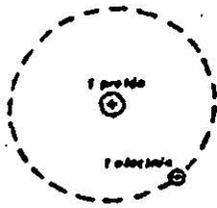


Fig. 444.- Atomo de hidrógeno

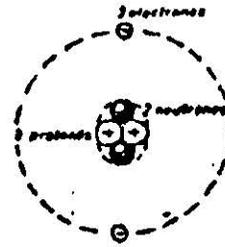


Fig. 445.- Atomo de helio.

El cuerpo más sencillo que existe es el hidrógeno; un átomo de hidrógeno (figura 444), consta de un núcleo sencillo constituido por un protón y de un electrón orbital. El cuerpo más simple, después del hidrógeno, es el helio, cuyo átomo (figura 445), consta de un núcleo con 2 neutrones y 2 protones y 2 electrones que giran en la misma órbita. El átomo de litio (figura 446) consta de un núcleo con 4 neutrones, 3 electrones que giran en dos órbitas, como se puede apreciar en la figura.

Hemos representado también los átomos que, de una forma u otra, son interesantes en la técnica de las centrales nucleares.

Cada protón o cada neutrón tiene un masa 1.840 veces mayor que la masa de un electrón. El protón, por otra parte, tiene la misma que el neutrón. Es decir, que prácticamente, toda la masa del átomo puede suponerse concentrada en el núcleo; recuérdese que, si el electrón del átomo de hidrógeno pesara un gramo, su núcleo pesaría 1.84 kg. y que esta diferencia es, todavía mucho mayor en los cuerpos cuyo núcleo tiene muchas partículas (como el uranio)

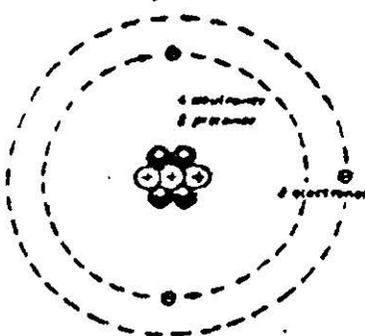


Fig. 446.- Atomo de litio

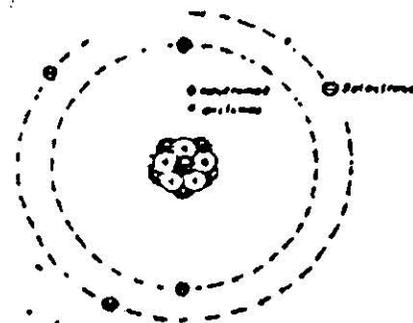


Fig. 447 .- Atomo de boro.

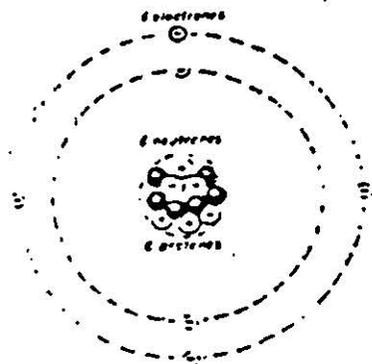


Fig. 448.- Atómo de carbono

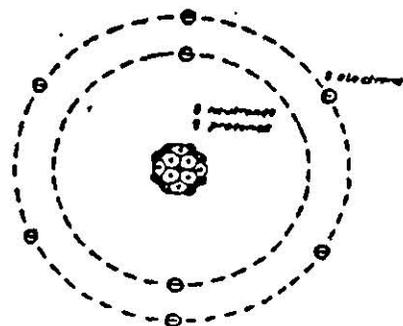


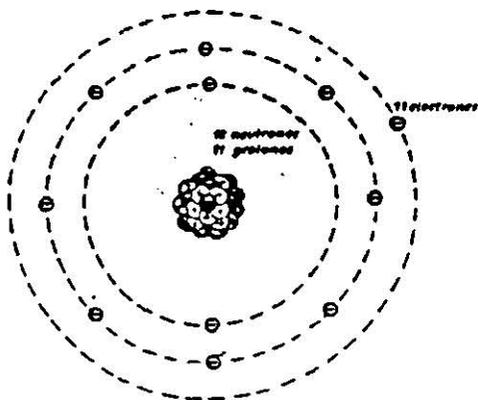
Fig. 449 Atómo de oxígeno

### *Números que definen los átomos.*

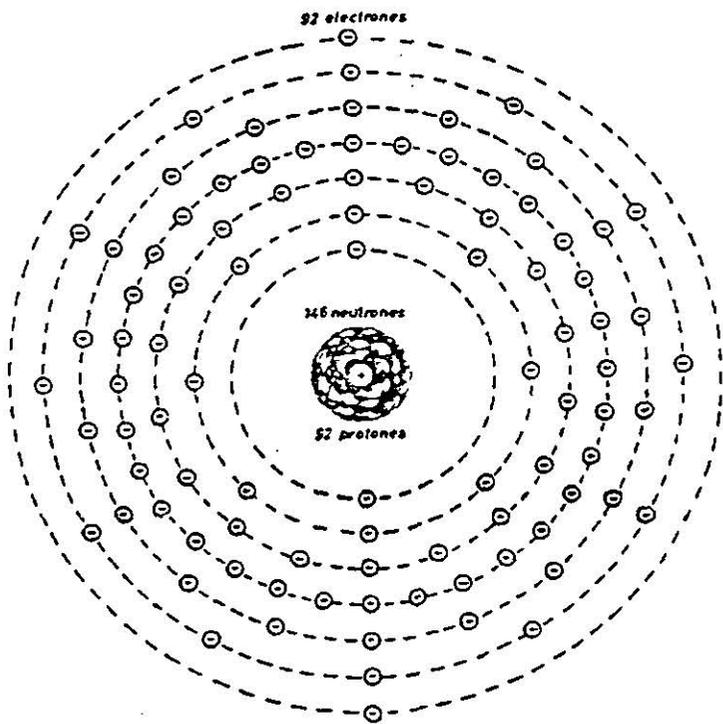
Cada átomo queda definido con ayuda de dos números:

1o. Número atómico ( $Z$ ), o sea la carga eléctrica positiva contenida en su núcleo; por ejemplo, el número atómico del oxígeno es 8, porque éste es el número de protones contenido en su núcleo atómico.

2o. Número másico ( $A$ ), que expresa el número total de partículas contenidas en el núcleo atómico. Por ejemplo, el número másico del uranio es 238. El número másico del hidrógeno es 1; por lo tanto, el número másico de cualquier elemento, representa también el número de veces que la masa de dicho elemento es mayor que la masa del hidrógeno que, de esta forma, se toma como unidad.



**Fig. 450. Atomo de sodio.**



**Fig. 451. Atomo del uranio.**

Ya sabemos que los cuerpos simples o elementos químicos se representan abreviadamente por medio de una o dos letras; ahora podemos añadir el número atómico y el número másico. Por ejemplo, el símbolo químico del carbono es C; el símbolo atómico es

Lo que quiere indicar un número másico  $A=12$  y un número atómico  $Z=6$ .

En la tabla 1 exponemos los números atómicos y másicos de los cuerpos representados en las figuras 444 a 451.

TABLA 1. NUMEROS ATOMICOS Y MASICOS DE ALGUNOS ELEMENTOS QUIMICOS.

Cuerpos	Número Másico A	Número Atómico Z	Simbólo Atómico
Hidrógeno	1	1	$\begin{matrix} 1 \\ H \\ 1 \end{matrix}$
Helio	4	2	$\begin{matrix} 4 \\ He \\ 2 \end{matrix}$
Litio	7	3	$\begin{matrix} 7 \\ Li \\ 3 \end{matrix}$
Boro	11	5	$\begin{matrix} 11 \\ B \\ 5 \end{matrix}$
Carbono	12	6	$\begin{matrix} 12 \\ C \\ 6 \end{matrix}$
Oxígeno	16	8	$\begin{matrix} 16 \\ O \\ 8 \end{matrix}$
Sodio	23	11	$\begin{matrix} 23 \\ Na \\ 11 \end{matrix}$
Uranio	238	92	$\begin{matrix} 238 \\ U \\ 92 \end{matrix}$

## ISOTOPOS.

Muchas veces sucede que dos átomos tengan el mismo número de protones y el mismo número de electrones exteriores pero diferente número de neutrones en su núcleo; estos dos cuerpos tienen las mismas propiedades químicas pero sus masas son diferentes y también en muchos casos, son diferentes sus propiedades atómicas. A estos cuerpos se les llama isótopos. Los isótopos tienen el mismo número atómico pero diferente número másico.

Vamos a poner algunos ejemplos explicativos. Ya sabemos que el átomo de hidrógeno consta de un protón y de un electrón; a este cuerpo lo llamaremos hidrógeno 1. Pero existen otros tipos, otros dos isótopos de hidrógeno; uno, denominado hidrógeno 2 o deuterio, cuyo núcleo consta de un protón y un neutrón (figura 452); este cuerpo tiene el símbolo atómico:

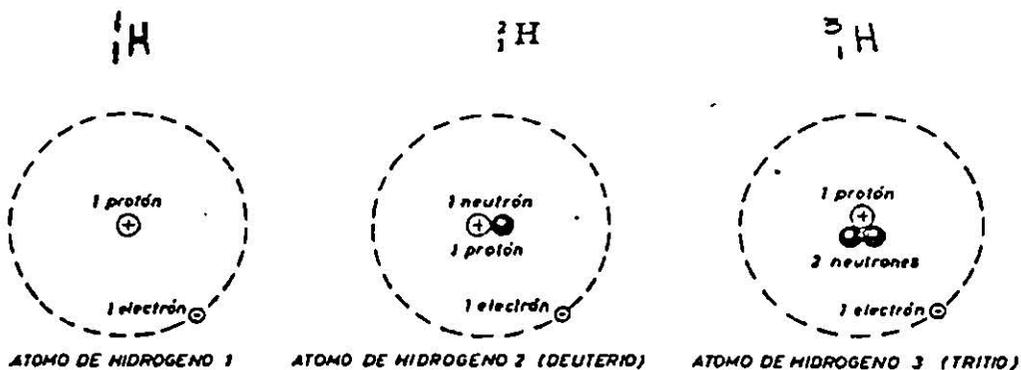
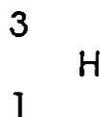


Fig. 452. Isótopos de hidrógeno.

Existe otro isótopo de hidrógeno, denominado hidrógeno 3 o tritio, también representado en la figura 452, y cuyo núcleo consta de un protón y dos neutrones; el símbolo atómico es:



Naturalmente el más abundante es el hidrógeno 1; la proporción de hidrógeno 2 es de 1 parte por cada 6.700 partes de hidrógeno 1 y la proporción de hidrógeno 3 es aún menor. En realidad, lo que llamamos hidrógeno no es más que una mezcla de estos tres isótopos; pero como

la cantidad de hidrógeno 1, contenida en la mezcla, es muchísimo mayor que la de los otros dos isótopos, podemos considerar que las propiedades de ésta mezcla coinciden con las del hidrógeno 1; pero ya veremos más adelante que el deuterio, si logra separarse de la mezcla, tiene propiedades muy diferentes a las del hidrógeno ordinario. Lo mismo podemos decir de todos los cuerpos simples que conocemos: todos ellos son mezclas de diferentes isótopos y se atribuyen a cada cuerpo las propiedades de los isótopos más abundantes.

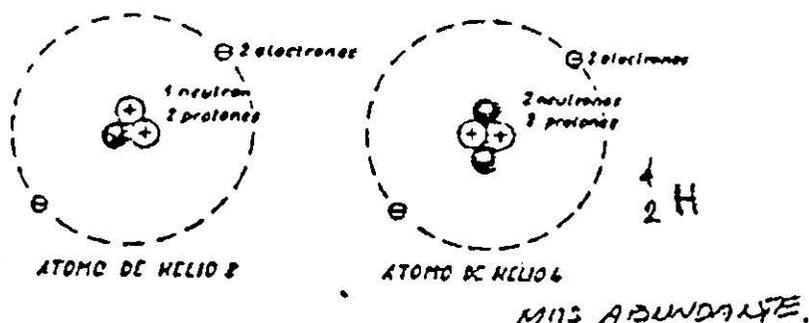


Fig. 453.- Isótopos de helio.

Como se muestra en la figura 453 el helio tiene dos isótopos: el helio ordinario o helio 4 que, como sabemos tiene 2 protones y 2 neutrones (por lo tanto  $A=4$ ,  $Z=2$ ) y el helio 3 que, naturalmente, también tienen 2 protones, pero solamente 1 neutrón (por lo tanto  $A=3$ ,  $Z=2$ ) estos dos cuerpos se representan por los símbolos:



y el más abundantes es el helio 4.

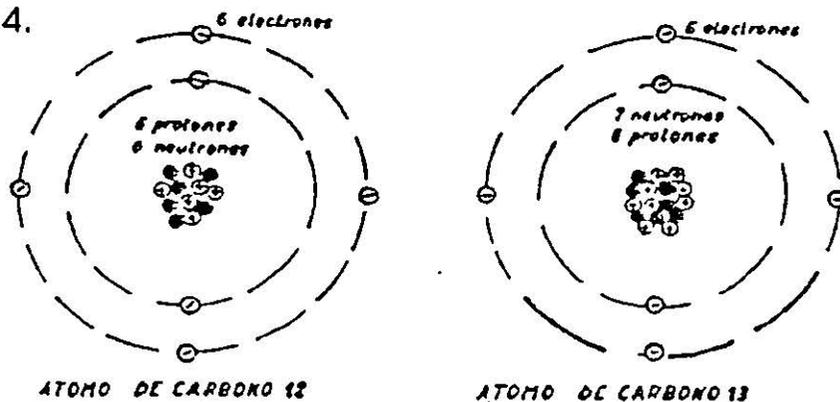
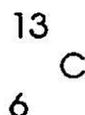
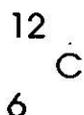


Fig. 454.- Isótopos del carbono.

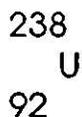
En la figura 454 se representan los dos isótopos más conocidos del carbono; el carbono 12, que es la más abundante, y el carbono 13.

Los símbolos son:



y el lector puede, como ejercicio, calcular el número de protones y de neutrones contenidos en los núcleos de estos dos isótopos de carbono.

El uranio que es, el material más importante empleado en las centrales nucleares, tiene varios isótopos, siendo el más abundante, el llamado uranio 238, cuyo símbolo es:



Pero como veremos más adelante, tienen gran importancia en los procesos producidos en un reactor nuclear, otros isótopos de uranio como por ejemplo:



Otras consideraciones sobre la constitución del átomo.

A continuación vamos a dar unas ideas intuitivas sobre el tamaño y la masa de los átomos y de las partículas (protones, neutrones, electrones) que lo constituyen. Para ello, vamos a relacionar las citadas magnitudes con datos de la vida ordinaria; pues las dimensiones son tan pequeñas que su expresión matemática, a duras penas nos da una idea aproximada de esta pequeñez

Para comenzar, podemos decir que una caja de cerillos vacía, contiene 1,000 trillones de átomos de oxígeno y de nitrógeno. En una porción de tinta de imprimir, tal como la necesaria para marcar un punto o una coma, el número de átomos es bastante mayor que el de la población total de la tierra que, como sabemos, es de unos 3,000 millones de habitantes.

Vamos a comparar un átomo con una pelota de futbol: si imagináramos que el átomo alcanza el tamaño de una pelota de futbol, y aumentamos el tamaño de la pelota en la misma proporción, esta última sería del tamaño de nuestro planeta.

Todo lo que hemos dicho en el párrafo anterior sobre el tamaño del átomo, se refiere al tamaño de la órbita del electrón más distante del núcleo pues éste, es muchísimo más pequeño todavía. Pues si aumentamos el tamaño del átomo de hidrógeno, de forma que su diámetro sea de 100 mts. observaríamos que el átomo está constituido por un protón cuyo tamaño es de una cabeza de alfiler, alrededor de la cual gira un electrón como de tamaño aproximadamente igual, a una distancia de 50 mts. del protón central. De lo que se deduce inmediatamente que casi todo lo que entendemos por átomo está vacío de la misma forma que está vacío el espacio entre nuestro sol y los planetas que giran al rededor de él.

O sea que, según se deduce del párrafo anterior, casi todo lo que nosotros entendemos por materia sólida está, en realidad, vacía. Si la creemos sólida se debe, en primer lugar, a la limitada capacidad de nuestros sentidos y, en segundo lugar, a la vertiginosa velocidad con que los electrones se mueven en sus órbitas. Naturalmente, se hace muy difícil comprender como la materia sólida contiene tanto espacio vacío: vamos a poner un ejemplo que quizá nos ayude a entender cual se la verdadera constitución de la materia.

Supongamos un ventilador que gira a toda velocidad; sabemos que consta, por ejemplo, de cuatro aspas, entre las cuales existen espacios

vacíos sin embargo, cuando el ventilador está en marcha, se nos presenta como un disco aparentemente sólido. Con el ventilador en reposo, podemos meterlo entre las aspas, sin peligro alguno; si intentamos lo mismo con el ventilador en marcha, nos parecerá que el espacio entre las aspas ha desaparecido y que el ventilador al girar es, virtualmente, un disco sólido. Claro está, que el espacio entre las aspas no ha desaparecido realmente y el ventilador, mientras gira, sólo parece sólido. Ahora bien, los electrones, en sus órbitas, giran muchísimo más aprisa que las aspas de un ventilador; ya que no parece tan extraño que la materia se nos aparezca sólida a nuestros sentidos, aunque no lo sea realmente.

Podemos atravesar la barrera que constituyen las aspas de un ventilador en marcha, si disponemos de cuerpos suficientemente pequeños y cuya velocidad sea mayor que la velocidad de giro del ventilador. Por éste procedimiento, se puede conseguir disparar una metralladora a través de la hélice de un avión, que gira a gran velocidad. Volviendo al átomo, los neutrones libres (es decir, sueltos, que no forman parte de ningún átomo) se mueven a tan elevada velocidad que son capaces de atravesar barreras de electrones (que, como ya sabemos giran vertiginosamente) y chocan contra los núcleos de otros átomos rompiéndolos o fisionándolos.

### **REACCIONES QUIMICAS Y REACCIONES NUCLEARES.**

Vamos a estudiar que es lo que sucede en el interior de un átomo cuando se produce una reacción química. Por ejemplo; expondremos un caso muy sencillo, el de la combustión del carbón, como su propio nombre lo indica, el carbón está compuesto, casi exclusivamente de átomos de carbón. Durante la combustión, cada átomo de carbono se combina con dos átomos de oxígeno contenido en el aire, formando así una molécula de anhídrico carbónico (figura 455). El núcleo central de cada átomo de la molécula no sufre variación: continúa siendo una unidad individual inalterable y distinta. Son los electrones exteriores, que giran alrededor de estos núcleos centrales, los que sufren variación, ya que ahora, en lugar de girar en torno a su propio núcleo describen una complicadísima trayectoria, alrededor de estos núcleos centrales, los que sufren variación, ya que ahora, en lugar de girar en torno a su propio núcleo describen una complicadísima trayectoria, alrededor de los tres núcleos de la molécula de anhídrico carbónico así formada.

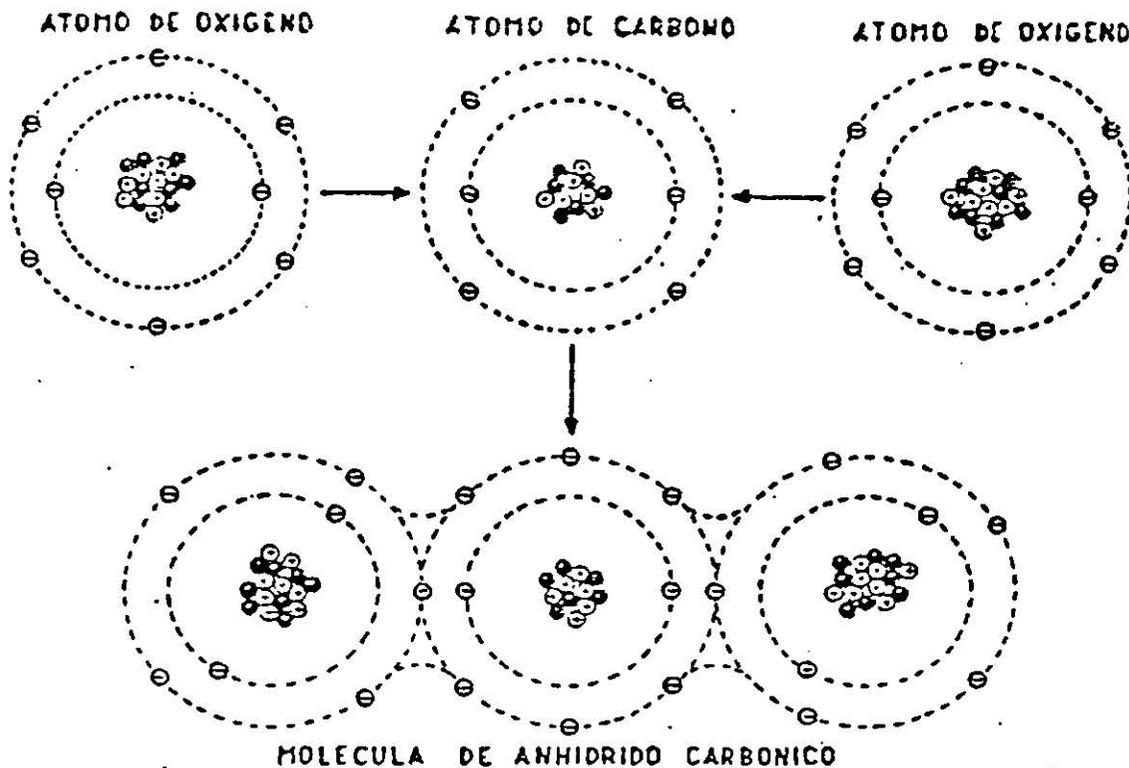


Fig. 455.- Ejemplo de reacción química: combinación de oxígeno y carbono para formar anhídrido carbónico.

Es decir que al iniciarse esta reacción química, se partió de núcleos de carbono y de oxígeno y al terminar la misma reacción, se obtiene también núcleos de carbono y núcleos de oxígeno, pero unidos entre sí por la acción de los electrones exteriores: el cuerpo resultante (anhídrido carbónico) tiene diferentes propiedades que el oxígeno y el carbono considerados individualmente pero, sin embargo, está constituido por átomos de oxígeno y átomos de carbono.

Todos sabemos además, que durante la combustión del carbón se produce calor. Y también, que el calor es una forma de energía; pero...¿de dónde procede este calor? Veamos si podemos explicarlo de forma comprensible.

Cada átomo contienen cierta cantidad de energía. Una buena parte de esta energía es de carácter eléctrico y es debida a las cargas eléctricas del átomo, es decir, la cantidad en los electrones y protones del mismo.

Otra parte de la energía existente en el átomo se debe al movimiento de los electrones alrededor del núcleo central: todos sabemos que cualquier cuerpo en movimiento genera energía calorífica; y esto es válido también para los electrones, que son pequeños corpúsculos en movimiento.

De la misma manera, la molécula obtenida por reacción química de varios átomos contienen también cierta cantidad de energía. Ahora bien si se realizan cálculos exactos se obtiene que, la cantidad de energía existente en la molécula (en cualquier molécula) después de la reacción química, es menor que la suma de las cantidades de energía que hay en cada átomo individual. En nuestro caso particular, la energía contenida en una molécula de anhídrido carbónico es siempre menos que la suma de las energías existentes en los tres átomos uno de carbono y dos de oxígeno -- que constituyen esta molécula. Pero todos sabemos que la energía no se puede destruir; por lo tanto ¿donde va a parar la energía sobrante? Sencillamente, esta energía que parece faltar, se ha convertido en energía calorífica, que es emitida al producirse la reacción química. Es decir que en todas las reacciones químicas se produce energía calorífica; pero en algunas de estas reacciones -- como la del carbón al combinarse con el oxígeno del aire -- esta producción de energía calorífica tiene mucha intensidad. Lo que aprovechamos, los humanos, para calentarnos en invierno o para producir el vapor de agua necesario en las centrales térmicas quemando en todos los casos, carbón.

Para llegar a comprender que es una reacción nuclear, vamos a estudiar antes una reacción química más sencilla que la anterior; y vamos a emplear átomos de hidrógeno (figura 456). Hemos dicho anteriormente, que el hidrógeno es el cuerpo de constitución más sencilla que se conoce; en efecto, un átomo de hidrógeno está constituido por un sólo protón nuclear, ningún neutrón, y para compensar la carga positiva del protón, existe un electrón orbital que gira alrededor de este protón central. Cuando se combinan dos de estos átomos, se obtiene una molécula de hidrógeno. Ahora, los dos electrones giran alrededor de los dos núcleos, en vez de girar uno de ellos alrededor de su núcleo propio. Pero, repetimos, cada uno de los dos núcleos siguen constituyendo unidades e inalterables.

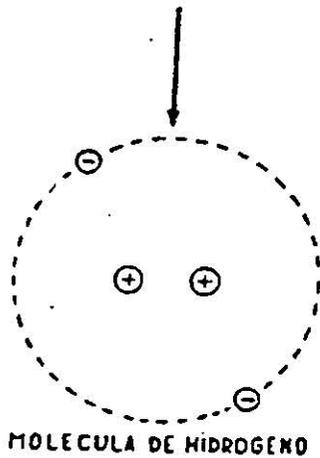
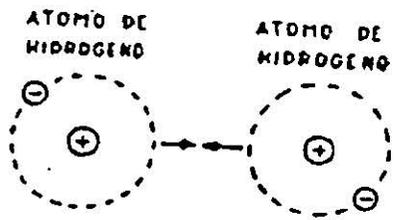


Fig. 456. Ejemplo de reacción química: formación de una molécula de hidrógeno.

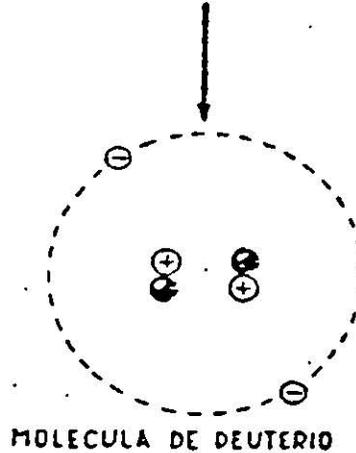
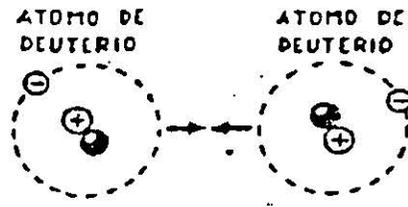
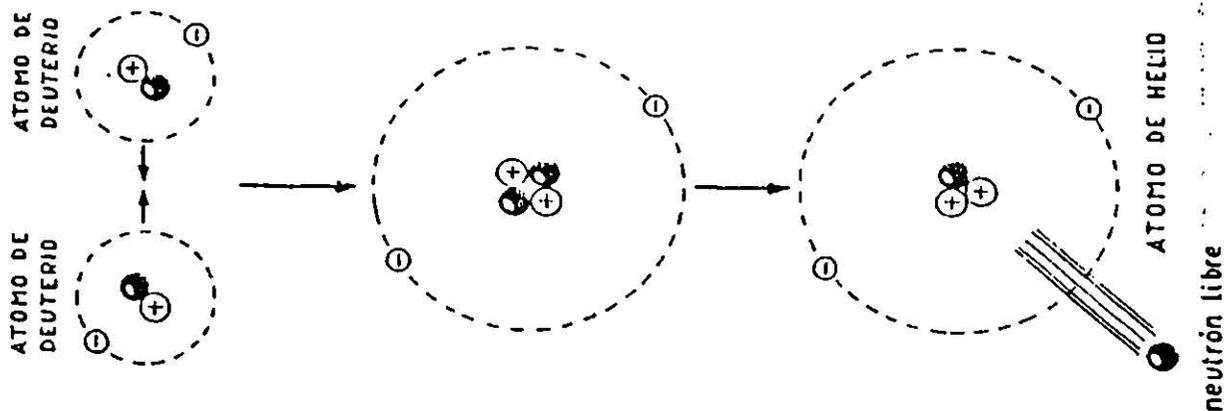


Fig. 457.- Ejemplo de reacción química; formación de una molécula de deuterio.

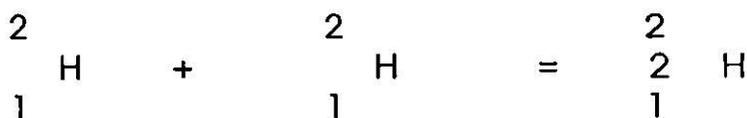
Naturalmente, ahora la molécula de hidrógeno tiene menos energía que la suma de las energías contenidas en los dos átomos porque parte de la energía se ha transformado en energía calorífica.

A continuación, vamos a ver que sucede con uno de los isótopos del hidrógeno pesado o deuterio, cuyos átomos están constituidos por un núcleo con un protón y un neutrón y, además, un electrón orbitario. Al combinarse (Fig. 457), los átomos de deuterio se comportan con los del hidrógeno normal: es decir, dos átomos se combinan para formar una molécula de deuterio. En éste caso, también ocurre que cada uno de los dos núcleos constituyentes de la molécula de deuterio permanecen individuales e inalterables. Y también en este caso, se libera energía calorífica al producirse la reacción química.



**Fig. 458.- Reacción de Fusión**

Pero supongamos que podemos conseguir el choque de dos átomos de deuterio impulsados a gran velocidad (figura 458). En este caso, los dos núcleos se juntarán por un instante, haciendo que reboten las partículas - (protones y netrones) que constituyen los átomos. En circunstancias especiales, se puede conseguir que un neutrón salga despedido, mientras que el neutrón restante quede retenido en el nuevo núcleo formado, junto con los dos protones originales. Se ha producido una reacción nuclear; veamos ahora las consecuencias. En primer lugar, el nuevo nucleo formado resulta de la fusión de dos núcleos individuales de deuterio menos el neutrón perdido, por otro lado, como existen dos protones en el núcleo, se conservan los dos electrones orbitales cuyas cargas negativas compensan y equilibran las cargas poisitivas de los protones nucleares. Es decir que partiendo de dos átomos de deuterio:



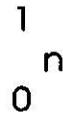
hemos llegado a un nuevo cuerpo simple, denominado helio, más un neutrón desprendido; podemos poner



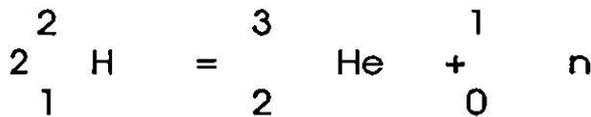
y expresando toda la reacción



como el neutrón es una partícula sin carga eléctrica podemos expresarlo así:



o sea que, en definitiva



para comprender como es que se ha obtenido un nuevo cuerpo químico, recuerdese que, según hemos dicho lo que caracteriza un cuerpo simple y lo que lo distingue de los demás cuerpos simples es el número de protones existentes en el núcleo o lo que es lo mismo, el número de electrones orbitales. Y que todas las sustancias que tienen el mismo número de protones— o sea, el mismo número atómico — son isótopos; el deuterio es un isótopo del hidrógeno ya que tiene, como este último, un solo protón nuclear, aunque el deuterio tiene, además un neutrón en su núcleo, del que carece el hidrógeno. Y por lo mismo el helio es un cuerpo distinto del hidrógeno (o del deuterio), ya que posee dos protones nucleares.

La segunda consecuencia, como a muchas reacciones nucleares entre ellas las que estamos estudiando es que se desprende una cantidad muchísimo mayor de energía térmica; unos 50 millones de veces mayor que en una reacción química. O sea que con las reacciones nucleares, podemos obtener con la misma cantidad de materia una cantidad de

energía calorífica millones de veces mayor que la que se obtendrá con una reacción química.

Es decir que la diferencia más importante, existente entre la reacción nuclear es que, en las primeras se obtienen moléculas de átomos de cuerpos simples; y éstos átomos siguen manteniendo lo que pudiéramos llamar su "personalidad" propia: su constitución nuclear no varía. Mientras que en las reacciones nucleares se obtienen otros átomos de distinta constitución nuclear que los átomos primitivos.

Por lo tanto será una reacción química, la combinación de dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno para constituir una molécula de agua pues la constitución nuclear de los tres átomos que constituyen esta molécula, es idéntica a la constitución nuclear de los átomos primitivos. Pero la absorción de un neutrón por el núcleo de un átomo de uranio 235 para constituir un átomo de uranio 236 es una reacción nuclear pues el cuerpo resultante, o sea el uranio 236 tiene en su núcleo, 92 protones y 236 partículas nucleares (protones y neutrones), en total, mientras que el núcleo del átomo de uranio 235 que lo originó aunque también tiene 92 protones (por eso sigue siendo uranio el cuerpo resultante) no posee más que 235 partículas nucleares; es decir, ha variado la estructura nuclear del cuerpo resultante.

A continuación, estudiaremos algunas de las reacciones nucleares más interesantes.



Ya veremos más adelante que esta es la reacción más importante que se produce en los reactores nucleares. Por el momento, fijémonos que un átomo de uranio produce un átomo de bario y un átomo de Kriptón, es decir dos átomos en total. También podemos apreciar que el número total de protones y de neutrones es el mismo en ambos miembros de la igualdad anterior. En efecto al lado izquierdo de la igualdad aparecen 235 partículas nucleares de uranio más el neutrón suelto que provoca la colisión, lo que hace un total de 236 partículas y en el lado derecho hay 144 partículas del bario más de las 90 partículas de Kriptón, más los 2 neutrones sueltos resultantes, lo que también hace un total de 236 partículas.

De la misma forma, si hiciéramos un recuento de los protones, veríamos que hay un número total de 92 en ambos miembros de la igualdad: Esta propiedad de ser iguales en número las partículas nucleares resultantes es una característica común a todas las reacciones nucleares, como iremos viendo sucesivamente.

Actualmente, en todos los reactores nucleares se utiliza casi exclusivamente el proceso de fisión de varias sustancias (uranio, plutonio, etc.) por lo que más adelante realizaremos un estudio más detenido de este proceso, examinando las condiciones que son necesarias para que se produzcan las colisiones entre neutrones y núcleos atómicos, así como las consecuencias derivadas de este proceso. Ahora seguiremos nuestra explicación, estudiando reacciones nucleares.

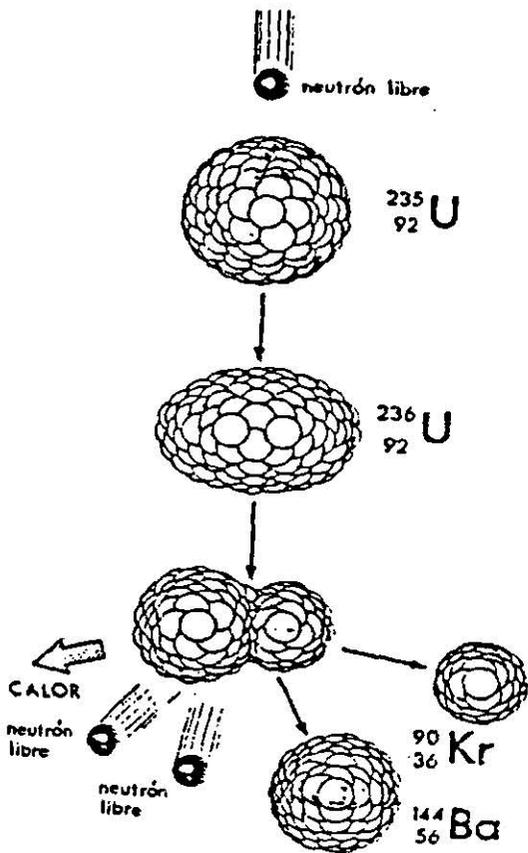


Fig. 460.- Reacción de Fisión

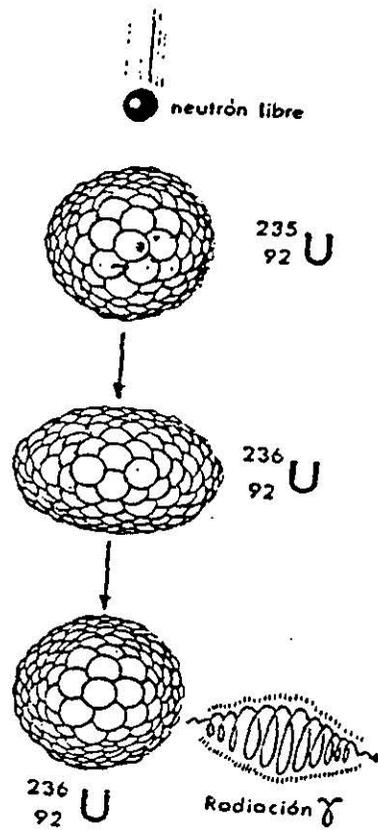


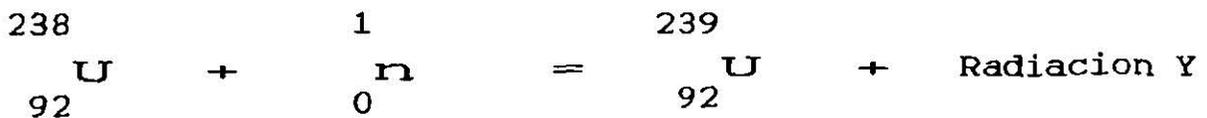
Fig. 461. Reacción de captura.

También resulta interesante la reacción de captura, que intentaremos explicar, exponiendo un caso típico (figura 461). Algunas veces al chocar neutrón, animado de gran velocidad, con el núcleo de un átomo de uranio 235, no se produce una fisión de dicho núcleo como hemos visto anteriormente. En este caso, el neutrón queda absorbido en el núcleo es decir, capturado por el átomo de uranio 235. Se obtiene así no un nuevo cuerpo simple puesto que el número de cargas positivas es el mismo (92) sino un nuevo isótopo de uranio puesto que ha aumentado en una más, el número total de partículas nucleares; en suma hemos obtenido el uranio 236. En todas las reacciones de captura hay emisión de radiaciones y que son ondas electromagnéticas que vibran eléctrica y magnéticamente en sentido perpendicular al avance, o sea que mientras adelantan se contraen y expanden hacia los lados, como cuando hemos de serpentear una cuerda (figura 462). Su velocidad es la de la luz 300.000 km/seg. y su longitud de onda es pequeñísima, del orden de una unidad x (la unidad x equivale a una diezmillonésima parte de un milímetro). No tienen masa ni carga, son muy penetrantes y su emisión puede perjudicar la salud de los seres humanos. Como en todos los reactores nucleares se producen radiaciones, y deben protegerse con diversos materiales que absorban estas radiaciones.



**Fig. 462. Representación esquemática de las radiaciones**

Las reacciones de captura tienen importancia en la técnica de los reactores nucleares porque, a partir de ellas, un material no fusionable, y por tanto, no apto para producir energía calorífica puede transformarse en otro material fisionable. Por ejemplo; a partir de la reacción de captura.

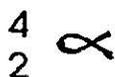


El material estable uranio 238, se convierte en el material inestable uranio 239, que, a su vez, se transformará posteriormente en plutonio 239 que ya es material fisionable. Como veremos más adelante, ésta es la reacción utilizada en los reactores nucleares para la producción industrial de plutonio, que luego habrá de emplearse como combustible en otros reactores nucleares de tipo más avanzado.

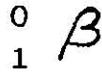
Finalmente vamos a explicar qué es lo que se entiende por cambio radiactivo. Muchos de los cuerpos simples cuyo núcleo consta de gran número de partículas, son inestables, es decir que tienden a descomponerse por sí mismos en cuerpos simples más sencillos. Al descomponerse, estos cuerpos emiten partículas a grandes velocidades y, por lo tanto, muy penetrantes, acompañadas muchas veces de las radiaciones que hemos estudiado en el párrafo anterior. Esta propiedad que tienen algunos cuerpos simples de descomponerse por sí mismos, sin acción exterior alguna, en otros cuerpos de constitución más sencilla, se denomina radiactividad y los materiales que se descomponen en se llaman cuerpos radiactivos. Es muy sencillo de comprender que el uranio, con 238 partículas en su núcleo, será mucho más radiactivo que el helio, por ejemplo, cuyo núcleo sólo contienen 3 partículas, es decir que, cuanto más complicada es la estructura nuclear de un cuerpo radioactivo es este cuerpo. Naturalmente, la sustitución de un cuerpo por otro cuya estructura sea más sencilla se denominará cambio radioactivo. En los cambios radioactivos tiene mucha importancia la naturaleza de las partículas emitidas pues si se conocen sus características, se puede prever cuales serán los cuerpos resultantes de dichos cambios.

Se ha comprobado experimentalmente que, entre las partículas procedentes de cambios radioactivos, no existen jamás ni protones, ni neutrones sueltos, de los que se deduce inmediatamente que el átomo, por sí mismo, no puede eyectar estas partículas emitidas por los cuerpos radioactivos son solamente de estos dos tipos:

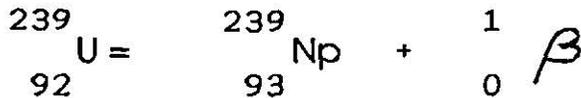
Partículas  $\alpha$       Constituidas por dos protones y dos neutrones; debido a la presencia de los protones, estas partículas son positivas y se pueden representar así



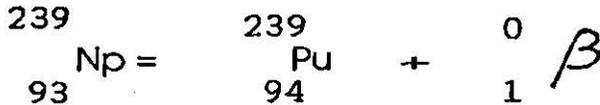
Partículas  $\beta$  Constituidas por un electrón, análogo a cualquier de los electrones periféricos del núcleo; estas partículas tienen carga negativa y no tienen masa. Por lo tanto, podemos representarlas así:



Lo más característico y sorprendente de esta partícula es que, contra lo que pudiera parecer, no proceden de los electrones orbitales sino del mismo núcleo, donde un neutrón se subdivide en un protón positivo y un electrón negativo; este último se expelle del átomo mientras que el protón permanece en él. Naturalmente, el efecto es aumentar en una carga positiva la estructura nuclear del cuerpo; considerado; lo que da por resultado que este cuerpo se convierta en otro cuerpo distinto, pues ya hemos dicho repetidas veces que lo que caracteriza a un cuerpo simple y lo hace diferente a los demás cuerpos simples es el número de cargas positivas de su núcleo atómico. Por ejemplo, el uranio 239 es inestable y se convierte rápidamente en neptunio 239; la reacción producida puede representarse así:—



y, a su vez el neptunio 239, también inestable, se transforma en plutonio 239, de esta manera:



En la figura 463 hemos representado este doble cambio radioactivo.

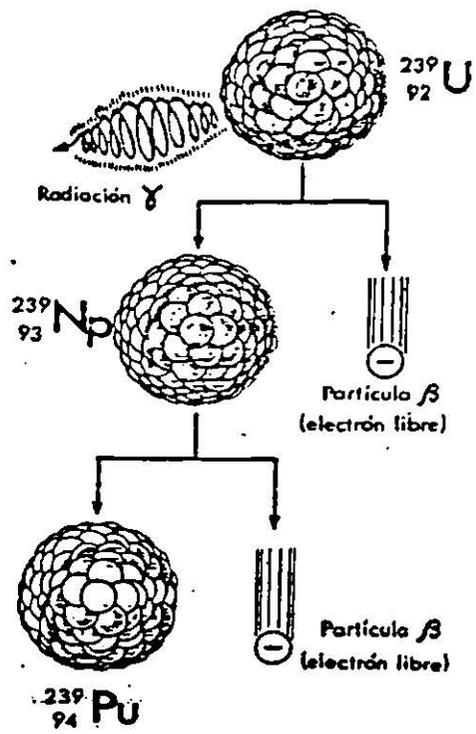


Fig. 463.- Cambio radioactivo.

La radioactividad puede, en ocasiones, ser peligrosa para el personal que maneja las instalaciones atómicas por lo que han de preverse protecciones apropiadas en los reactores y demás dispositivos.

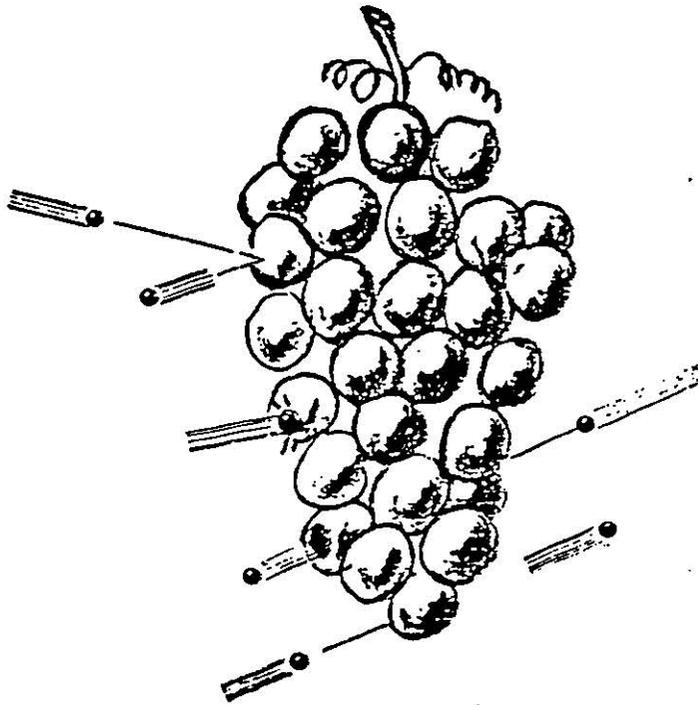
En las cuatro reacciones nucleares que hemos estudiado - fusión, fisión, captura, cambio radioactivo - se obtienen, como final, un isótopo del cuerpo original o un cuerpo distinto. Estas reacciones nucleares se denominan, en general, transmutaciones.

### FISION NUCLEAR.

Vamos a iniciar el estudio de fisión nuclear, exponiendo un ejemplo sencillo, representado en la figura 464. Supongamos un racimo de uvas, que recibe una perdigonada y vamos a determinar qué proporción de perdigones puede romper el hueso interior de los granos de uva. Intuitivamente, podemos comprar dicho hueso interior con el núcleo atómico, el grano de uva con el átomo completo y el racimo entero con una porción material de un cuerpo simple, por ejemplo, el uranio. Los perdigones equivalen a los neutrones libres, empleados para bombardear el núcleo del átomo.

Enseguida podemos comprender que la proporción de huesos partidos depende, esencialmente de dos factores: número de grano de uva que contiene el racimo y velocidad de los perdigones. Efectivamente, si el racimo contiene pocos granos y espaciados, el número de probabilidades de acertar en un grano es mucho menor que si el racimo tiene muchos granos y agrupados. Pero el número de huesos de uva partidos también dependerá, en gran manera, de la velocidad de los proyectiles. En efecto, si la velocidad es muy pequeña, el perdigón rebota; y si la velocidad es muy elevada, el perdigón atraviesa el grano de uva, sin más consecuencia. Sólo en el caso en que la velocidad sea la apropiada, el perdigón quedará incrustado en el grano de uva.

Pero aún en este último caso, podemos establecer dos posibilidades diferentes: unas veces, el perdigón queda retenido en el interior del grano de uva sin llegar al hueso; otras veces, el perdigón llega al hueso interior, choca con él y lo rompe.



**Fig. 464.- Ejemplo comparativo de la fisión nuclear.**

Veamos ahora que sucede a escala atómica. Sabemos que el núcleo atómico es esencialmente positivo puesto que los protones existentes en el mismo están compensados por los electrones periféricos. Los tres tipos de partículas atómicas - electrones, protones, neutrones - pueden hallarse libres. Pero los electrones libres son rechazados por los electrones periféricos, que tienen su misma carga y, si por casualidad alguna llega hasta el núcleo central, su misma masa es insignificativa respecto a la masa nuclear y su efecto por lo tanto es prácticamente nulo, es como si lanzáramos una piedra contra un espeso muro. Los protones libres por tener la misma carga que los protones del núcleo son repetidos de éste sin llegar a chocar. Solamente los neutrones libres, por no tener carga eléctrica, pueden chocar con los núcleos sin ser repetidos por las cargas positivas de los mismos; y, además, el choque puede tener consecuencias puesto que la masa del neutrón ya es una fracción respetable de la masa nuclear. Así pues, y resumiendo, la fisión nuclear solamente es posible por la intervención de neutrones.

Tal como sucedía con los grano de uva necesitaremos un número determinado de átomos para que por lo menos uno de los núcleos de estos átomos quede roto o fisionado por el choque con un neutrón libre. A la cantidad de masa necesaria para que pueda iniciarse el proceso de fisión, se denomina masa crítica. El valor de la masa crítica es distinto para los diferentes cuerpos simples; por ejemplo, para el uranio 235, empleado en los reactores nucleares, es de unos 15 kg.

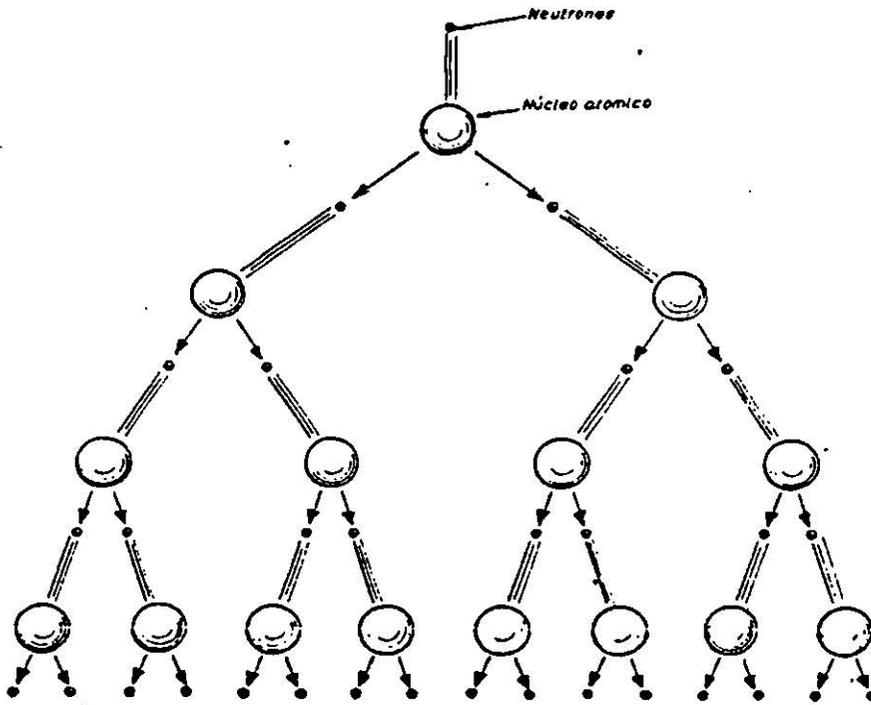
De la misma forma que en el ejemplo intuitivo expuesto los neutrones libres deberán desplazarse a una velocidad determinada para que se realice la fisión de los núcleos; neutrones demasiado lentos o demasiado rápidos no pueden romper los núcleos atómicos. Este valor de la velocidad de los neutrones, necesario para provocar la ruptura de los núcleos atómicos, se denomina velocidad de resonancia. También la velocidad de resonancia es distinta para cada clase de átomos.

Naturalmente, será más fácil romper un núcleo que conste de muchas partículas, que un núcleo de estructura sencilla.

## **REACCION EN CADENA**

Después de la primera fisión o escisión de un núcleo atómico quedan libres, según los casos, uno, dos, tres ó más neutrones que pueden emplearse, a su vez para provocar nuevas fisiones. El efecto es multiplicativo como puede deducirse observando la figura 465, de tal

manera que con un sólo neutrón inicial, puede fisionarse una cantidad bastante elevada de material fisionable, en muy poco tiempo. De esta forma hemos obtenido una reacción en cadena.



**Fig. 465. Reacción en cadena.**

Una analogía intuitiva podría ser el caso de un árbol seco pero que ha conservado todo ramaje, bastará con hacer arder una pequeña rama de su parte inferior para que en muy poco tiempo, se extienda la combustión a todo el árbol. O sea que, en este proceso, una pequeña cantidad de materia (por ejemplo, una cerilla) y una pequeña cantidad de energía (la energía calorífica de la cerilla) provocan un proceso que se extiende a una gran cantidad de materia (el árbol entero), liberando una cantidad enorme de energía (la energía calorífica de la madera del árbol). De la misma manera y hablando ya a escala atómica, la pequeña cantidad de materia que es un neutrón, transmite por choque al primer núcleo de infinitesimal energía cinética que lleva consigo; y estos pequeños efectos pueden provocar en millonésimas de segundo la descomposición de varios kilos de uranio y la liberación de una cantidad enorme de energía calorífica (25 millones de KW-h por cada kilogramo de U 235).

Para que se produzca una reacción en cadena, es necesario:

- 1.- Que la masa de material fisionable sea superior a la crítica (masa supercrítica)
- 2.- Que los neutrones tengan la velocidad de resonancia.

Ahora bien, los neutrones libres procedentes de las fisiones nucleares, están animados de velocidades muy superiores a las de resonancia, unos 20,000 Km/seg. Y, por lo tanto, no son aptos para provocar nuevas fisiones nucleares. Hay que frenar, moderar la velocidad de estos neutrones hasta llevarlos a la velocidad de resonancia; para ello se utilizan ciertas sustancias, llamadas moderadores. Cuando un neutrón choca contra las moléculas del moderador no provoca la escisión de las mismas, por tratarse siempre de sustancias cuyos núcleos poseen pocas partículas y, por tanto, muy difíciles de romper; pero en el choque, las moléculas del moderador absorben parte de la energía cinética del neutrón y éste sale rebotado, pero a velocidad inferior a la que traía: de la misma forma que si hacemos rebotar una pelota contra una pared, ésta absorbe una parte de la energía cinética de la pelota, la cual pierde velocidad por esta causa. Los neutrones animados, de velocidad menor (hasta 2,500 m/s) son neutrones lentos, llamados también neutrones térmicos. Como moderadores se utilizan el grafito, el berilio, el agua pesada y el helio; más adelante estudiaremos todos estos cuerpos.

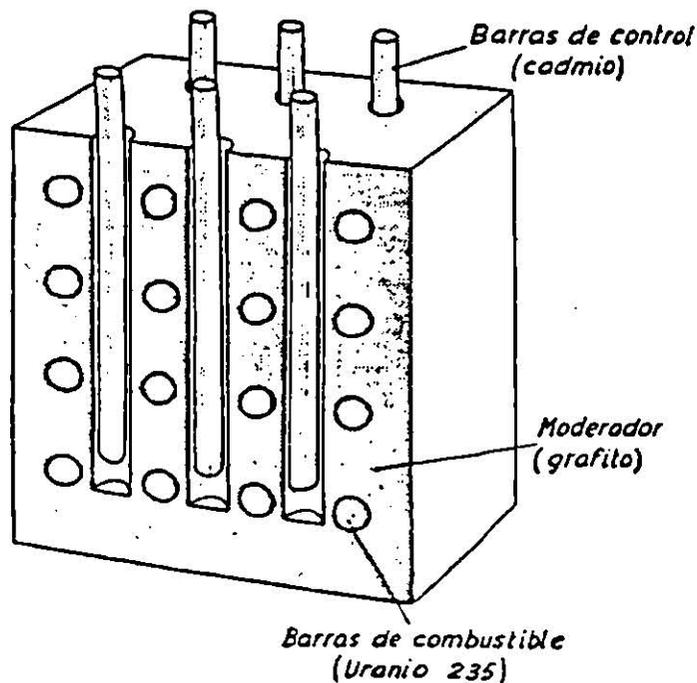


Fig. 466.- Constitución de una pila atómica.

Ya hemos provocado la reacción en cadena, utilizando una masa supercrítica de combustible y moderando la velocidad de los neutrones resultantes de las sucesivas fisiones. Pero la energía desarrollada de esta forma no es aprovechable industrialmente. Ya hemos dicho que, en cuestión de millonésimas de segundo un kilogramo de Uranio 235 libera unos 25 millones de KW-h; no es extraño que, en las inmediaciones se alcancen temperaturas de varios millones de grados. Una tan elevada temperatura conseguida en un tiempo tan pequeño no es, ni más ni menos, que una explosión, una apocalíptica explosión: y, por ahora solamente hemos logrado una bomba atómica, equivalente a la que destruyó Hiroshima.

Para poder aprovechar esta energía calorífica desarrollada hemos de hacer más lenta la reacción en cadena. El mejor procedimiento es aprovechar solamente un neutrón en cada fisión, absorbiendo todos los demás. Para ello, se utilizan ciertas sustancias que tienen verdadera avidez por los neutrones, llamadas reguladoras o absorbentes; entre ellas se encuentran el cadmio y el boro.

### **CONSTITUCION DE UNA PILA ATOMICA**

Con las ideas ya expuestas podemos esbozar, la constitución de un reactor nuclear, llamado también pila atómica sencilla (figura 466). El núcleo de este reactor (es decir el reactor propiamente dicho) consta de unas barras de combustible (por ejemplo, uranio 235), introducidas en una masa de grafito puro o de agua pesada; unas barras de cadmio o de boro, se introducen en una longitud conveniente entre las de uranio de forma que pueda regularse exactamente la reacción en cadena, estas barras de control pueden deslizarse más o menos entre las de uranio, según sea preciso.

Entre los productos de deshecho de la fisión se obtienen materiales más ligeros que el uranio, sustancias radioactivas, partículas  $\alpha$ , partículas  $\beta$ , neutrones, radiaciones  $\gamma$ , etc...., muchas de ellas son muy perjudiciales para la salud humana, por lo que debe protegerse adecuadamente al personal de servicio del reactor. Para ello se recubre este último de sustancias que absorben todas las radiaciones perjudiciales; generalmente plomo y cemento (figura 467).

Dispositivos semejantes fueron los primeramente utilizados en la investigación de las reacciones atómicas, la primera pila atómica fué ideada por el gran físico italiano Enrico Fermi hacia 1942, en la universidad de Chicago. En esta primera pila, seis toneladas de uranio,

utilizando grafito como moderador, desarrollan una potencia de 2W. Los modernos reactores nucleares están basados, todos ellos en la pila atómica de Fermi, aunque ahora se han reducido el peso de uranio necesario y, a la vez, se ha conseguido desarrollar potencias muchísimo mayores.

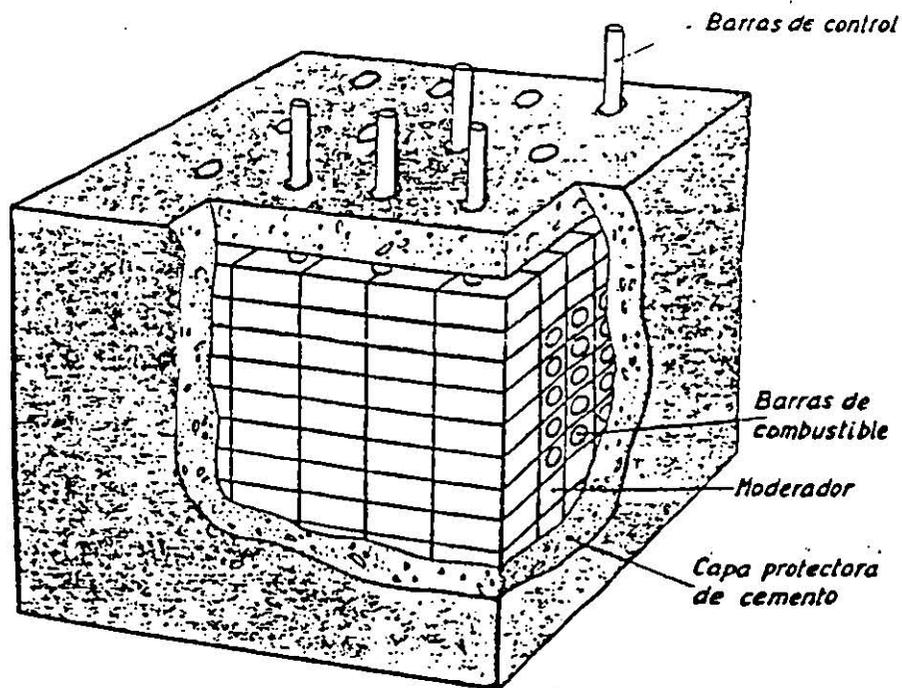


Fig. 467.- Protección de una pila atómica.

## MATERIALES EMPLEADOS EN LOS REACTORES NUCLEARES

Hemos visto en el capítulo anterior que en los reactores nucleares se emplean muchos y muy variados materiales. Todos ellos, podemos resumirlos en los grupos siguientes:

- a) **Materiales Fisionables:** Realizan la misma misión que los combustibles en las centrales térmicas convencionales constituyen por tanto, la materia prima en la que, por fisión o escisión de sus núcleos atómicos, se desarrolla la energía calorífica necesaria. Los materiales fisionables empleados en las centrales nucleares son: el uranio 233, el uranio 235, y el plutonio 239.
- b) **Materiales reproductores o de recría:** Se trata de materiales no directamente fisionables o poco fisionables, en los que por procedimientos adecuados se consiguen materiales fisionables. Los más importantes son: el uranio 238 y el torio 232.
- c) **Materiales moderadores:** Utilizados como sabemos, para frenar la velocidad de los neutrones procedentes de la escisión de los núcleos atómicos, hasta llevarlos a la velocidad de resonancia. Los más importantes son: el grafito y el agua pesada.
- d) **Materiales absorbentes o reguladores,** destinados a restringir las reacciones nucleares en cadena producidas en los reactores, hasta límites en los que sea posible el aprovechamiento industrial; los más interesantes son el boro y el cadmio.
- e) **Materiales protectores o de apantallamiento.,** destinados a proteger al personal contra las radiaciones nocivas; se utilizan para ello el plomo y hormigones especiales
- f) **Materiales reflectores;** como indica su nombre, en algunos tipos de reactores, reflejan los neutrones con tendencia a escapar y que chocan con ellos, obligándoles a volver hacia el núcleo del material fisionable, el más importante es el circonio.
- g) **Materiales refrigerantes** encargados de transportar la energía calorífica producida en los reactores nucleares hasta los cambiadores de calor y, a la vez evitan el sobrecalentamiento excesivo en el núcleo del reactor, refrigerándolo. Los más empleados son: el agua, el agua pesada, el galio, el sodio, el anhídrido carbónico a presión, el helio a presión, etc.

- h) Materiales de construcción, utilizados en la construcción exterior del núcleo del reactor, cambiadores de calor, cubiertas protectoras de las varillas de combustible, etc. Estos materiales de construcción son muy variados y se extienden desde las aleaciones ligeras a base de aluminio y de magnesio, hasta los metales especiales para resistir altas temperaturas y altas presiones y constituidos por aceros al titanio, aleaciones de níquel, de berilio, de niobio, etc.
  
- i) Productos de escisión, o sub productos atómicos, que son a modo de escorias resultantes de la escisión de los materiales fusionables parte de estos subproductos puede regenerarse y convertirse nuevamente en materiales fusionables; otra parte, debe retirarse periódicamente del reactor, pues constituyen venenos atómicos, muy absorbentes de electrones que pueden llegar hasta parar la reacción en cadena. Entre los subproductos atómicos pueden citarse el estroncio, el carbono 14, el yodo 131, el xenon, el bario, el samario, el boro, el hafnio, etc.; los primeros 3 son sustancias muy radioactivas y los últimos son venenos atómicos activísimos.

## MATERIALES FISIONABLES Y MATERIALES REPRODUCTORES

Los materiales fisionables, llamados también materiales combustibles nucleares son varios; pero solamente algunos de ellos tienen aplicación práctica, ya que en muchos materiales fisionables, el tanto por ciento de neutrones absorbidos por los núcleos atómicos de estos materiales, mediante reacciones de captura, es tan elevado que, prácticamente, no puede considerarse a estos materiales como combustible, ya que la energía desarrollada por ellos es muy pequeña y, además, el mantener la reacción en cadena. Nos explicaremos mejor con un caso concreto.

Supongamos un reactor en el que utilizamos como combustible uranio 238, sin mezcla de ninguna clase. Como quiera que, en un momento dado, existen en un reactor nuclear, neutrones animados de distintas velocidades, resultarán los siguientes efectos:

- 1.- Los neutrones lentos (unos 2,200 m/s) producen muy pocas fisiones en los núcleos de U 238. Casi todos ellos en una gran proporción, son capturados por el U 238 resultando un isótopo de uranio, el U 239.
- 2.- Los neutrones rápidos, procedentes de las fisiones anteriores, y animados con velocidad del orden de 8,000 Km/seg. provocan fisiones en los núcleos de U238, con una posibilidad del orden de 67 por 1,000. Los demás neutrones rápidos son también capturados por los núcleos de U 238, produciéndose nuevamente U 239.

En conjunto, podría demostrarse que de cada 5 fisiones se produce un neutrón nuevo, lo que es insuficiente a todas luces para mantener una reacción en cadena. Así pues el uranio 238 puro no puede emplearse como combustible nuclear a pesar de que, en ciertas condiciones es material fisionable.

Los únicos cuerpos que, hasta la fecha, pueden mantener una reacción en cadena son: U 233, U 235, Pu 239. Y esto, porque en dichos materiales las probabilidades de fisión son mayores que las de captura.

De éstos tres cuerpos, solamente existe en estado natural el uranio 235. Los otros dos cuerpos, se obtienen por medios artificiales el uranio 233 por reacciones de captura sobre los núcleos del torio 232, y el plutonio 239 por reacciones de captura sobre los núcleos del uranio 238.

Así pues, el torio 232, y el uranio 238 no se consideran materiales fisionables directamente, pero pueden otros materiales que sí son

fisionables. Se les llama, como hemos dicho antes, materiales reproductores, materiales fisionables. Se les llama, como hemos dicho antes, materiales reproductores, materiales fértiles y también materiales de recría son tan importantes como los materiales directamente fisionables pues la existencia de U 235, unico combustible nuclear que se halla en estado natural son muy escasas.

El uranio natural (es decir, el que se obtiene directamente de los minerales de uranio), contiene 99.3% de uranio 238 el cual hemos visto que no era directamente fisionable y un 0.7% de uranio 235, directamente fisionable. Por bombardeo de neutrones lentos, o de neutrones rápidos, se producen diferentes reacciones nucleares, en el seno del uranio natural; las más importantes son las siguientes:

a) Fisión de uranio 235 (fig. 468).

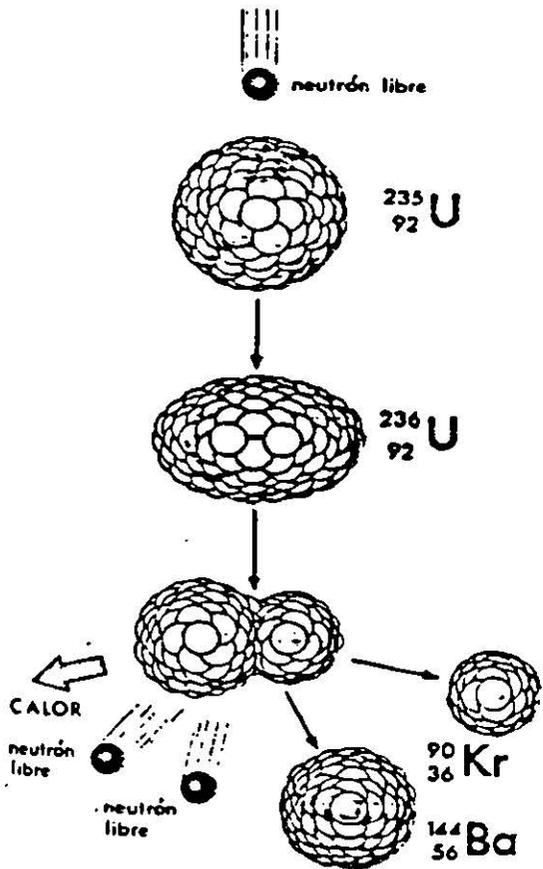
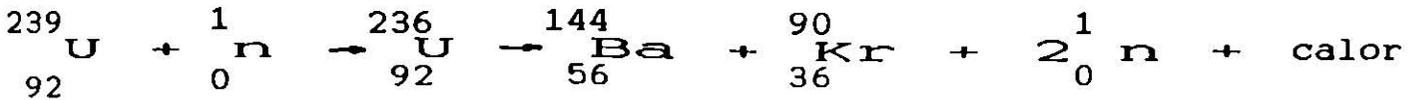


Fig. 468.- Fisión de uranio 235

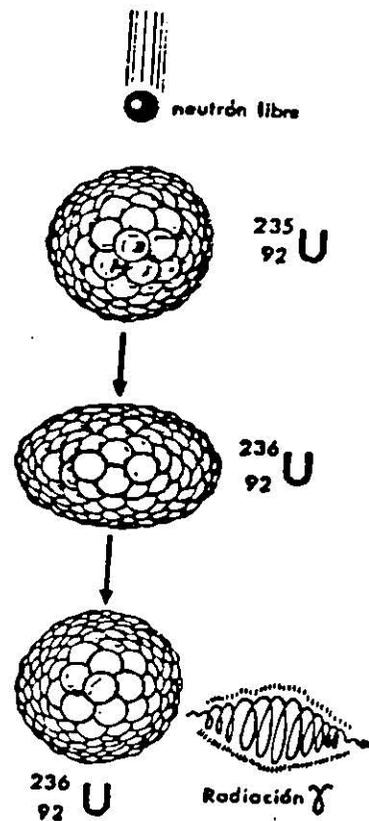
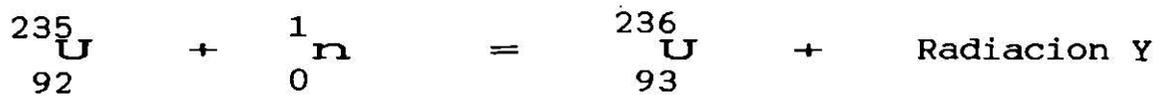


Fig. 469. Reacción de captura del uranio 235.

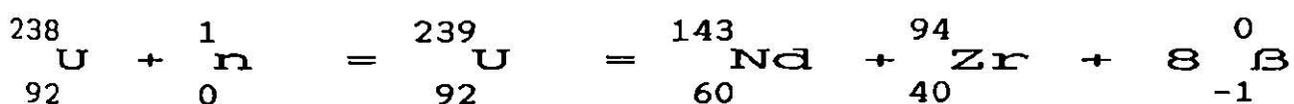
Esta es la reacción más importante que se produce en los reactores nucleares y en la que se desarrolla casi toda la energía calorífica obtenida. Puede producirse por bombardeo de neutrones lentos y, también de los neutrones rápidos procedentes de las sucesivas fisiones. En ella se produce primeramente uranio 236 que, después se fisiona, partiéndose en varios trozos. No siempre se obtienen los cuerpos citados en la fórmula anterior (bario 144 y Kriptón 90); pero en una gran mayoría de casos así es como sucede.

b) Captura de un neutrón por el uranio 235 (Figura 469)



Esta reacción representa una captura improductiva de neutrones por los núcleos de uranio 235. Se produce uranio 236, que no es fisiónable ni reproductor, y emisión de radiaciones  $\gamma$ .

c) Fisión de uranio 238 (figura 470). Por sucesivas emisiones de partículas, se obtienen diferentes cuerpos. Los productos finales de la fisión de uranio 238 son: el circonio 94 que es un producto estable, y el neodimio 143, que es un material poco fisiónable; la fórmula final del uranio es:



Esta reacción únicamente se realiza con neutrones rápidos y representa solamente alrededor del 3% de la energía térmica desarrollada en un reactor con moderador. En ciertos tipos de reactores sin moderador (reactores rápidos), y con cubierta de uranio natural, esta reacción puede significar hasta un 20% de la energía calorífica producida por el reactor.

d) Cambio radioactivo del uranio 238 en plutonio 239 (figura 471)

En primer lugar el uranio 238, se convierte en uranio 239, con emisión de radiaciones; este material es inestable y, al cabo de 23 minutos se convierte en neptunio 239, con emisión de una partícula; el neptuno 239, también es inestable y, al cabo de 2, 3 días, se transmuta en plutonio 239 con emisión de una partícula. El plutonio 239 puede considerarse estable, puesto que dura unos 24.000 años, y es fisiónable por lo que puede

emplearse como combustible nuclear. La fórmula de la reacción final es la siguiente:



Esta reacción se efectua con neutrones lentos o rápidos; pero se aumenta extraordinariamente las posibilidades de que se realice, si se emplean neutrones rápidos.

Como hemos dicho ya, el uranio natural está constituido por una mezcla de uranio 238 y uranio 235, en proporciones muy diferentes, ya que por cada átomo de uranio 235 existen 138 átomos de uranio 238.

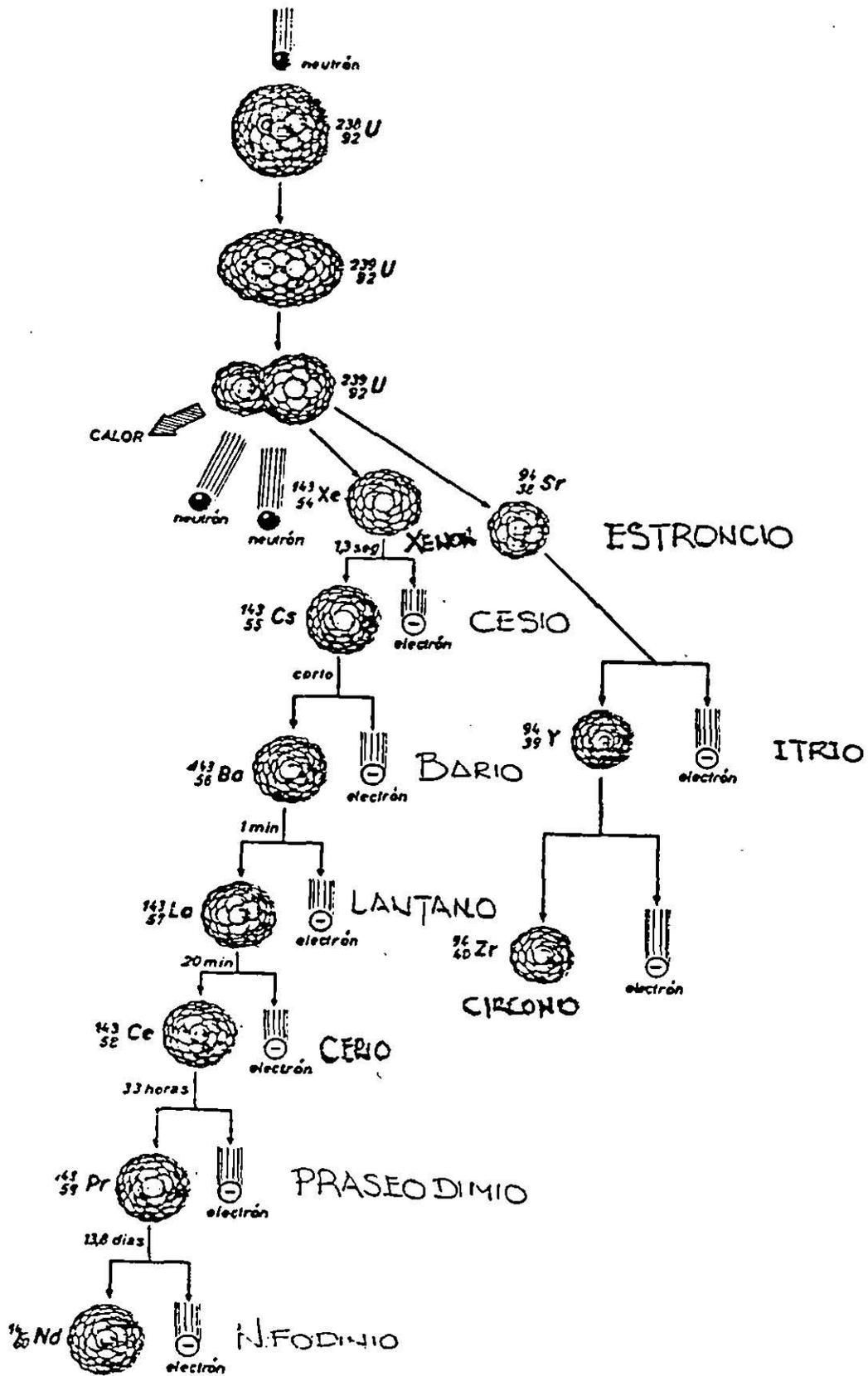


Fig. 470. Fisión del uranio 238.

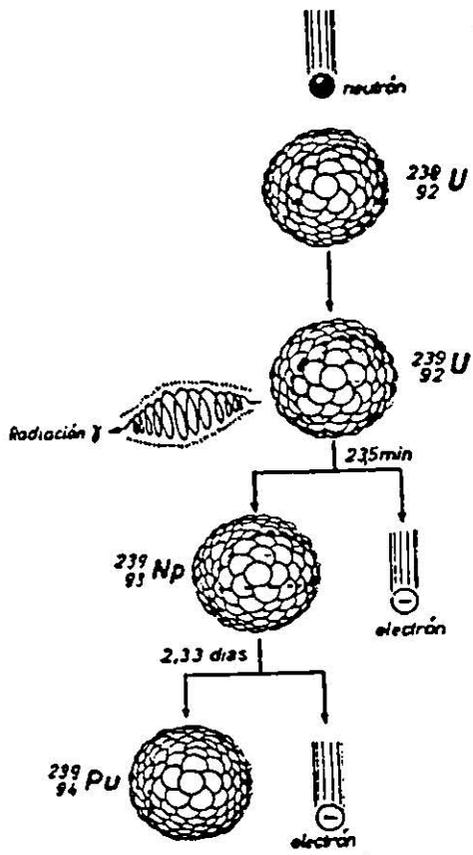


Fig. 471 Cambio radioactivo del uranio 238 en plutonio 239.

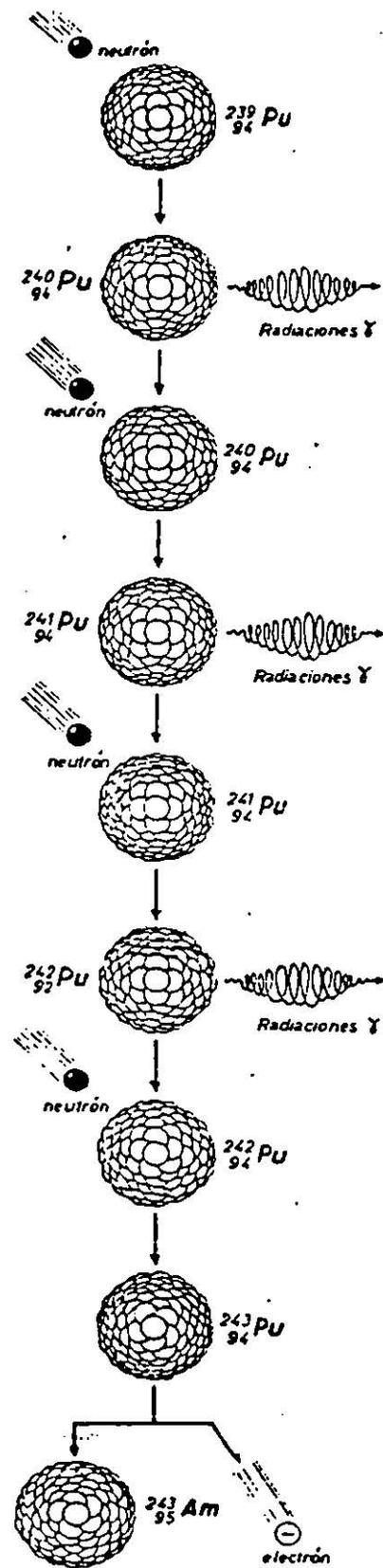


Fig. 472.- Cambios radioactivos y reacciones de captura en el plutonio 239.

Los reactores que utilizan esta técnica avanzada, se denominan reactores rápidos.

El plutonio 239 también se emplea como combustible nuclear; tiene 239 partículas en su núcleo y 94 electrones orbitales y por lo tanto, lo que existe en un núcleo de plutonio, es  $239 - 94 = 145$ .

Vamos a suponer que empleamos uranio natural como combustible, en un reactor nuclear. En este caso, los neutrones rápidos procedentes de las primeras fisiones tienen muchísimas más posibilidades de ser capturados por el uranio 238 para producir plutonio 239, que de chocar con nuevos núcleos de uranio 235 para provocar nuevas fisiones. La reacción en cadena se interrumpirá rápidamente por falta de neutrones libres, ya que sólo existe una posibilidad entre 138 para que un neutrón libre, pueda fisionar un núcleo de uranio 235, produciendo nuevos neutrones libres.

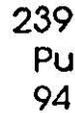
Existen dos procedimientos ambos empleados en la técnica nuclear para evitar el inconveniente anterior. El primer procedimiento consiste en moderar la velocidad de los neutrones para reducir, de esta manera la probabilidad de captura de neutrones por el uranio 238 y, como consecuencia, incrementar, hasta donde sea posible, la probabilidad de fisiones de núcleos de uranio 238. Para ello se utilizarán diferentes materiales moderadores de los que hemos citado algunos en un párrafo anterior. Los reactores que utilizan este procedimiento se denominan reactores térmicos la gran mayoría de los reactores nucleares existentes actualmente en el mundo, son de este tipo.

El otro procedimiento consiste en eliminar o por lo menos, reducir considerablemente, la influencia del uranio 238. Eliminar totalmente la acción de este elemento—es decir, utilizar exclusivamente uranio 235—es muy difícil, en el estado actual de la técnica; pero si puede conseguirse disminuir esta acción, por enriquecimiento del uranio natural. Es decir aumentando la concentración de uranio 235, antes de introducir el combustible en el reactor.

El proceso empleado para el enriquecimiento del uranio natural, es muy laborioso y difícil; está basado en las diferentes velocidades de difusión de los hexafluoruros de uranio 235 y de uranio 238, en forma gaseosa es, a través de membranas metálicas. El efecto separador es, de todas formas muy débil y se necesitan no menos de 5,000 etapas para que el enriquecimiento de uranio natural sea pareciabale. Solamente los países técnicamente muy avanzados— por ejemplo; Gran Bretaña y Estados Unidos—tienen los medios suficientes pra realizar instalaciones de enriquecimiento de uranio natural. Y los demás países dependen, en su aprovisionamiento del uranio enriquecido, de los citados anteriormente.

Al extraer parte del uranio 238, disminuyen las reacciones de captura de neutrones rápidos; y la concentración de estos últimos puede llegar a ser tan elevada que, aún sin moderador, provoquen las suficientes fisiones en los núcleos de uranio 235, para manetener una reacción en cadena.

LA fórmula atómica del plutonio 239 es:



Este material no se encuentra en estado natural, todo el plutonio existente en el mundo, ha sido producido por cambio radioactivo de una parte de uranio 238 empleado en los reactores nucleares, de lo que inmediatamente se deduce que un país no puede disponer de plutonio si no lo ha comparado a otro país o, lo que es el caso más general, si previamente no dispone de centrales nucleares utilizando uranio natural o enriquecido.

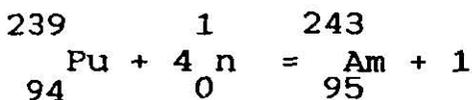
Veamos algunas de las reacciones nucleares que se producen en los reactores que utilizan plutonio 239 como combustible.-

#### 1.- Cambios radioactivos y reacción de captura.

En la figura 472 se han presentado las reacciones de captura y los cambios radioactivos que pueden producirse, en circunstancias especiales, sobre el plutonio 239, obtenido a partir del uranio 238. El proceso representado en la figura es el más desfavorable, en realidad, y en un momento dado, habrá en el reactor nuclear una mezcla de las substancias representadas de las que unas son fisionables, las otras son fértiles y las demás constituyen escorias radioactivas.

Por ejemplo el plutonio 240 formado a partir del plutonio 239, no es fisionable pero si es fértil ya que por captura de un neutrón puede producir plutonio 241 que si es fisionable, en ciertas condiciones. O sea producir plutonio 240 realiza el mismo papel que el uranio 238 en los reactores de uranio. Tampoco es fisionable el plutonio 242, formado por una captura de un neutrón, a partir del plutonio 241; el núcleo del plutonio 242 al capturar un neutrón, se convierte en plutonio 243 y este se transforma rapidamente en americio 243 con emisión de partículas B. El americio 243 es bastante estable y no fisionable. En todas las capturas de neutrones diseñadas se produce emisión de radiaciones.

La ecuación final de las reacciones nucleares representada en la Fig. 472, es la siguiente:



#### 2.- Fisión del plutonio 239.

Esta reacción está representada gráficamente en la figura 473 y es análoga a la fisión, ya explicada, del uranio 235, excepto en el hecho de que, ahora, se liberan tres neutrones en cada fisión. La ecuación es la siguiente.

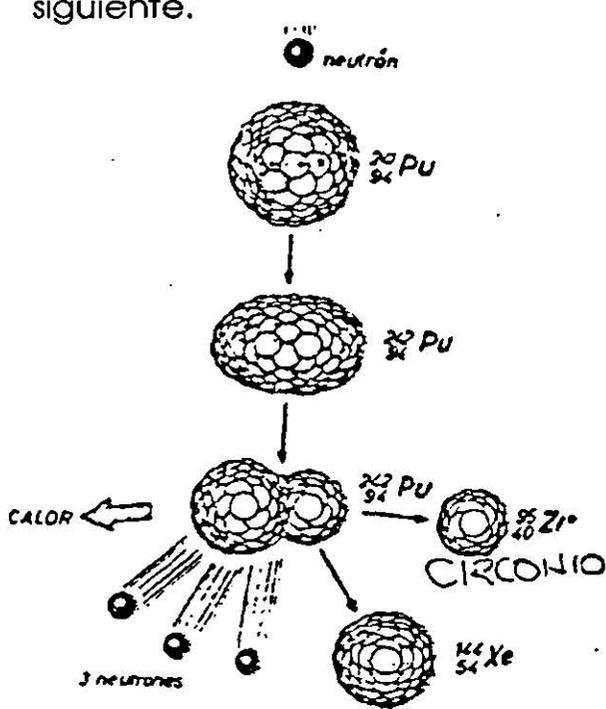


Fig. 473. - Fisión del plutonio 239.

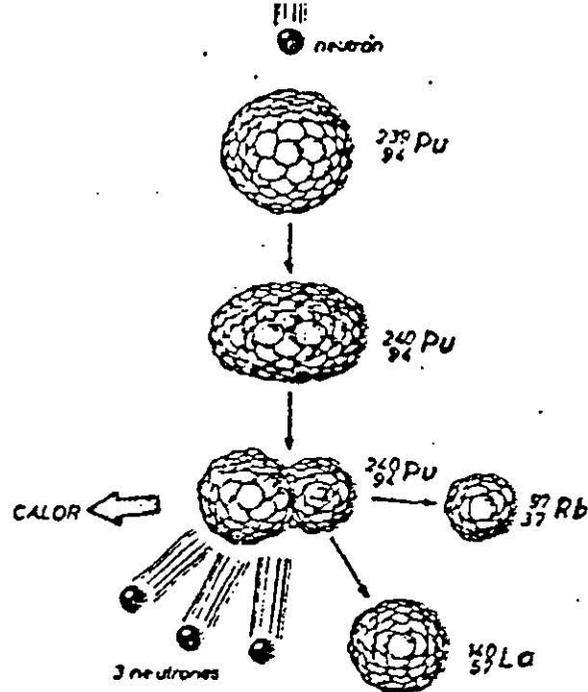
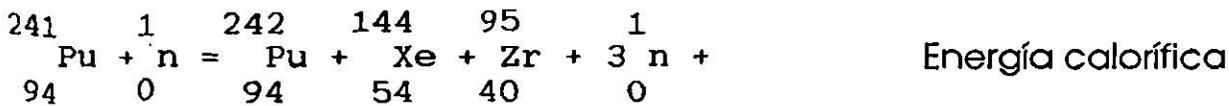


Fig. 474.- Fisión del plutonio 241.

Esta reacción se produce con neutrones lentos y rápidos y por lo tanto el plutonio 239 podrá emplearse como combustible en reactores térmicos y en reactores rápidos.

### 3.- Fisión del plutonio 241

Ya hemos dicho anteriormente que el plutonio 241, que resulta a partir del plutonio 239, por una doble captura de neutrones, es un material fisionable y, por lo tanto, apto para aprovecharse como combustible en los reactores nucleares. La reacción es muy parecida a la del plutonio 239, está representada en la figura 474 y viene expresada por:

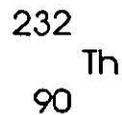


La reacción expresada se produce con neutrones lentos y rápidos por lo que también el plutonio 241 puede emplearse, indistintamente, en reactores térmicos y en reactores rápidos.

Aún nos falta hablar del torio 232 y de su empleo en los reactores nucleares. El torio es mucho más abundante que el uranio, lo que significa una reserva de material nuclear para cuando las existencias mundiales de uranio se hayan agotad. Tiene 232 partículas en su núcleo y 90 electrones orbitales y, por consiguiente, también 90 protones nucleares. Es decir, que el número de neutrones que existe en un núcleo de torio 232 es torio no es directamente fisionable; pero si es un material

$$232 - 90 = 142$$

y la fórmula atómica de este cuerpo

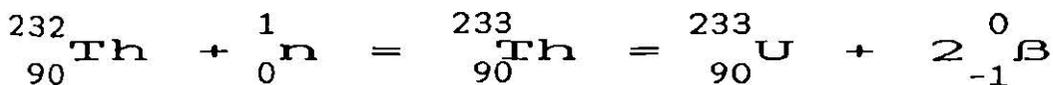


fértil, y a partir de el puede producirse uranio 233, que si es fisionable. Es decir, que las propiedades del torio son muy parecidas a las del uranio 238.

Naturalmente, como el torio no es directamente fisionable, no puede iniciarse una reacción en cadena utilizando solamente este material. Por esta razón, en los reactores nucleares del torio, debe recubrirse este de una capa de uranio 235. De esta forma el uranio 235 aporta los neutrones libres necesarios para las sucesivas fisiones y, a la vez, la energía calorífica que se precisa hasta que la producción de uranio 233, sea suficiente para tener en funcionamiento, por sí mismo, el reactor nuclear.

Veamos como se obtiene uranio 233 a partir del torio 232 (figura 475). Al chocar un neutrón libre con un núcleo de torio 232, se produce un cambio en torio 233, que es inestable y provoca la emisión de una partícula B y la conversión del torio en protactinio 233 que, por ser también inestable, al cabo de poco más de un día, emite otra partícula B, y se convierte en uranio 233.

La reacción final puede representarse así:

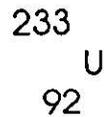


El uranio 233, producido a partir del torio 232, como acabamos de ver, no se encuentra en la naturaleza sino que es un combustible nuclear artificial. Tiene 233 partículas en su núcleo y 92 electrones orbitales y, por

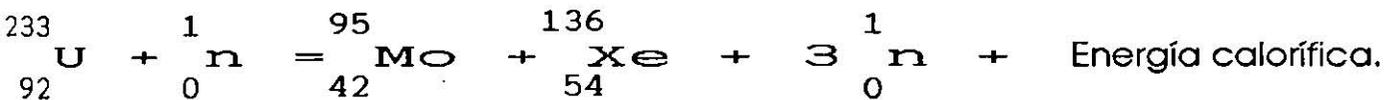
lo tanto, también 92 protones nucleares. El número de neutrones que hay en un núcleo de uranio 233 es

$$233 - 92 = 141$$

y su fórmula atómica



La reacción de fisión del núcleo de uranio 233, y los productos de fisión obtenidos en la misma, están representados en la figura 476. Podemos expresar los procesos inicial y final de la misma, por medio de la siguiente ecuación:



Esta reacción se produce tanto para neutrones lentos como para neutrones rápidos. Por lo tanto, el uranio 233 puede emplearse como combustible nuclear en reactores térmicos y en reactores rápidos.

Recientemente empieza a introducirse como combustible nuclear los cermetos que no son más que ciertos compuestos de uranio aglomerados embebidos en sustancias cerámicas especiales. Se conocen pocos datos aún sobre las características y cualidades de estos materiales.

## CONVERSION Y REPRODUCCION

Hemos visto que, con las reacciones que se realizan en su interior en los reactores nucleares se obtienen dos resultados completamente diferentes y, en cierto modo, complementarios:

- a) Producción de energía calorífica.
- b) Producción de nuevo material combustible.

La producción de energía calorífica depende, esencialmente, de la cantidad de material fisionable existente en el reactor. La producción de nuevo material combustible depende de la cantidad de material fértil.

Existen tres clases de reactores nucleares.

1.- Reactor simple, en los que se busca, ante todo, la producción de energía calorífica. Estos reactores queman uranio natural, con enriquecimiento de uranio 235.

2.- Reactores convertidores, que tienen una función mixta. Utilizan uranio natural y en ellos se transforma en energía calorífica todo el uranio 235 contenido en el uranio natural y, además, convierten una parte del uranio 238, en plutonio 239 para ser utilizado posteriormente en otros reactores adecuados.

3.- Reactores reproductores, cuya misión fundamental es producir materiales fisionables a partir de materiales fértiles; es decir, que la producción de energía calorífica se estima secundaria e, incluso en algunos de estos reactores, se considera perdida. Hemos visto ya que los dos materiales fértiles más importantes son: El uranio 238 y el torio 232. un reactor reproductor contiene una carga inicial de uranio 235 o bien de plutonio 239, rodeada de material fértil. De esta manera, la carga de combustible inicia la reacción en cadena y se transforma el uranio 238 en plutonio 239, en otro caso, el torio 232 en uranio 233.

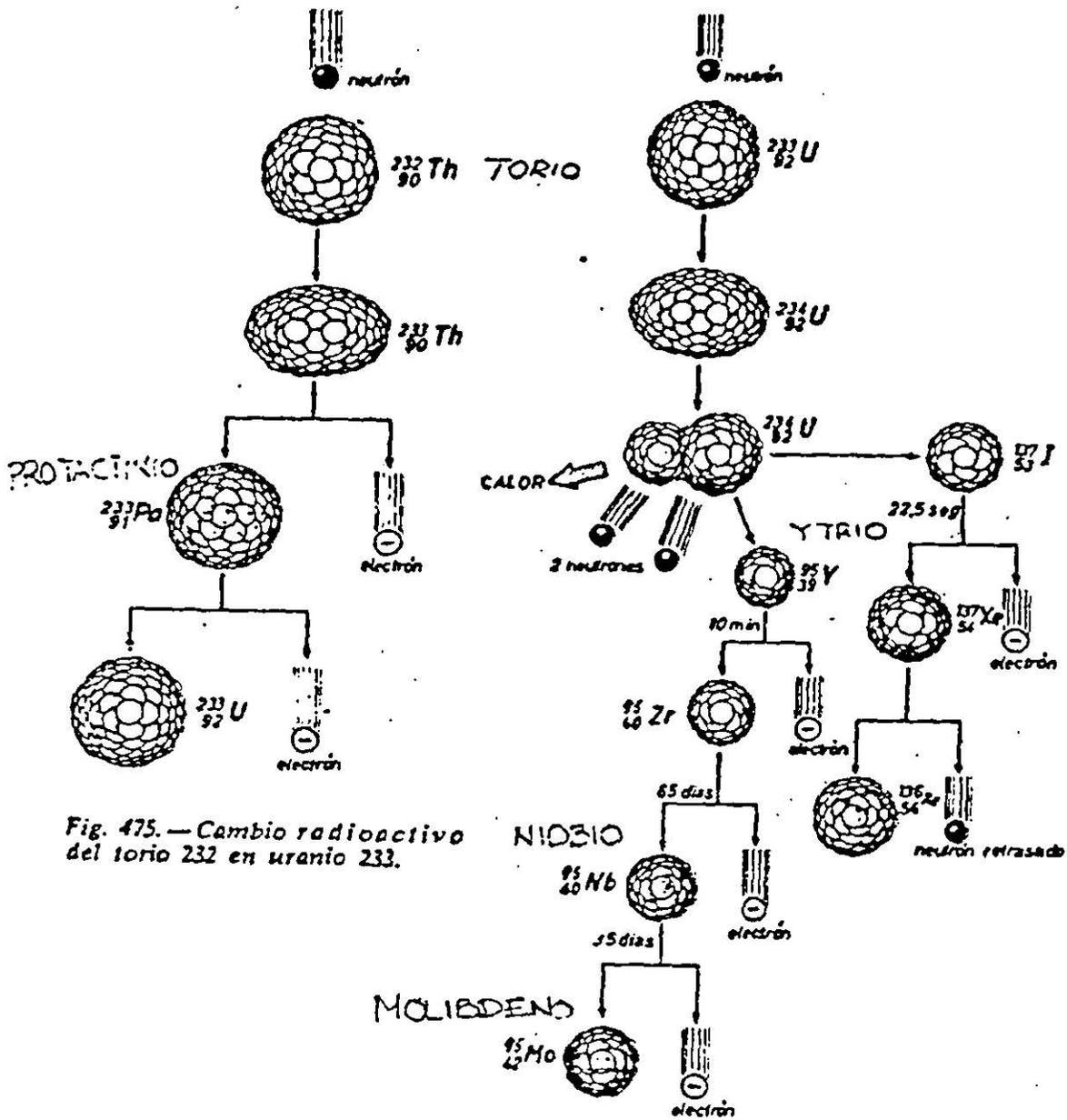


Fig. 475. — Cambio radioactivo del torio 232 en uranio 233.

Fig. 476.- Fisión del uranio 233.

Naturalmente, pueden existir reactores de tipos intermedios. De una manera general, podemos decir que en los reactores convertidores se produce casi tanto combustible como se gasta, y en los reactores reproductores se produce más combustible del que se consume; o sea que, éste último caso es como si en una central térmica de vapor que quemase carbón, resultaran unas cenizas con una cantidad de carbón mayor del que se ha quemado. Veamos un ejemplo:

Supongamos que tomamos 1,000 Kg. de uranio 235 y 993 Kg. de uranio 238. Al iniciarse la combustión nuclear de los 7 Kg. de uranio 235, por cada núcleo de uranio 235 que se rompiese, se producirían, aproximadamente 2.5 neutrones nuevos (es decir, unas veces 2 neutrones y otras 3 neutrones nuevos); de ellos se necesita uno para mantener la reacción en cadena, y quedan disponibles 1.5 más.

Si disponemos los 992 Kg. de uranio 238 alrededor del fuego nuclear del uranio 235, los 1.5 neutrones de repuesto, producidos por la fisión, quedarían capturados por la cubierta de uranio 238 donde producirían 1.5 átomos de plutonio 239, por cada núcleo de uranio 235 que se fisiónase.

Es decir, que cuando los 7 Kg. de uranio 235 se hubieran consumido, obtendríamos

$$7 \times 1.5 = 10.5 \text{ Kg. de plutonio 239.}$$

y una masa resultante de  $993 - 10.5 = 982.5$  Kg. de uranio 238.

Si separamos el plutonio 239 del uranio 238, podemos iniciar una nueva combustión, utilizando los 10.5 Kg. de plutonio como carga inicial del reactor reproductor, y los 982.5 Kg. de uranio, como material fértil. Ahora se obtienen 3 neutrones por cada fisión, o sea, una parte continuar la reacción en cadena y dos más para ser capturados por el uranio 238, produciendo por tanto dos átomos de plutonio 239 por cada átomo desintegrado. Es decir, que a partir de esta carga inicial de 10.5 Kg. de plutonio, obtendríamos

$$10.5 \times 2 = 21 \text{ Kg. de plutonio 239}$$

y aún nos quedaría

$$982.5 - 21 = 961.5 \text{ Kg. de uranio 238.}$$

De esta manera, podríamos ir convirtiendo todo el uranio 238 en plutonio 239. Obtendríamos al final, 1,000 Kg. de plutonio 239 de que

representa una energía calorífica equivalente a la combustión de 3,000,000 de toneladas de carbón.

Claro que estos son razonamientos teóricos. En el estado actual de la técnica nuclear, estos valores son mucho más bajos. Debido a que las cenizas atómicas y los productos de fisión se van acumulando en las barreras de combustible, llega un momento en que se interrumpe la reacción en cadena; esto sucede cuando aproximadamente, se ha consumido un 0.3% del uranio 238 contenido en el reactor. O sea que el rendimiento real vienen a ser en los reactores simples de uranio natural (no reproductores) de 1 Kg. de uranio equivalente a 10,000 Kg. de carbón.

Ahora bien, en los reactores, se separa como hemos visto, el plutonio resultante, que puede emplearse en el mismo reactor de esta manera, se estima que el 1% del uranio natural contenido puede aprovecharse. O sea que cada Kg. de uranio 238 equivale ahora a 30,000 Kg. de carbón.

En un futuro próximo se espera llegar a un rendimiento doble; es decir 1Kg. de uranio 238 equivalente a 60,000 Kg. de carbón. Y el tope práctico que espera obtenerse en un futuro, aún muy lejano, es de 1 Kg. de uranio 238 equivalente a 1,000,000 de Kg. de carbón.

## REACTORES NUCLEARES

### *Tipos de reactores nucleares*

A lo largo de nuestra explicación, hemos podido ya apreciar cuántos y cuán diversos tipos de reactores pueden preverse. Para clasificar todos estos tipos, vamos a reunir todo lo dicho hasta ahora, poniendo orden en nuestra explicación. Como criterio de clasificación adoptaremos los siguientes:

- a).- por el tipo de combustible (uranio 233, plutonio)
- b).- por el material fértil utilizado (torio, uranio 238)
- c).- por el refrigerante (agua, agua pesada, metal líquido)
- d).- por el moderador (agua, grafito, agua pesada, etc.)
- e).- por la naturaleza del combustible (homogéneo o heterogéneo)
- f).- por la energía de los neutrones (reactores lentos, reactores rápidos)
- g).- por la finalidad (reactores simples, reproductores)

Hemos estudiado anteriormente todos estos tipos de reactores quedando solamente por explicar que se entiende por reactores heterogéneos y reactores homogéneos.

Casi todos los reactores existentes en la actualidad son reactores heterogéneos; en ellos, los elementos de combustible están aislado entre sí, tal como hemos visto en los ejemplos descritos hasta ahora. En los reactores homogéneos, el combustible es una pasta del sulfato de uranio, óxido de el combustible es una pasta del sulfato de uranio, óxido de uranio, aleación uranio - bismuto, etc..., introducida en una caldera; esta pasta sirve, a la vez, como combustible, como moderador y como refrigerante. Solamente puede utilizarse combustible enriquecido. Estos reactores están actualmente en estudio y solamente se han construido de pequeñas potencias, con fines experimentales.

El conjunto de todos los criterios a seguir para una clasificación de los reactores nucleares queda expresado en la siguiente tabla.

## CRITERIOS DE CLASIFICACION DE LOS REACTORES NUCLEARES

COMBUSTIBLE.- Uranio 233

Uranio 235.- Plutonio 239.

MATERIAL FERTIL.- Torio 232.

Uranio 238.

REFRIGERANTE.- Anhídrido

Carbónico.- helio.- Agua.

Agua pesada - Bencina difenilo

Sodio - Potasio - Aleación sodio

potasio, Aleación plomo bismuto.

- Litio - Galio.

MODERADOR.- Agua

Agua pesada.- Grafito.- Berilio

NATURALEZA DEL COMBUSTIBLE.-

Homogéneos.- Heterogéneos.

ENERGIA DE LOS NEUTRONES.

Lentos - Rápidos.

Finalidad.- Simples - Convertidores

Productores

Si a partir del cuadro anterior, intentamos una clasificación, observaremos que el número teórico de reactores nucleares distintos que pueden existir es de,

$$3 \times 2 \times 13 \times 4 \times 2 \times 2 \times 3 = 3,744$$

Ya hemos dicho que este es un número teórico; en la realidad, y por diversas causas, muchos de estos tipos de reactores son irrealizables; por ejemplo, un reactor de neutrones rápidos no puede utilizar agua ordinaria como refrigerante, a partir del uranio 238 como material fértil se obtiene siempre uranio 235 como combustible, etc...además, existen todavía dificultades técnicas que no permiten la realización de muchos tipos de reactores nucleares.

Por todo lo dicho en el párrafo anterior, vemos que, en la práctica el número de combinaciones posibles se reduce mucho; se calcula en unos 100, los reactores nucleares distintos que pueden realizarse con los medios técnicos actuales. Naturalmente, nosotros no podemos describir aquí todos los reactores; describiremos, sin embargo, los 8 tipos siguientes, que podemos considerar características:

- a) Reactor de agua en ebullición
- b) Reactor de agua a presión
- c) Reactor refrigerante por gas
- d) Reactor refrigerante por aire
- e) Reactor de agua pesada
- f) Reactor de sodio - grafico
- g) Reactor reproductor
- h) Rector Homogéneo

## **REACTOR DE AGUA EN EBULLICIÓN**

El tipo de reactor nuclear más sencillo de concepción y de realización es el reactor de agua en ebullición representado. El agua natural, debidamente purificada, se utiliza como moderador y como refrigerante; el combustible ha de ser uranio 238 enriquecido con uranio 235, pues con el uranio natural no puede producirse la reacción en cadena, tal como hemos explicado en el capítulo anterior.

El agua hierve en el mismo reactor, y el vapor producido se introduce directamente en una turbina de vapor, que acciona un generador eléctrico. El vapor de salida de la turbina, pasa por un condensador, donde se transforma nuevamente por medio de una bomba centrífuga.

El vapor, producido directamente en el reactor, es radioactivo; por lo tanto, la protección biológica a base de hormigones especiales y plomo, necesaria en todos los reactores nucleares, debe extenderse de aquí a todo el circuito de agua, que comprende la turbina de vapor, el condensador, la bomba centrífuga y las tuberías correspondientes. Este es el mayor inconveniente de este reactor pues se hace difícil la revisión y reparación del circuito de agua.

El reactor de agua hirviente es, hasta cierto límite, autoregulatorio: cualquier aumento accidental de temperatura provoca una disminución de la energía producida, entre otras razones, por la formación de burbujas de vapor. Esta es una ventaja de este tipo de reactores, que hay que tener en cuenta.

En España, la central nuclear de Santa María de Garoña, de 460 MVA utiliza este tipo de reactor. En el extranjero, las más importantes centrales nucleares con reactores de agua hirviente, son las de Dresden en Illinois (EEUU) de una potencia de 180 MVA que utiliza uranio enriquecido al 1.5% como combustible, la de Villigen en Suiza, de una potencia de 20 MVA y la Oulianovsk en la URSS, cuya potencia es de 50 MVA.

## **REACTOR DE AGUA A PRESION**

El mayor inconveniente del reactor de agua hirviente, es decir, la radioactividad del circuito de agua, queda solucionado en el reactor de agua a presión. El refrigerante es agua a gran presión (por ejemplo, 40 atmósferas y más) y el moderador puede ser esta misma agua, o grafito; el combustible de uranio 238, enriquecido con uranio 235.

Ya sabemos que el agua sometida a grandes presiones puede llegar a evaporarse sin ebullición, y a temperaturas mayores de 100°C. En el reactor que estamos describiendo, se aprovecha esta circunstancia; el vapor producido, a unos 600°C, pasa por un cambiador de calor para volver, después de enfriado y condensado, al reactor nuclear. En el circuito secundario del cambiador de calor, se produce vapor de agua, que se inyecta en una turbina que, a su vez acciona un generador eléctrico.

Como los dos circuitos de agua son independientes, solamente el cambiador de calor ha de protegerse; la turbina de vapor queda libre de radioactividad y, por lo tanto, no es necesaria la protección biológica más que en el circuito del reactor.

Como ejemplo de centrales nucleares con reactores de agua a presión, podemos citar la de Shippingport en Pensylvania (EEUU) de 90 MVA, la de Vallegrande en Italia, de 160 MVA, la de Troitsk en la URSS de 600 MVA, y en España la central de Zorita, de 153 MVA.

## **REACTORES REFRIGERADOS POR GAS**

Los reactores estudiados hasta ahora (de agua hirviente y de agua a presión), tienen limitada su temperatura de funcionamiento y, por lo tanto, su rendimiento técnico. Se puede conseguir más elevadas temperaturas y, por consiguiente mejor rendimiento, con el reactor refrigerante por gas.

Como moderador se utiliza, generalmente, el grafito puro, y como refrigerante, el anhídrido carbónico o el helio, aunque casi todas las centrales nucleares actuales emplean el primero de estos cuerpos. Como combustible, puede emplearse el uranio natural, o el uranio enriquecido.

El gas contenido en el interior del reactor, a la presión de unas 7 atmósferas, se calienta hasta 400°C aproximadamente y se hace pasar por el circuito primario de un cambiador de calor, para reinyectarse después en el reactor; por el circuito secundario del cambiador de calor circula el agua, que ha de accionar en forma de vapor, la turbina correspondiente. Debido a la poca radioactividad del anhídrido carbónico (o del helio, en su caso), el cambiador de calor puede instalarse sin protección biológica.

Casi todos los programas europeos de construcción de centrales nucleares, están basadas en el reactor refrigerado por gas. El ejemplo más característico es la ya famosa central nuclear de Calder Hall, en

Inglaterra, con 152 MVA de potencia; la central nuclear de Hunterston, de 300 MVA, también tiene los reactores de este tipo. Y podríamos citar, además, las centrales de Chapelcross (152 MVA), Berkelye (275 MVA) Bardwell (300 MVA) en Hinkley pont (500 MVA), en Inglaterra, las centrales G-2 y G-3 de Marcole (30 MVA) en Francia, la central Latina (200 MVA) en Italia y la central de Tokai Mura (150 MVA) en Japón.

### **REACTOR REFRIGERADO POR AIRE**

La central G-1 de Marcoule, en Francia está refrigerada por aire en circuito abierto, es decir, sin recirculación. El aire previamente filtrado, se introduce en el reactor (de construcción horizontal), y tras de pasar por el cambiador de calor, se escapa a la atmósfera por una chimenea alta, después de atravesar varios filtros donde quedan retenidos los materiales radioactivos: el inconveniente de esta disposición, es que hay que vigilar constantemente el índice de radioactividad de la atmósfera en los alrededores de la central.

### **REACTOR DE AGUA PESADA**

Así como el programa nuclear en Europa está basado en el reactor refrigerado por gas y moderado con grafito, el programa de construcción de centrales nucleares en Canadá se basa, esencialmente en el reactor de agua pesada (figura 495), que vamos a describir a continuación.

Como moderador se utiliza siempre agua pesada; como refrigerante puede utilizarse también agua pesada o gas, como combustible se emplea siempre el uranio natural. En el reactor en la figura 495 se utiliza agua pesada como refrigerador y agua pesada en atmósfera de helio como moderador de neutrones, tanto el helio como el moderador de neutrones; tanto el helio como el moderador se hacen recircular, refrigerándolos convenientemente (estos circuitos de recirculación no están representados en la figura). El agua pesada que actúa como refrigerante, se hace pasar por un cambiador de calor cuyo circuito secundario es atravesado por el agua, que se inyectará en la turbina en forma de vapor.

Como ejemplo de centrales nucleares como reactores de agua pesada, podemos citar la central canadienses de Des Joachims, en Ontario del Sur (20 MVA), la central norteamericana de Florida (50 MVA) y la central checa de Cohunice, en Eslovaquia (150 MVA)

## REACTOR DE SODIO - GRAFITO

Ya hemos hablado en un capítulo anterior de las propiedades refrigerantes del sodio. El reactor de sodio-grafito (figura 496), utiliza este metal líquido como refrigerante y el grafito como moderador; como combustible, se ha de emplear el uranio enriquecido. Este reactor tiene mejor rendimiento que los explicados hasta ahora.

El sodio es muy radioactivo y debe evitarse el contacto con el agua de la turbina de vapor, para ello, el sodio se hace pasar por un cambiador de calor intermedio para cuyo circuito secundario para una aleación líquida de sodio y potasio, que actúa como agente transmisor de calor en el cambiador final de calor, cuyo circuito secundario es atravesado por el agua de la turbina.

El sodio y la aleación sodio-potasio no son líquidos fáciles de manejar. Para conseguir una circulación continua de los mismos, se emplean bombas electromagnéticas, cuyo fundamento es parecido al de los motores de inducción: solamente que aquí, se consigue un movimiento longitudinal del sodio líquido (de la aleación sodio - potasio) mediante la acción combinada de campos magnéticos intensos y corrientes inducidas.

Los reactores de sodio - grafito están en un período avanzado de estudio; aunque ya se han construido varios reactores de experimentación, hasta la fecha; solamente existen 3 reactores industriales en todo el mundo; uno de 75 MVA en Hallam (Nebraska-EEUU), otro de 90 MVA en Lagoona Beach (Michigan EEUU y otro de 50 MVA en Oulianavsk (URSS)

## REACTOR REPRODUCTOR RAPIDO

Ya hemos dicho en anteriores ocasiones que el reactor reproductor está destinado a transformar, el material fértil en material combustible, considerándose secundaria la producción de calor para su posterior transformación de energía eléctrica; estos reactores producen mayor cantidad de combustible de la que consumen.

Constan; de un núcleo combustible de uranio 235, rodeado de varias capas de material fértil, constituido por uranio 238; en el material fértil se va produciendo plutonio 239 que, posteriormente, se empleará en el núcleo para producir aún más plutonio. Otras veces el material fértil es torio 232 y entonces se produce, como material combustible, el uranio 233 que, posteriormente, sustituirá en el núcleo al uranio 235. En ambos casos, el exceso de materiales combustibles producidos (plutonio 239 y Uranio 233) se emplearán después en centrales nucleares para la producción de energía eléctrica.

Los reactores reproductores son 'rápidos' es decir, que carecen de moderador, los neutrones se utilizan, para posteriores fisiones, a la velocidad que llevan como consecuencia de producirse la primera fisión. Por esta razón, necesitan combustible nucleares muy ricos en material fisible (uranio 235 o plutonio 239) ya que, a causa de la elevada velocidad de los neutrones, las probabilidades de nuevas fisiones al chocar con otros núcleos son escasas y deben compensarse con una gran masa de material fisible.

Como material refrigerante se utiliza, generalmente, el sodio líquido, de la misma manera que en los reactores de sodio-grafito, por lo que no insistimos más sobre esta cuestión.

Más aún que los reactores de sodio-grafito, los reactores reproductores rápidos están todavía en período experimental. Además hasta que no haya producido material combustible en suficiente cantidad (primero uranio 235 y posteriormente plutonio 239), no podrán construirse reactores reproductores de gran potencia. Actualmente, solamente hay 3 reactores reproductores en el mundo, todos experimentales, que son, respectivamente, el NRTS en Idaho (Estados Unidos), de 15 MVA, el de Dounreay en Escocia, de 15 MVA, y el de Oulianovsk, en la URSS, de 50 MVA (no debe confundirse con el reactor de sodio-grafito, antes citado, en la misma localidad).

## REACTOR HOMOGÉNEO

Los reactores estudiados hasta ahora son heterogéneos. El reactor homogéneo (figura 498) utiliza una pasta fluída de sulfato de uranio o de solución de uranio al 1% en bismuto líquido, esta.

En la construcción de las centrales nucleares francesas se tiene también a los reactores moderados con grafito y refrigerados con gas (aire o anhídrido carbónico) El centro nuclear francés de Marcoule es un complejo industrial en el que se realiza una producción mixta de plutonio y de energía eléctrica, en reactores de los que hemos denominado "breeders". Marcoule consta de tres reactores denominados G1, G2, G3 de los que G1 es de pequeña potencia (40,000 KW) refrigerado por aire y destinado a la producción de energía eléctrica; los otros dos reactores producirán plutonio y suministrarán, simultáneamente, energía eléctrica. Vease en la figura 507 una vista de conjunto de reactor G1 y en la figura 508 el pupitre de control nuclear de la misma central.

La figura 509 es una vista general de los reactores G2 y G3, y la figura 510 representa el reactor G2.

Otro centro nuclear francés es el de Chinon, donde se han construido las centrales nucleares denominadas EDF1, EDF2, y EDF3, moderadas con grafito y refrigeradas con anhídrido carbónico.

En 1966 los franceses pusieron en funcionamiento la central nuclear EDF4 en Saint-Laurent-des Faux de una potencia de 400,000 Kw, moderada con grafito y refrigerada con anhídrido carbónico, y cuya particularidad más interesante es que los cambiadores de calor están situados bajo el reactor, formando un bloque compacto con él, tal como puede apreciarse en el dibujo de la figura 511, que es un corte longitudinal de esta central.

En Estados Unidos la tendencia es utilizar como combustible el uranio enriquecido (en lugar de uranio natural o débilmente enriquecido de los reactores europeos) y el agua a presión o el agua hirviente como refrigerante y moderador. Modernamente, se han instalado en Santa Susana (California) y en Hallam (Nebraska) sendos reactores de sodio-grafito y en la central nuclear EBR2 de Idaho, ha entrado recientemente en funcionamiento un reactor rápido, sin moderador, y refrigerado con sodio.

También se han construido en Estados Unidos, reactores moderados con grafito y refrigerados con gas, reactores de agua pesada, reactores de líquido orgánicos, etc...

Veamos en la figura 512 un aspecto general de la central de Shippingport (Pennsylvania) de 60,000 KW de potencia, cuyos reactores están moderados y refrigerados con agua a presión. La figura 513 representa el aspecto exterior de la central nuclear de Desden (Illinois) de 180.000 KW de potencia, provista de un sólo reactor, moderado y refrigerado con agua hirviente; por lo tanto, en esta central, el grupo turbina generador ha de recibir también protección biológica, puesto que la radioactividad del reactor se transmite a la turbina. En la parte derecha de esta figura, puede verse la gran esfera metálica que contiene el reactor.

## **CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS**

Actualmente, hay en España tres centrales nucleares en funcionamiento o en avanzado estado de construcción: Zorita de los Canes, Santa María de Garoña y Vandellós.

La central de Zorita de los Canes (figura 514) está en la provincia de Guadalajara, en las proximidades de los grandes embalses de Entrepeñas y Buendía, y ha sido construido por Unión Eléctrica Madrileña. Está ya en marcha un grupo cuya potencia eléctrica neta es de 153 KW, y más adelante se pondrá en funcionamiento el segundo grupo, de 350 KW, con lo que la potencia total instalada será de 503 KW.

El combustible de esta central es uranio enriquecido al 3.15%, el grupo en funcionamiento tiene una carga de combustible de 17 toneladas. El reactor nuclear es de agua a presión.

En 1970 se puso en funcionamiento la central de Santa María de Garoña, en la provincia de Burgos, situada en una Zona completamente despoblada a 70 Km. de Bilbao. Tendrá una potencia de 460 kW, en un sólo grupo, constará de un reactor de agua en ebullición y utilizará como combustible, el uranio enriquecido al 2.5% con un peso total de uranio de 78,800 Kg. para su construcción y explotación se ha formado la sociedad CENTRALES NUCLEARES DEL NORTE (NUCLENOR), constituida paritariamente por IBERDUERO y por ELECTRA DE VIESGO.

En 1972 se pondrá en servicio la central nuclear de Vandellós, en la provincia de Tarragona, con una potencia eléctrica neta de 480 MW.

El reactor nuclear utilizará 450,000 KG. de uranio natural como combustible, moderado con grafito puro (2,680 toneladas), y refrigerado con anhídrido carbónico (185 toneladas). El diseño de esta central es semejante al de la central francesa de Saint Laurentdes Eaux.

Para la construcción y explotación de la central nuclear de Vandellós se ha constituido una sociedad mixta hispano-francesa la HISPANO-FRANCESA DE ENERGIA NUCLEAR, S.A. (HIFRENSA), en las que participan:

Electricite de France	25%
Empresa NAcional Hidroeléctrica del Ribargozana	23%
Fuerzas Eléctricas de Cataluña, S.A.	23%
Hidroeléctrica de Cataluña, S.A.	23%
Fuerzas Hidroeléctricas del Segre	6%

En lo que se refiere a centrales nucleares en proyecto, HIDROELECTRICA ESPAÑOLA constituirá en IStá (Castellón) una central de 300 a 500 MW y CENTRALES NUCLEARES, S.A. ha solicitado autorización para la construcción de dos centrales de 300 MW, una sobre el río tajo y otra sobre el río Guadalquivir.

Para un futuro, ya más lejano, está en proyecto la construcción de una serie de centrales nucleares que habrá de ir completando en su labor a las hidráulicas porque habrá llegado a su límite la potencia instalada en nuestros ríos.

De forma que, en el porvenir, las centrales térmicas y nucleares constutirán, sobre todo, éstas últimas los elementos de base de la producción eléctrica española mientras que las centrales hidráulicas actuarán como centrales de reserva para las horas punta; por esta razón y tal como dijimos en su moemtno han comenzado ya a construirse grandes centrales hidráulicas de acumulación en donde la energía sobrante en las horas de baja demanda puede acumularse para tenerla disponible en las horas de máxima demanda.

Debido al elevado costo de las centrales nucleares, muchas veces se agrupan varias empresas para su construcción y posterior explotación. Así se han constituido las sociedades Nuclenor e Hifrensa y otras que se formarán en el futuro.

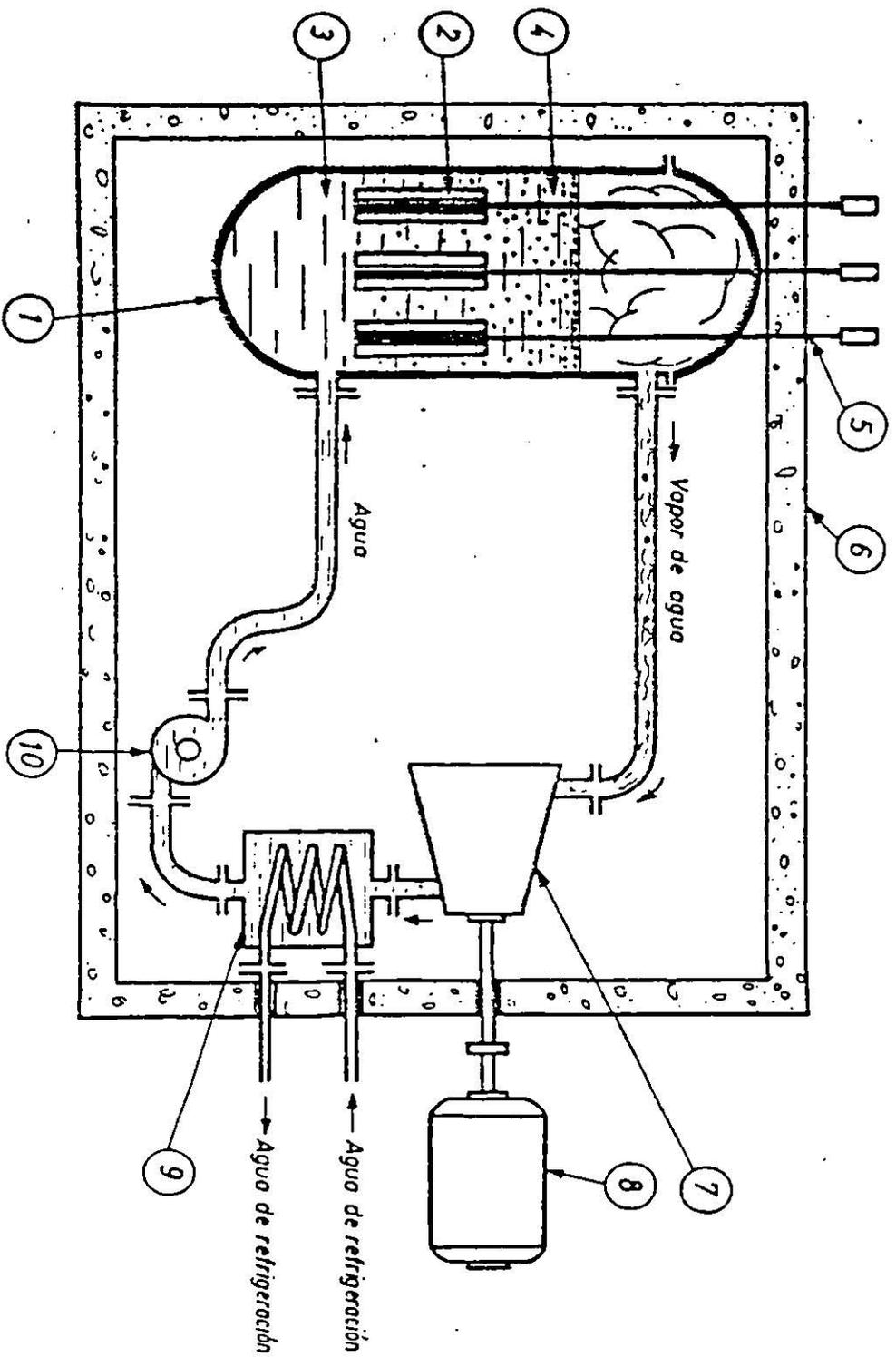


Fig. 491.- Reactor de agua hirviente: 1.- Cuerpo del reactor. 2.- Combustible (uranio enriquecido). 3.- Moderador (agua natural). 4.- Refrigerante (agua natural). 5.- Varillas de regulación. 6.- Protección biológica. 7.- Turbina de vapor. 8.- Generador eléctrico. 9.- Condensador. 10.- Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina.

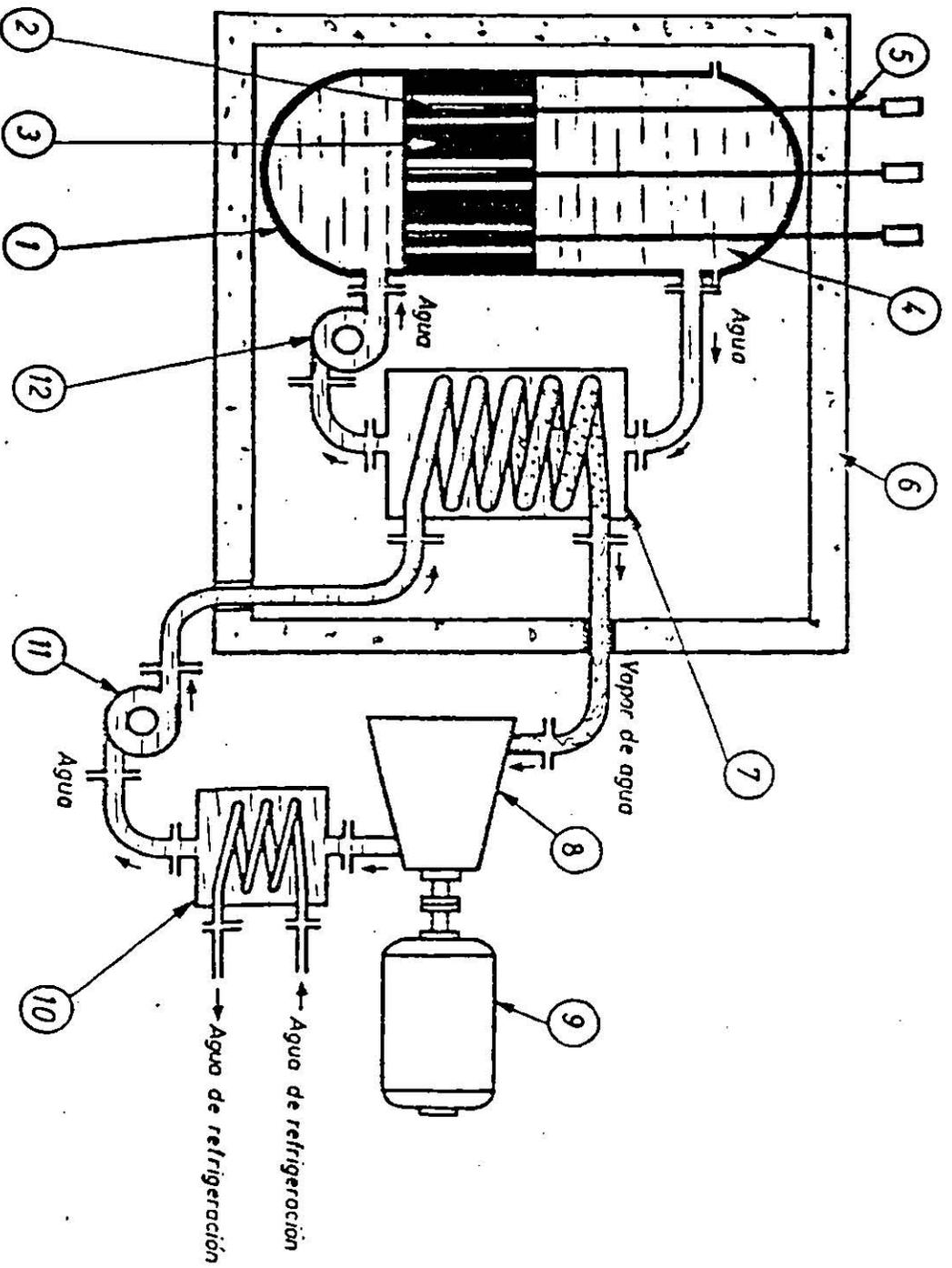


Fig. 492.- Reactor de agua a presión: 1.- Cuerpo del reactor. 2.- Combustible (uranio enriquecido). 3.- Moderador (grafito). 4.- Refrigerante (agua a 42 atmósferas). 5.- Varillas de regulación. 6.- Protección biológica. 7.- Cambiador de calor. 8.- Turbina de vapor. 9.- Generador. 10.- Condensador. 11.- Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina. 12.- Bomba Centrífuga de recirculación de refrigerante.

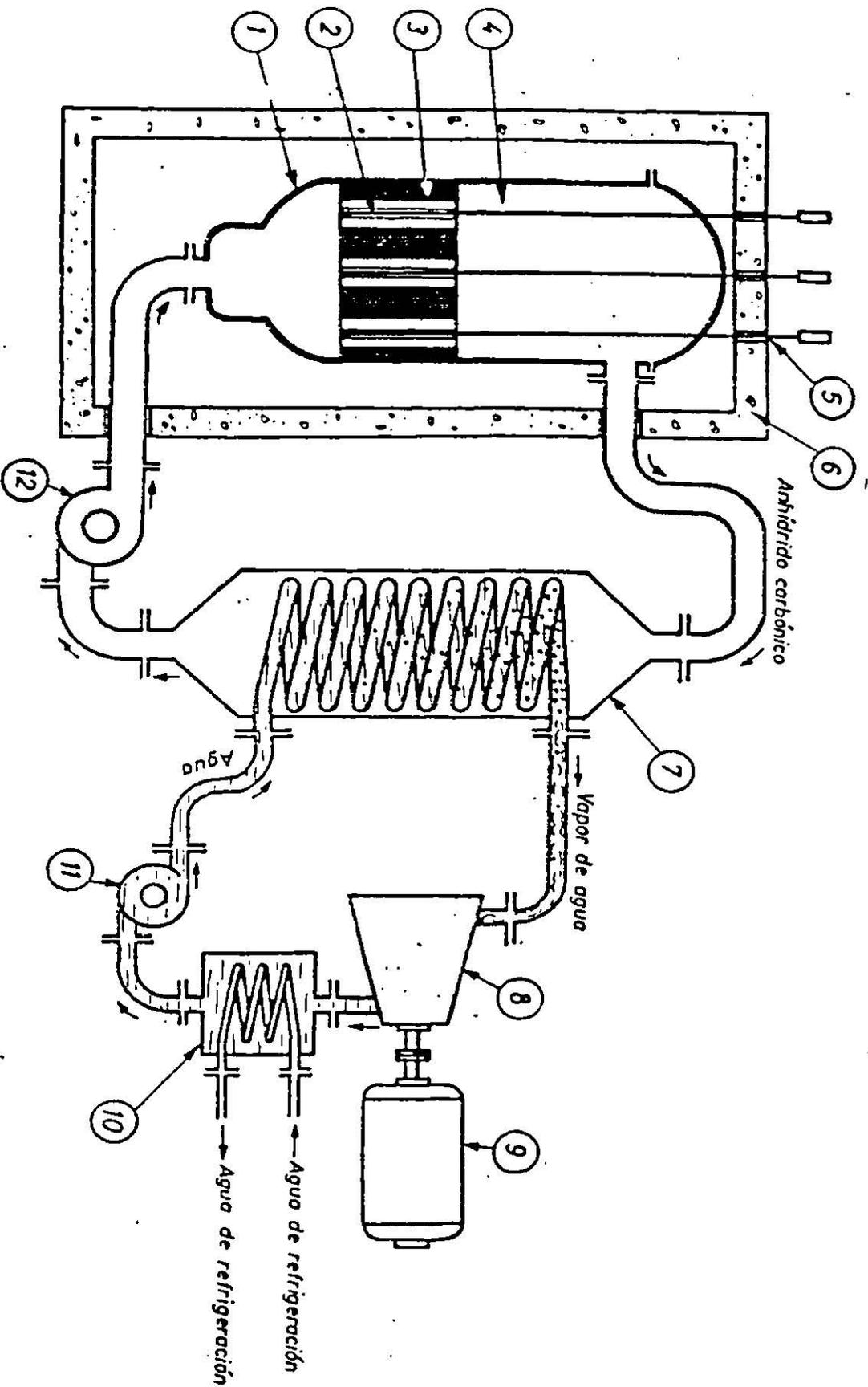


Fig. 493.- Reactor refrigerado por gas: 1.- Cuerpo del reactor. 2.- Combustible (uranio natural). 3.- Moderador (grafito) 4.- Refrigerante (anhídrido carbónico a 7 atmósferas). 5.- Varillas de regulación. 7.- Protección biológica. 7.- Cambiador de calor. 8.- Turbina de vapor. 9.- Generador eléctrico. 10.- Condensador. 11.- Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina. 12.- Impulsor centrífugo de gas refrigerante.

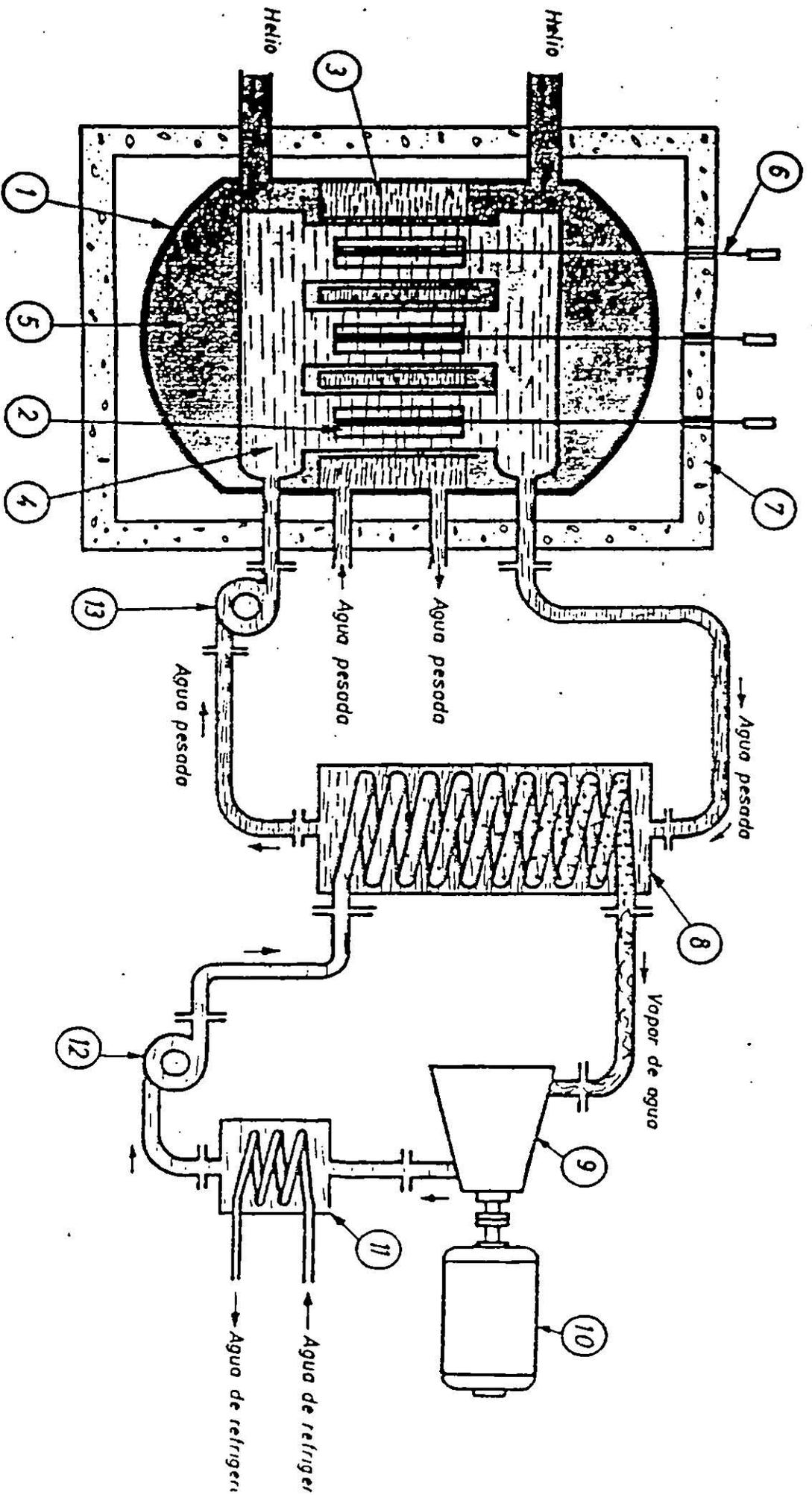


Fig. 495.- Reactor de agua pesada: 1.- Cuerpo del reactor. 2.- Combustible (uranio natural). 3.- Moderador (agua pesada). 4.- Refrigerante (agua pesada) 5.- Atmósfera de helio. 6.- Varilla de regulación. 7.- Protección biológica. 8.- Cambiador de calor. 9.- Turbina de vapor. 10.- Generador eléctrico. 11.- Condensador. 12.- Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina. 13.- Bomba centrífuga de recirculación del refrigerante.

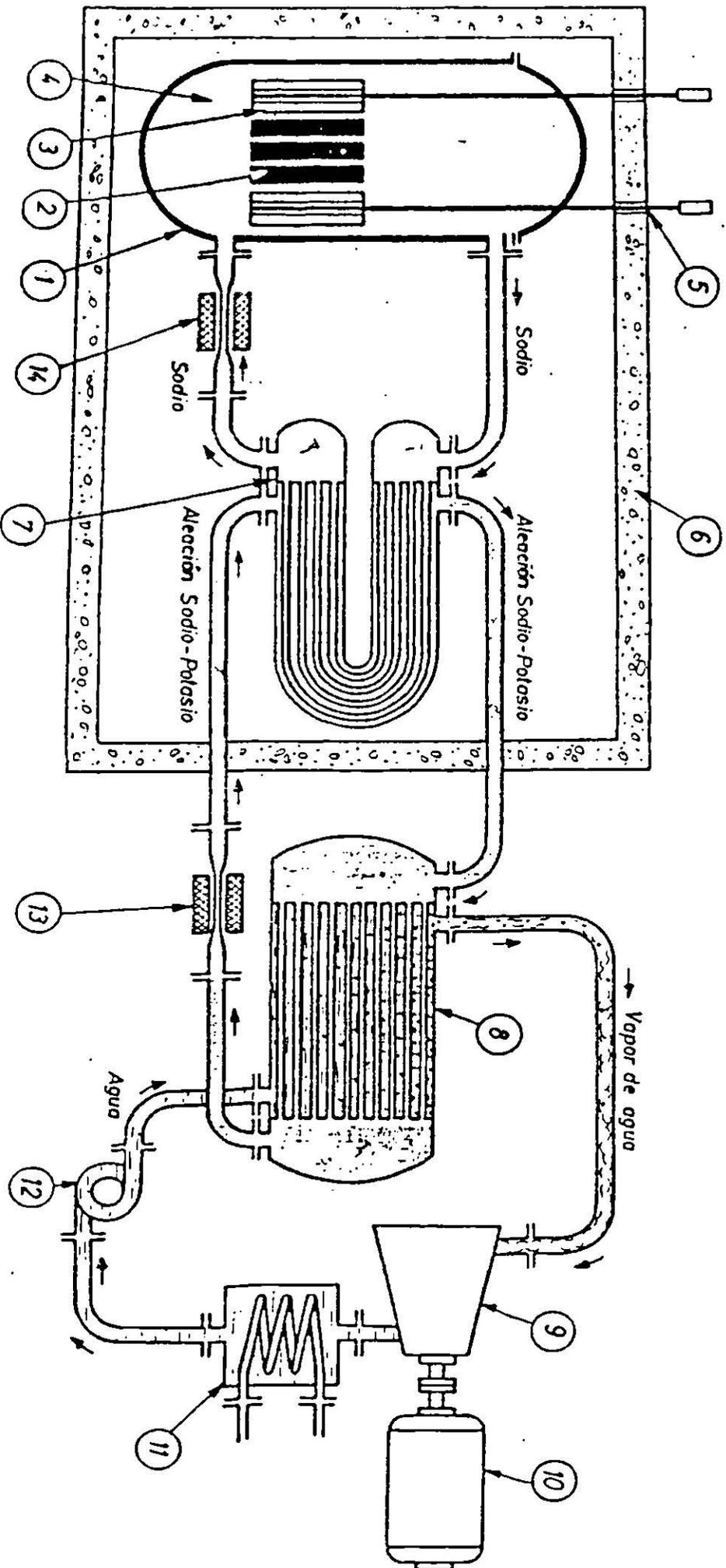


Fig. 497.- Reactor reproductor rápido: .- Cuerpo del reactor. 2.- Núcleo de combustible de uranio 235. 3.- Capas exteriores de combustible, de uranio 238. 4.- Refrigirante (sodio) 5.- Varillas de regulación. 6.- Protección biológica. 7.- Cambiador de calor intermedio. 8.- Cambiador de calor final. 9.- Turbina de vapor. 10.- Generador eléctrico. 11.- Condensador. 12.- Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina. 13.- Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio. 14.- Bomba electromagnética para refrigerante (sodio).

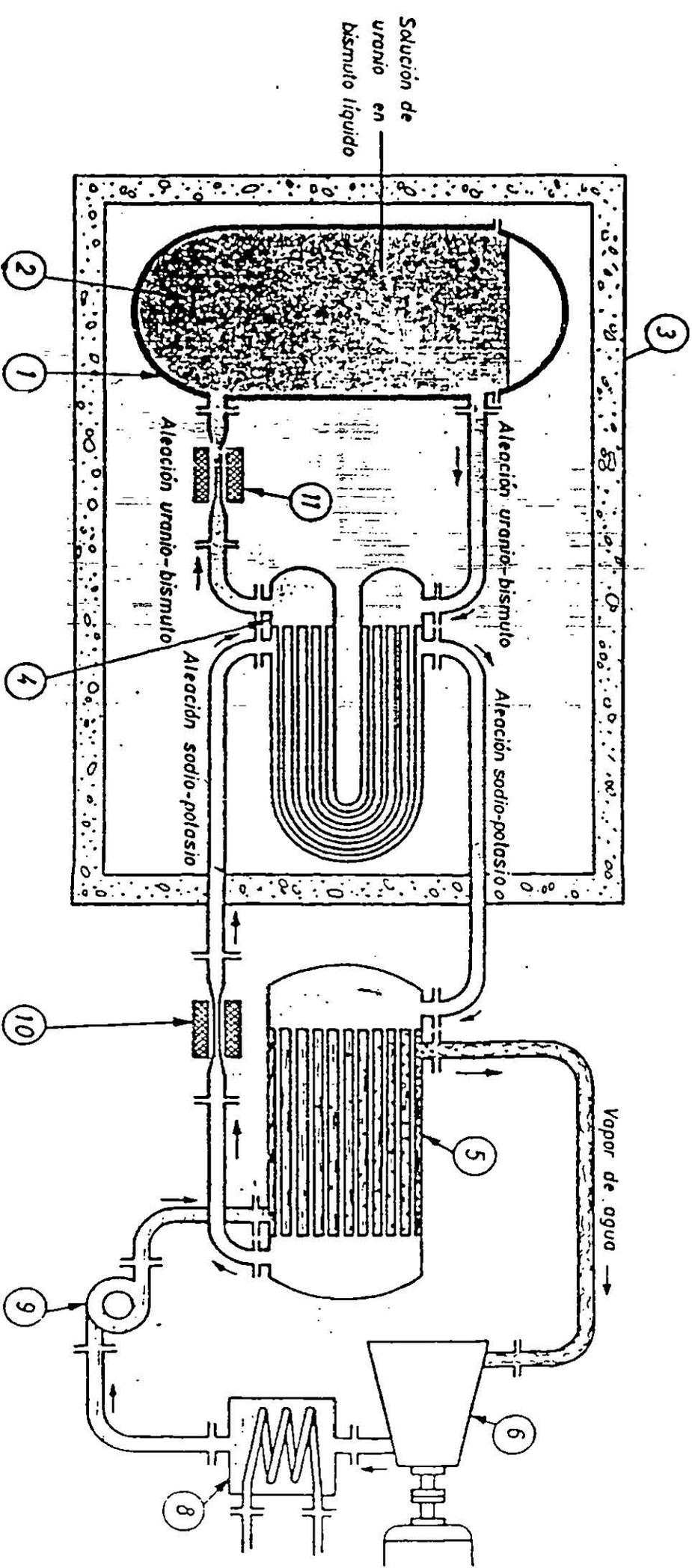


Fig. 498.- Reactor homogéneo. 1.- Cuerpo del reactor. 2.- Solución de uranio al 1% en bismuto líquido (combustible y refrigerante) 3.- Protección biológica. 4.- Cambiador de calor intermedio. 5.- Cambiador de calor final. 6.- Turbina de vapor. 7.- Generador eléctrico. 8.- Condensador. 9.- Bomba de recirculación del agua de la turbina. 10.- Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio. 11.- Bomba electromagnética para refrigerante (aleación uranio-bismuto).

