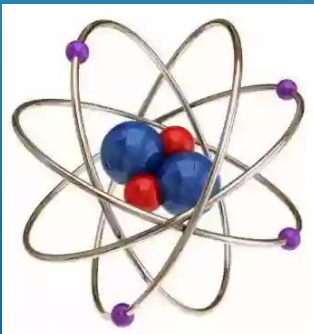


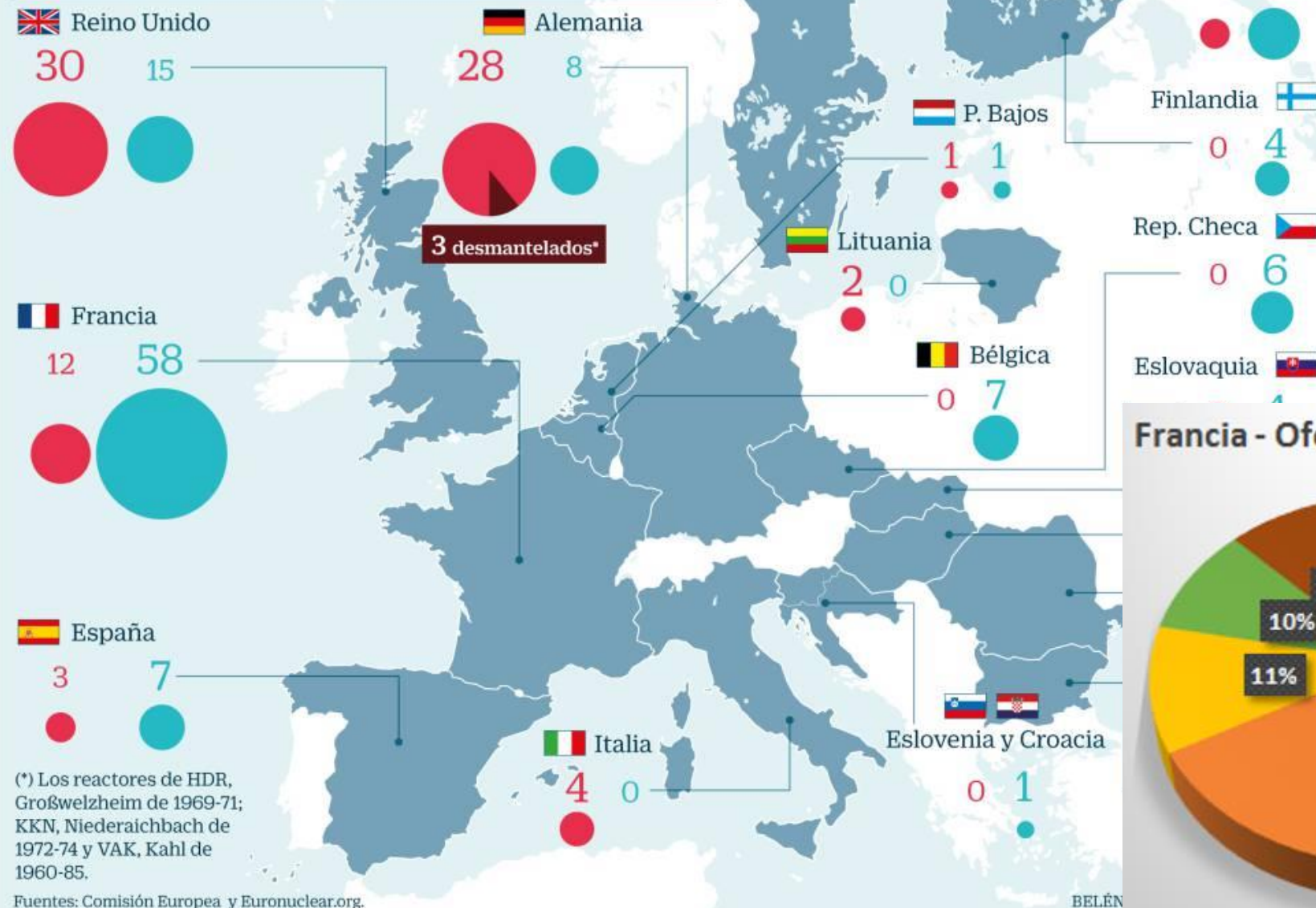
UNIDAD: 2-2, COMBUSTIBLE NUCLEAR - ENERGÍA

La **energía nuclear** es la **energía** contenida en el núcleo de los átomos. La **energía nuclear** se utiliza en múltiples aplicaciones, pero la aplicación más conocida es la generación de energía eléctrica.



Reactores nucleares en Europa

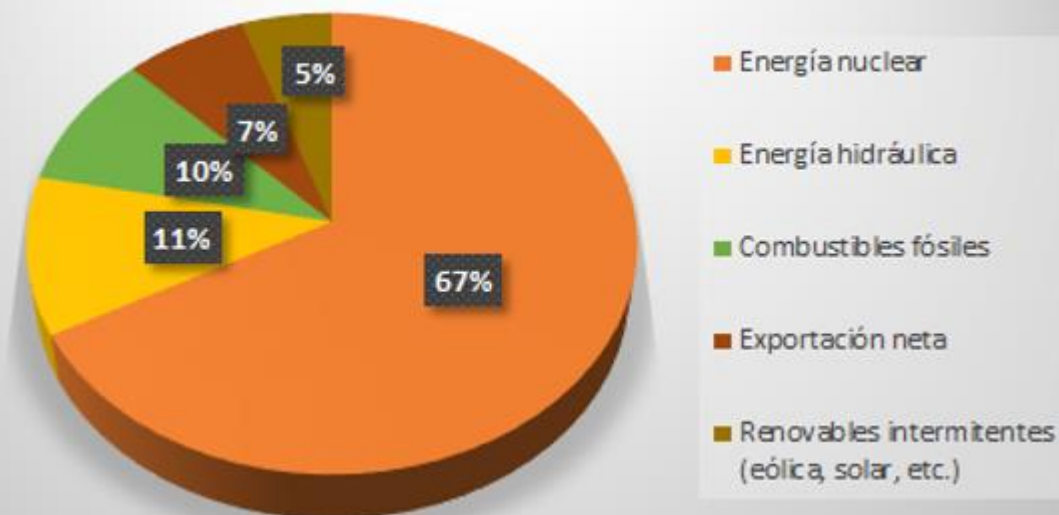
 **CERRADOS** Total **90**  **FUNCIONANDO** Total **128**



(*) Los reactores de HDR, Großwelzheim de 1969-71; KKN, Niederaichbach de 1972-74 y VAK, Kahl de 1960-85.

Fuentes: Comisión Europea y Eurónuclear.org.

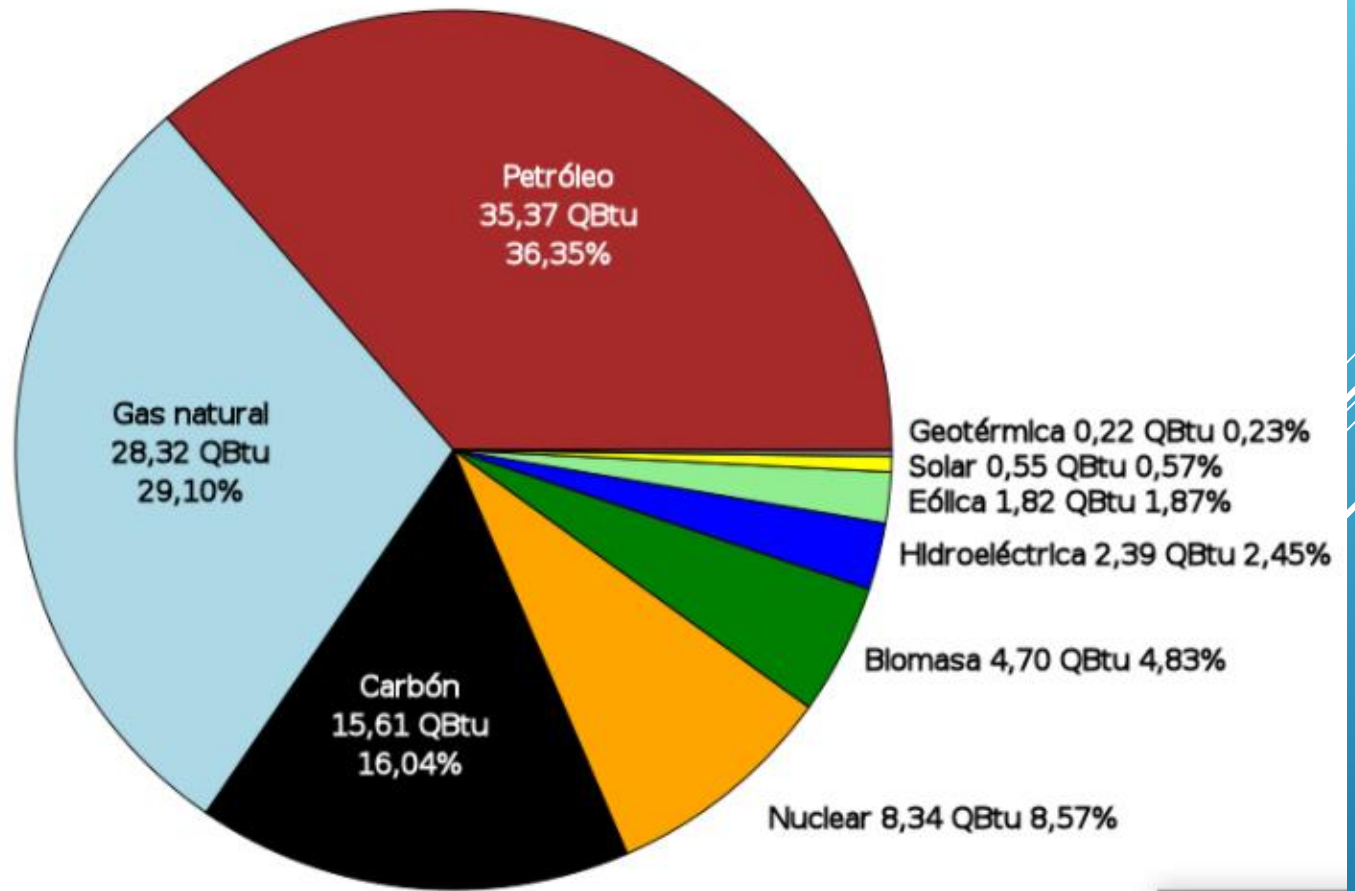
Francia - Oferta interna de electricidad (2016)





Los Estados Unidos poseen 104 centrales nucleares, 1 inactiva y 26 desmanteladas.

El consumo de energía primaria en EE.UU. Fuente (2015)



Distribución mundial de Centrales Nucleares.



Fig. 29.- Distribución geográfica de Centrales Nucleares (IAEA-2005)

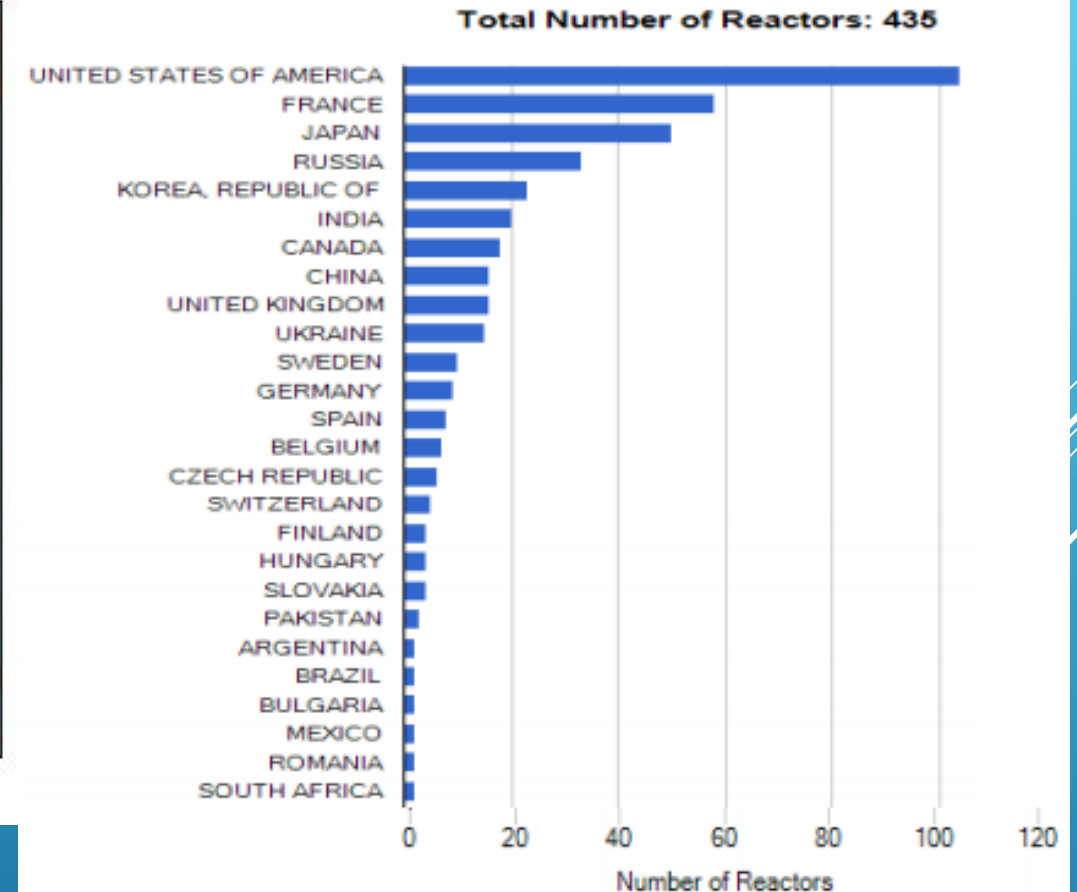


Fig. 28.- Nº de Centrales Nucleares por país

Energía Nuclear en Argentina

Energía nuclear

Centrales nucleares en América Latina





Centros atómicos
Atomic centers



Centrales nucleares de potencia en operación
Operating NPPs



Centrales nucleares de potencia en construcción
NPPs under construction



Polo Tecnológico
Technology Center



Reactores de investigación
Research reactors



1		Planta Industrial de Agua Pesada Heavy Water Industrial Plant
1		Complejo Minero San Rafael Industrial Mining Complex San Rafael
1		Planta de Purificación de Uranio Uranium Purification Plant
3		Institutos de educación Educational institutions
		Medicina nuclear Nuclear medicine
5		Escuelas de medicina nuclear / Nuclear medicine schools
67		Centros de colbatoterapia / Cobalt therapy centers
71		Centros de braquioterapia / Brachytherapy centers
284		Centros de medicina nuclear / Nuclear medicine centers
48		Aceleradores lineales / Linear particle accelerator
338		Laboratorios de radioinmunoensayos / Radioimmunoassay Labs



8



Locaciones con actividad minera
Mining sites

339



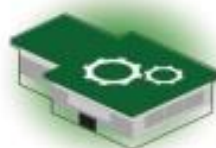
Instalaciones con aplicaciones industriales
Industrial facilities

1



Planta de enriquecimiento de uranio
Uranium enrichment plant

2



Plantas de irradiación para usos industriales
Radiation plants for industrial use

4



Aceleradores de partículas para Producción de Radíoisótopos
Particle accelerator for radioisotopes production

Atucha I y II

Año de construcción Atucha I: 1968–1974
Atucha II: 1981–1994 / Reinicio y finalización de obras 2006-2014

Inicio de actividad Atucha I: 1974
Atucha II: 2014

Reactores

Fabricante Siemens

Tipo PHWR

Reactores activos 2

Potencia

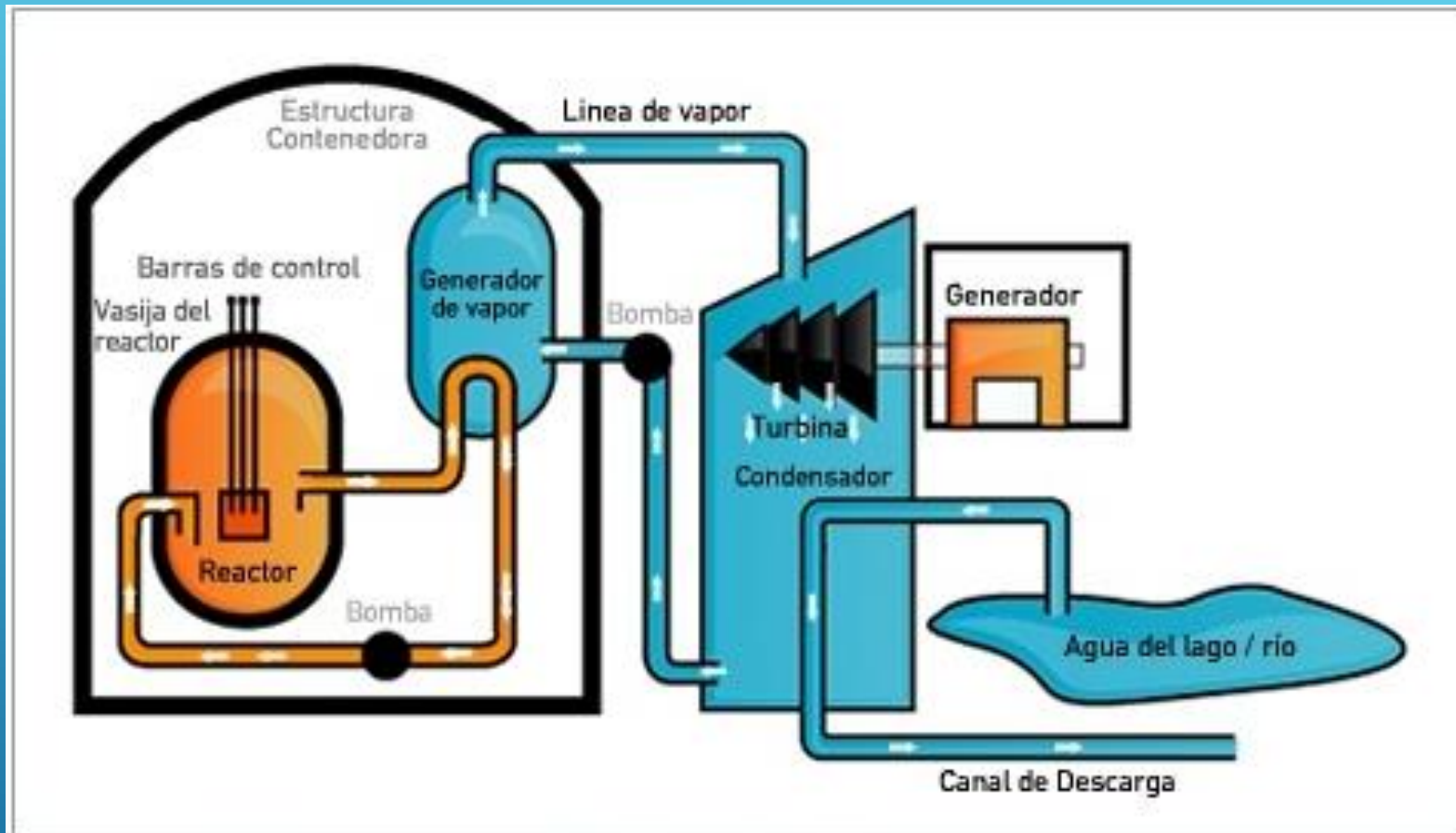
Potencia 1 × 362 MW
1 × 745 MW

Energía anual generada 7677 GWh (2016)



Atucha I y Atucha II

Reactor tipo de Agua Pesada Presurizada

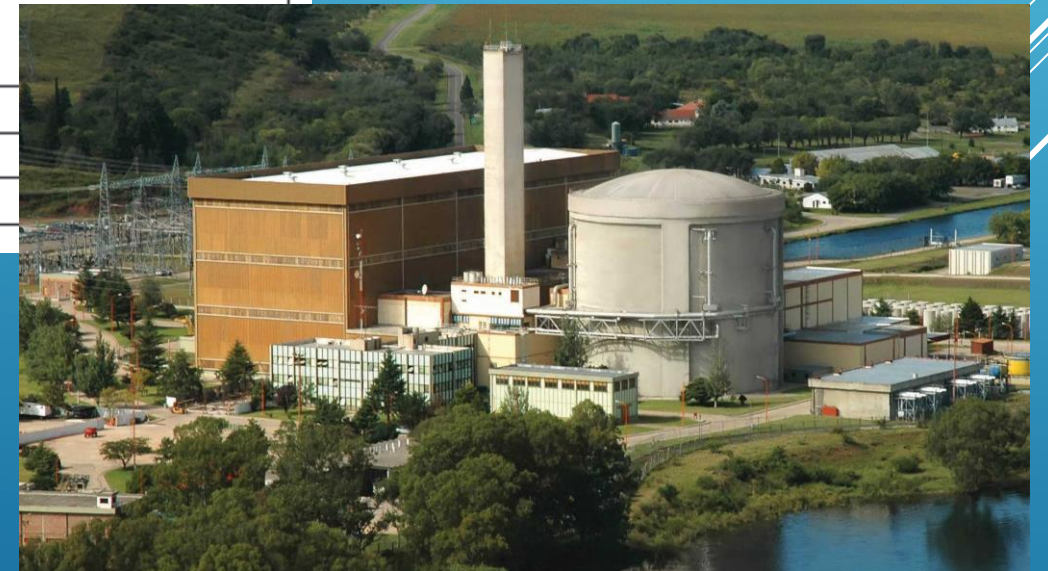


- **PHWR** - (Pressure Heavy Water Reactor o reactor de agua pesada a presión), es del tipo PWR, pero utiliza agua pesada como refrigerante y moderador y U natural o ligeramente enriquecido como combustible. Uno de estos reactores es el CANDU (Canada Deuterium Uranium).

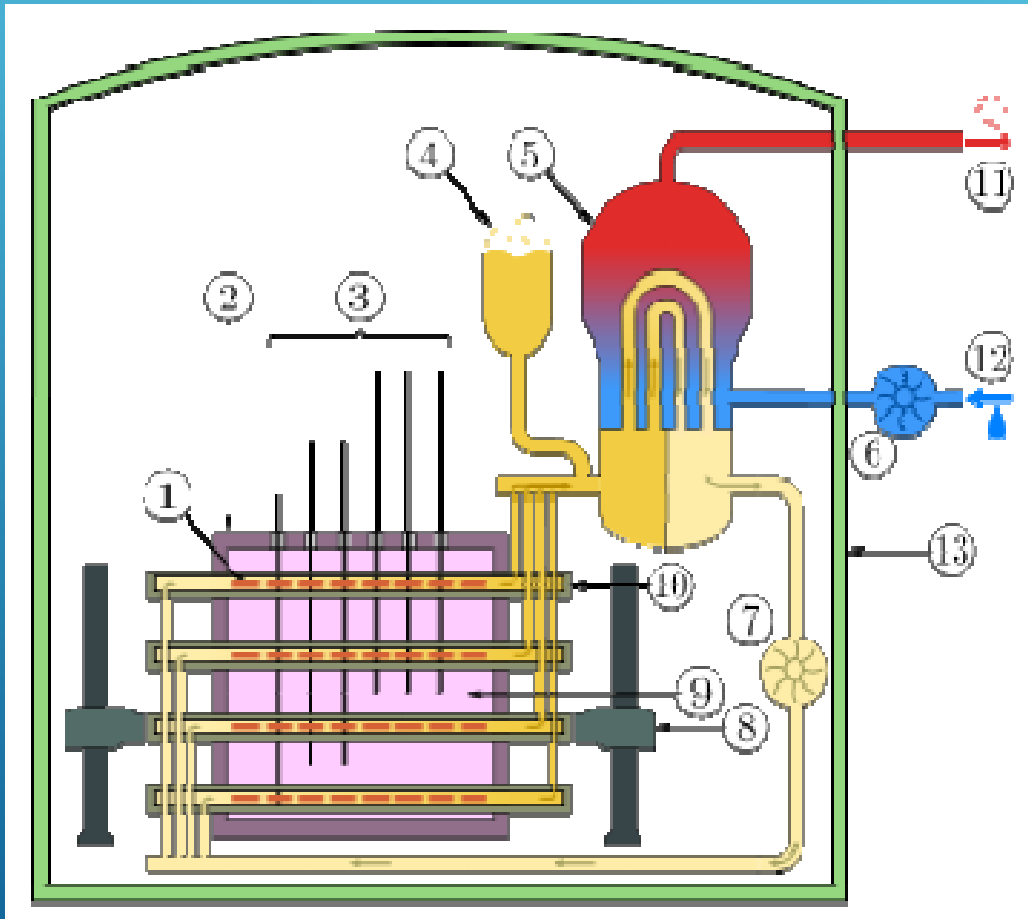
REACTOR

Tipo	Candu-D ₂ O Presurizada. Tubos de presión. Tubos de presión horizontales.
Potencia Térmica	2.109 MW
Moderador	D ₂ O
Refrigerante	D ₂ O
Temperatura media del refrigerante	288 °C
Presión media del refrigerante	112 Kg/cm ²
Cantidad de canales de refrigeración	380
Combustible	Uranio Natural (UO ₂), con recarga durante la operación
Cantidad de combustible en el núcleo	84 t de Uranio (UO ₂) contenidos en 4560 E.C. (12 E.C por Canal)
Tiempo de promedio de residencia del combustible en el núcleo	288 días de plena potencia
Quemado de extracción	7.500 MWd/t
Elementos combustibles por canal	12
Potencia lineal máxima	42 W/cm

La planta posee un reactor CANDU (Canadian Uranium Deuterium) y pertenece al tipo de centrales con tubos de presión. Utiliza uranio natural como combustible y su refrigerante y moderador es agua pesada, potencia 683MW.



Reactor tipo de Agua Pesada Presurizada en tubos horizontales

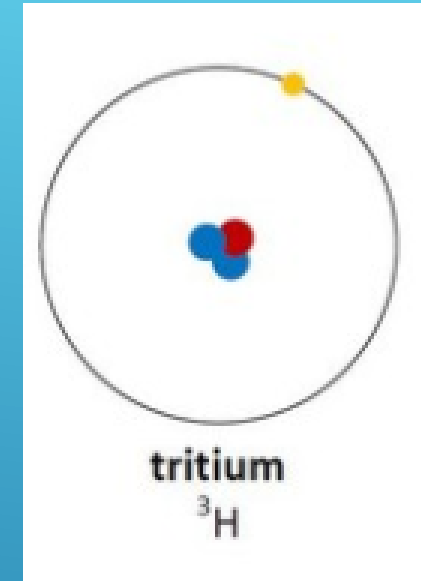
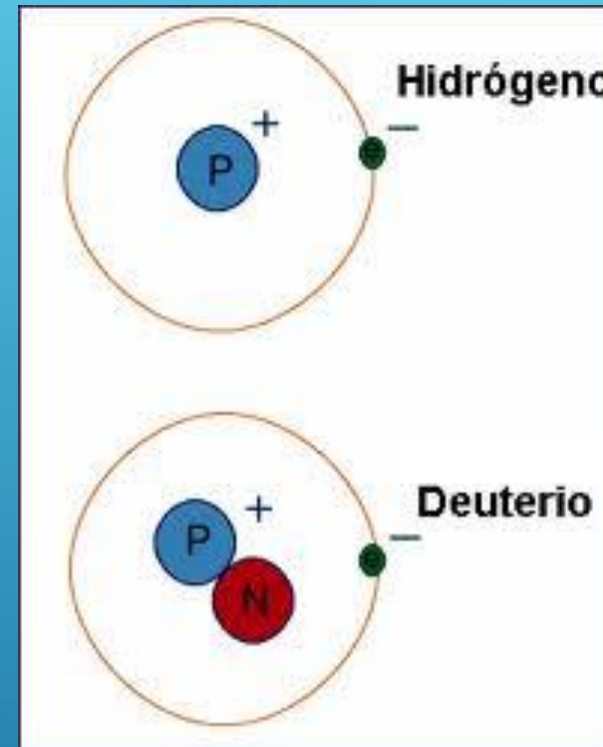


1 Fuel bundle	8 Fueling machines
2 Calandria (reactor core)	9 Heavy water moderator core
3 Adjuster rods	10 Pressure tube
4 Heavy water pressure reservoir	11 Steam going to steam turbine
5 Steam generator	12 Cold water returning from turbine
6 Light water pump	13 Containment building made of reinforced concrete
7 Heavy water pump	

Agua Pesada

El **agua pesada** es una forma de agua que contiene deuterio, un isótopo del hidrógeno, (también conocido como "hidrógeno pesado") en lugar del isótopo común de hidrógeno-1 o protio, del que está compuesta la mayor parte del agua normal. Por lo tanto, algunos o la mayoría de los átomos de hidrógeno del agua pesada contienen un neutrón, lo que provoca que cada átomo de hidrógeno sea aproximadamente dos veces más pesado que un átomo de hidrógeno normal.

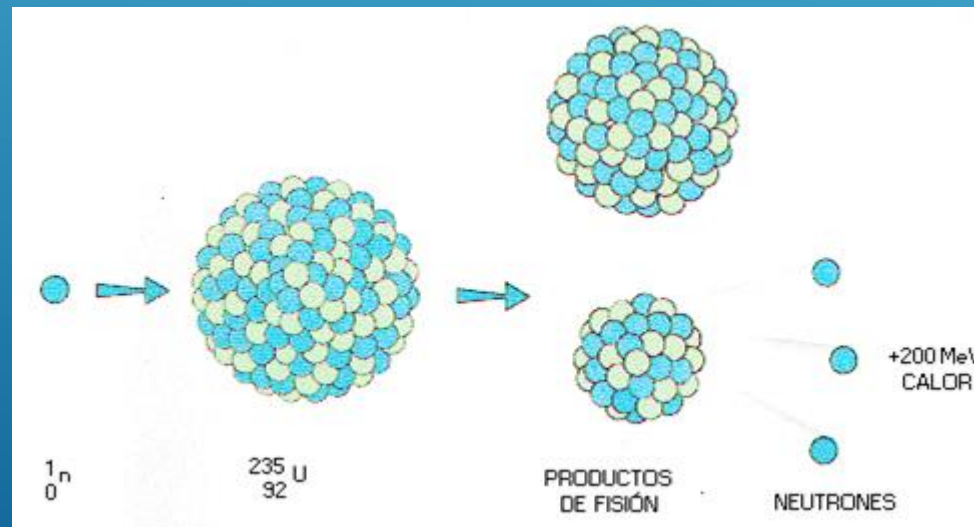
Isótopo; átomo que pertenece al mismo elemento químico que otro, tiene su mismo número atómico, pero distinta masa atómica.



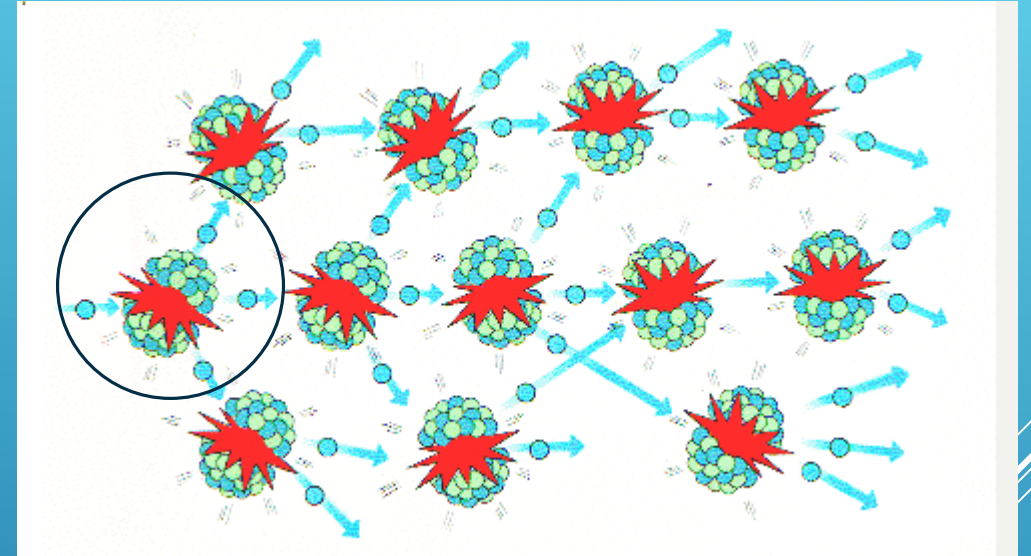
La fórmula química del agua pesada es: **D₂O** o **$^2\text{H}_2\text{O}$**

Fisión Nuclear

La fisión es una reacción en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se descompone en dos núcleos (productos de la fisión), con gran desprendimiento de energía y con emisión de dos o tres neutrones. Éstos, a su vez, pueden ocasionar más fisiones al interaccionar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones (a una velocidad de 20 000 km/s) y así sucesivamente.

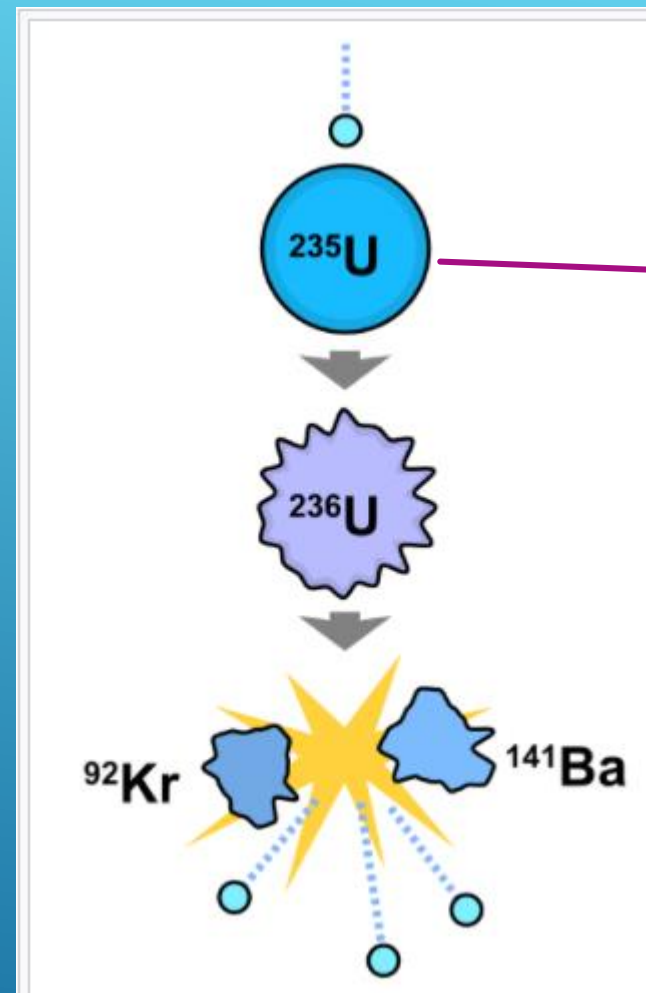


Este efecto multiplicador se conoce con el nombre de reacción en cadena. En una pequeña fracción de segundo, el número de núcleos que se han fisionado libera una energía 10^6 veces mayor que la obtenida al quemar un bloque de carbón o explotar un cartucho de dinamita de la misma masa. Debido a la rapidez a la que tiene lugar una reacción nuclear, la energía que se desprende de esta es mucho más rápido que en una reacción química.



En la fisión de un núcleo de uranio, no solo aparecen dos núcleos más ligeros sino que además se emiten 2 o 3 (en promedio 2,5 en el caso del ^{235}U) neutrones a una alta velocidad (energía).

Como el uranio es un núcleo pesado donde no se cumple la relación $N=Z$ (igual número de protones que de neutrones) que sí se cumple para los elementos más ligeros, los productos de la fisión poseen un exceso de neutrones. Este exceso de neutrones hace inestable (radiactivo) a esos productos de fisión, que alcanzan la estabilidad al desintegrarse los neutrones excedentes por desintegración beta generalmente.



- 92 protones
- 143 Neutrones

Se puede descomponer hasta en 40 productos distintos. Otros pueden ser Xenón y Cesio.

- $92 \text{ Kr} + 141 \text{ Ba} = 233$
- 3 neutrones libres

Los minerales explotados para la extracción del uranio suelen poseer contenidos de alrededor de 1 gramo de uranio por kg de mineral (la pechblenda por ejemplo).

En comparación, se necesitan más de **10 toneladas de antracita** (el tipo de carbón con mayor poder calorífico) para obtener la misma energía contenida en 1 kg de uranio natural.



10 Tn de Antracita



Pechblenda

Isótopos más estables

Artículo principal: [Isótopos del uranio](#)

iso	AN	Periodo	MD	Ed	PD
				MeV	
²³² U	Sintético	68,9 a	α & FE	5.414	²²⁸ Th
²³³ U	Sintético	159200 a	α & FE	4.909	²²⁹ Th
²³⁴ U	0,0054 %	245500 a	α & FE	4.859	²³⁰ Th
²³⁵ U	0,7204 %	7,038 × 10 ⁸ a	α & FE	4,679	²³¹ Th
²³⁶ U	Sintético	2,342 × 10 ⁷ a	α & FE	4,572	²³² Th
²³⁸ U	99.2742 %	4,51 × 10 ⁹ a	α & FE	4,270	²³⁴ Th

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 (²³⁸U), uranio-235 (²³⁵U) y uranio-234 (²³⁴U). De cada gramo de uranio natural el 99,284 % de la masa es uranio-238, el 0,711 % uranio-235,² y el 0,0085 % uranio-234.

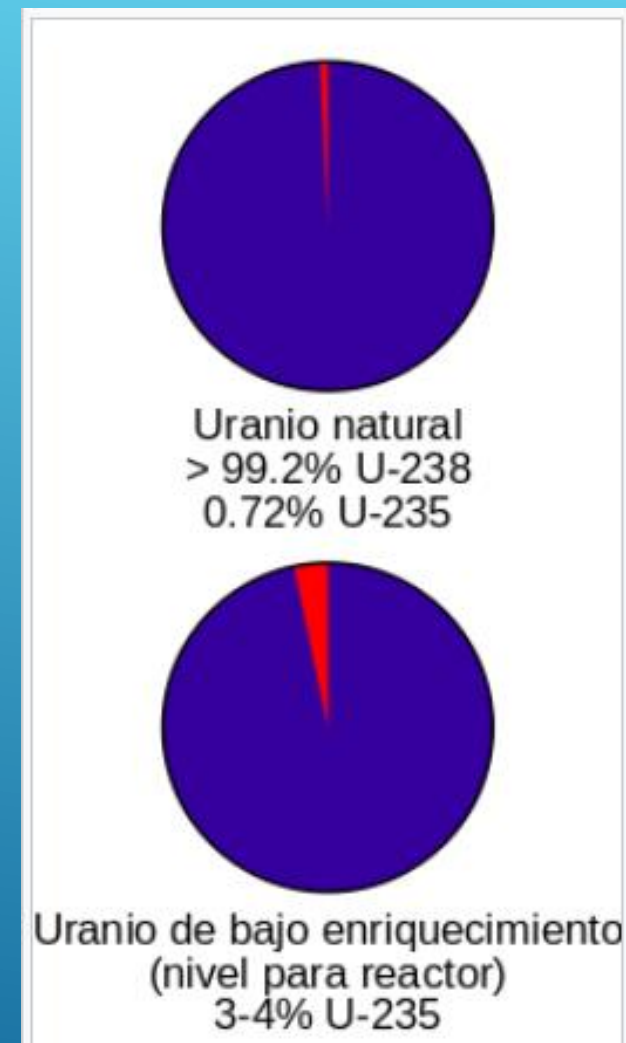
Enriquecimiento de Uranio

El **enriquecimiento de uranio** es el proceso al cual es sometido el uranio natural para aumentar la proporción del isótopo ^{235}U .

El uranio natural se compone principalmente del isótopo ^{238}U , con una proporción en peso de alrededor del 0,7 % de ^{235}U , el único isótopo en cantidad apreciable existente en la naturaleza que es fisionable mediante neutrones térmicos.

Durante el enriquecimiento, el contenido porcentual de ^{235}U en el uranio natural se incrementa gracias al proceso de separación de isótopos.

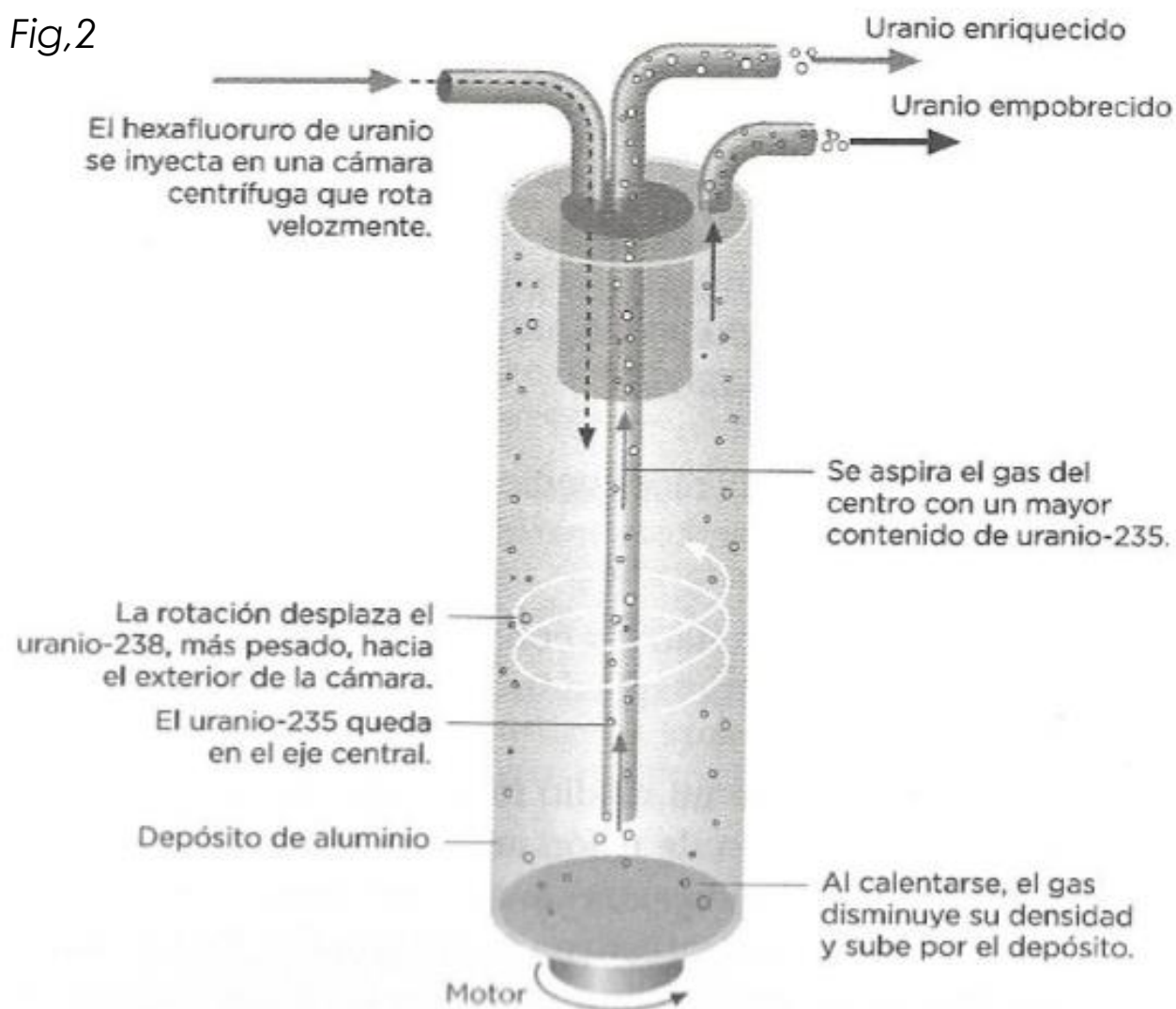
El proceso de enriquecimiento se aplica tras haber separado el uranio de las impurezas por medios químicos. En el método utilizado a escala industrial, de difusión gaseosa, el uranio se encuentra en forma de hexafluoruro de uranio (UF_6 , el gas más pesado), tras el enriquecimiento el UF_6 es transformado en **dióxido de uranio (UO_2)**, material cerámico que se utiliza finalmente como combustible en los reactores nucleares.





UTN
FRRQ

Fig,2



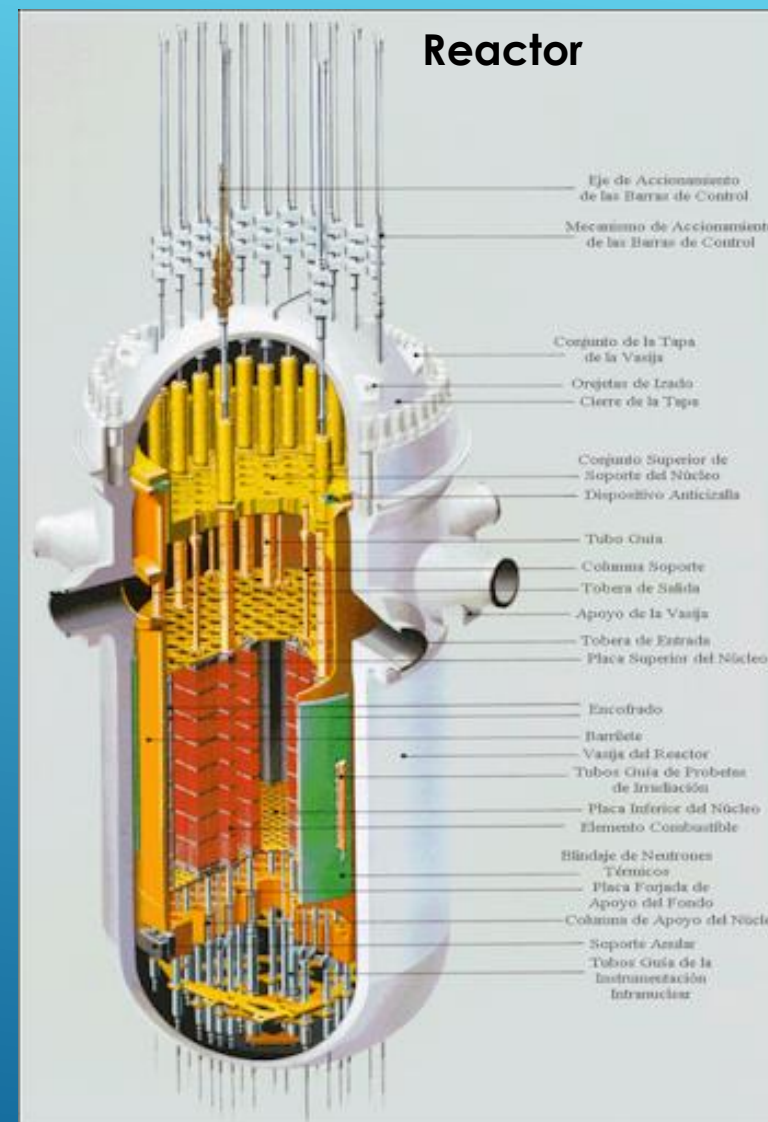
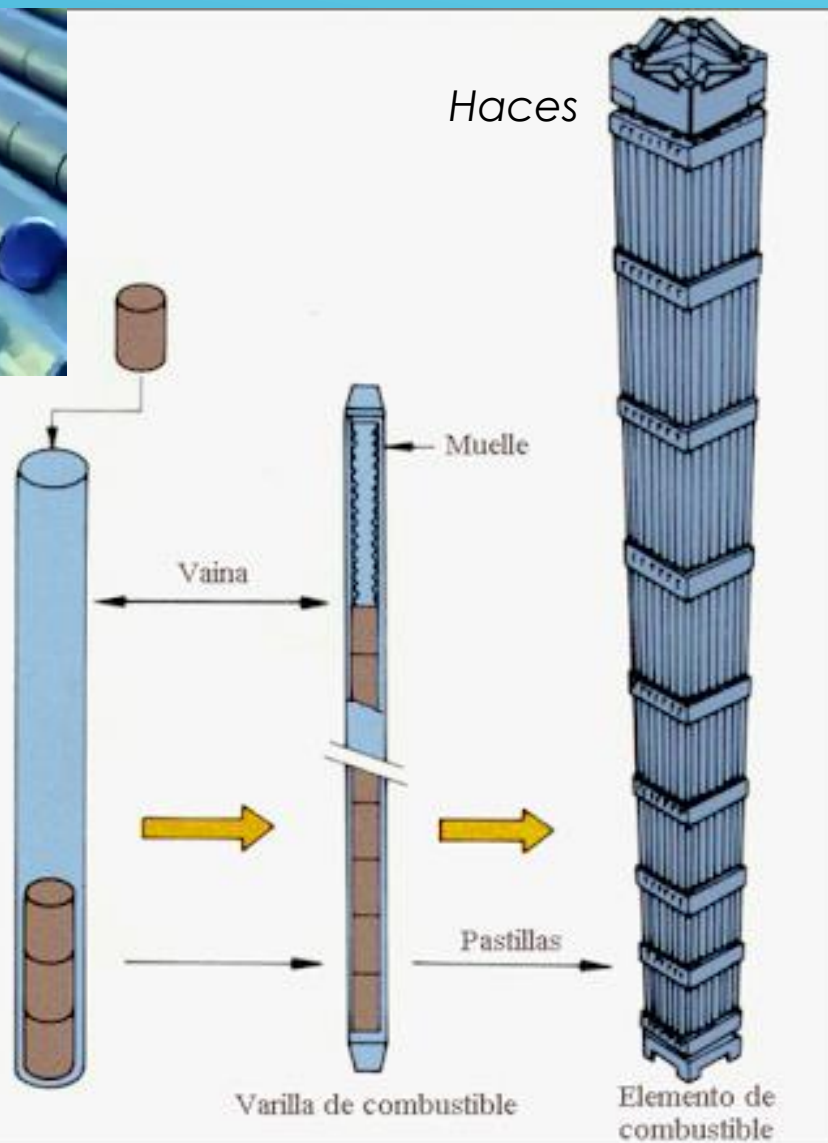
El método de la difusión gaseosa (figura 2), desarrollado por Harold Urey y J.R. Dunning en Columbia, aprovechaba que las moléculas de los compuestos gaseosos del uranio (como el hexafluoruro de uranio, UF_6), al atravesar filtros finos, lo hacían a velocidades distintas según la masa atómica del isótopo, de manera que el uranio-235, más ligero que el 238 y los demás isótopos, pasaba más rápidamente y podía separarse de forma efectiva mediante centrifugación.



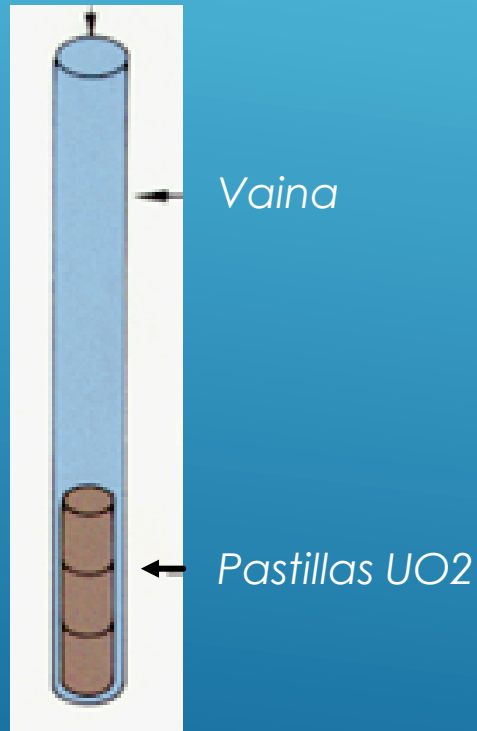
UTN
FRRQ



Pastillas de UO_2



Zirconio; una de las aplicaciones principales del elemento es su uso en vainas de uranio para reactores nucleares, aleado con estaño forma una aleación de **Zircaloy**.



Un grave problema que ocurre en los grandes accidentes en plantas nucleares es que, en frío, el *zirconio* reacciona muy despacio con el oxígeno pero, en caliente la reacción con el agua es muy vigorosa, formándose el óxido (ZrO_2) y liberando hidrógeno que, a su vez, puede arder muy fácilmente en esas condiciones, liberando aún más energía.



Fusión Nuclear

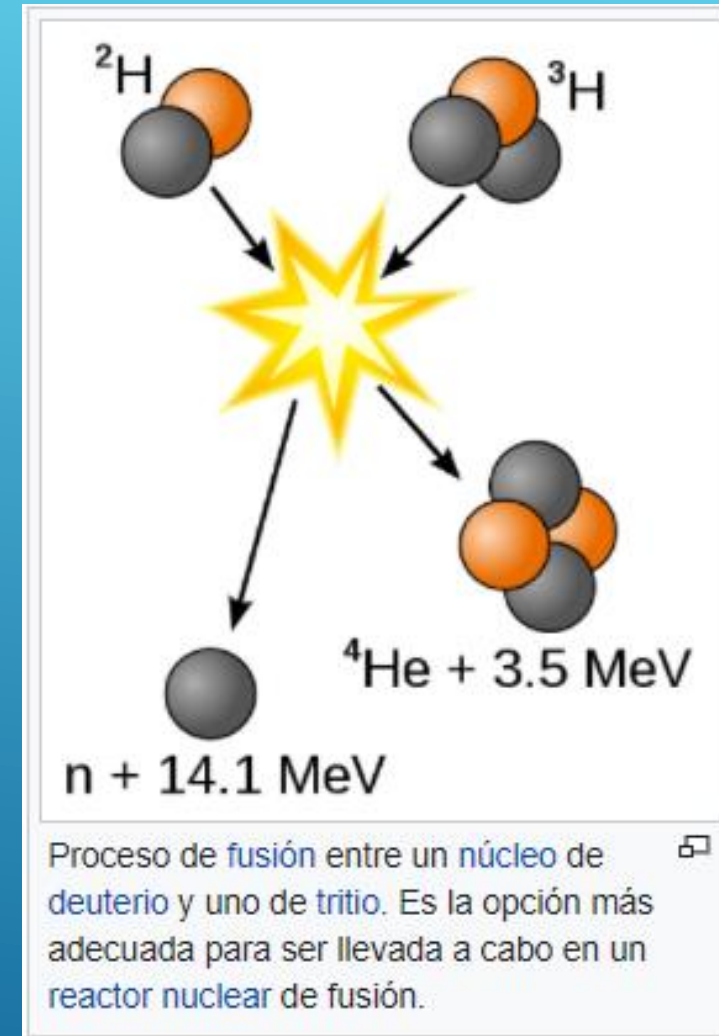
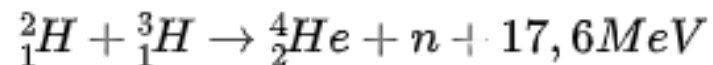
La fusión es absolutamente artificial en nuestro entorno (aunque es común en el núcleo de las estrellas, **SOL**).

Sin embargo, esta energía posee ventajas con respecto a la fisión, por un lado el combustible es abundante y fácil de conseguir y por otro sus productos son elementos estables, ligeros y no radiactivos.

En la fusión, al contrario que en la fisión donde se dividen los núcleos, la reacción consiste en la unión de dos o más núcleos ligeros. Esta unión da lugar a un núcleo más pesado que los usados inicialmente y a neutrones.

el hidrógeno común (1_1H), el deuterio (2_1H) y el tritio (3_1H).

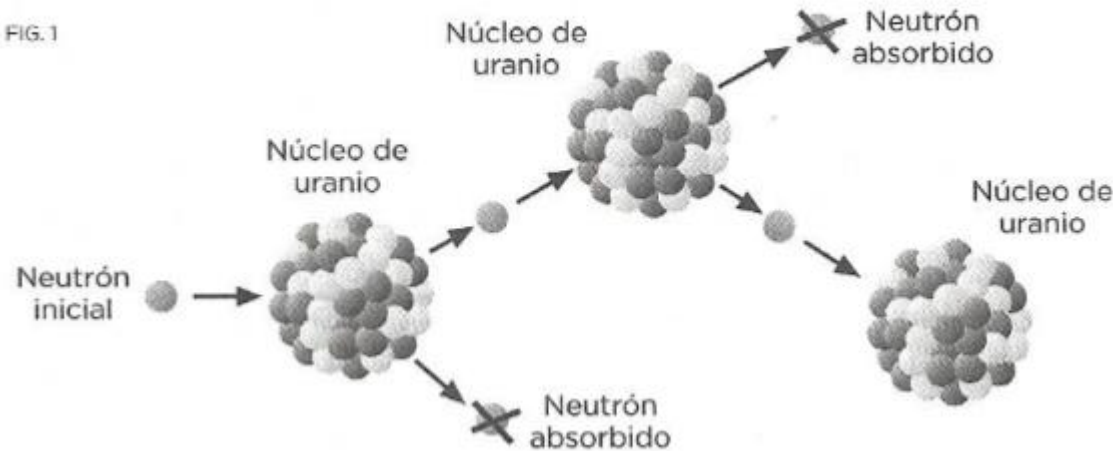
Una reacción particularmente interesante es la fusión de deuterio y tritio:



Control sobre la Fisión.

BARRAS DE CONTROL Y MODERADOR

FIG.1



1. Para **controlar** la reacción en cadena hay que procurar absorber parte de los neutrones liberados en cada fisión.

En los reactores se utilizan unas barras de control hechas de materiales muy pocos fisionables y que absorben bien a los neutrones como el **Boro o el Cadmio**.

2. Para frenar a los neutrones rápidos se emplea un **moderador**, como el agua pesada (D_2O) o el Grafito (carbono), ya que los neutrones lentos producen más fisiones nucleares y también son mejor absorbidos por las barras de control.

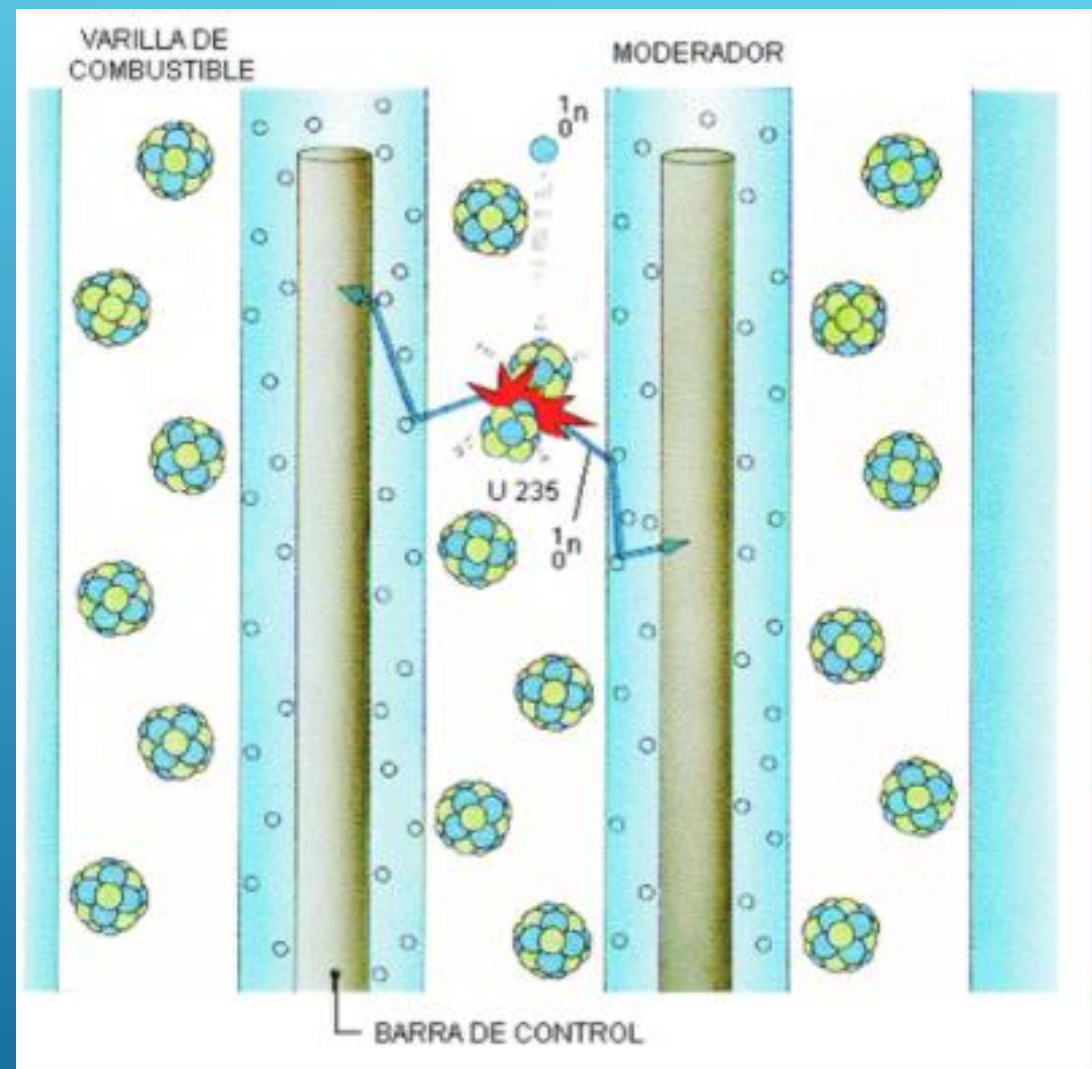


UTN
FRRQ

Barras de Control

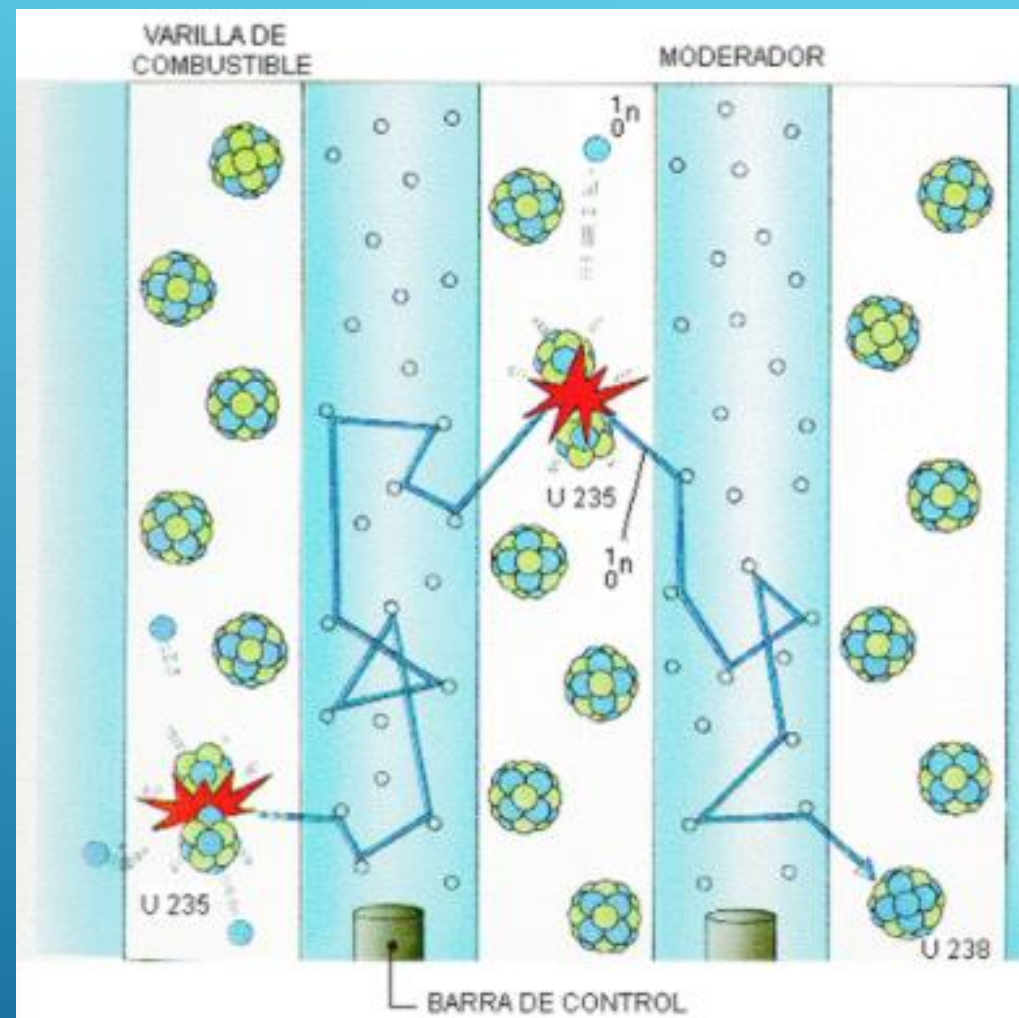
Para que un reactor nuclear funcione a mayor, o menor potencia, se puede proceder de varias formas. La introducción de absorbentes de neutrones en el núcleo por medio de barras llamadas de control, es un medio rápido y eficaz. Estas barras están fabricadas con material de **carburo de boro** o de gran sección eficaz de captura, como metales o aleaciones de plata, indio y cadmio.

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

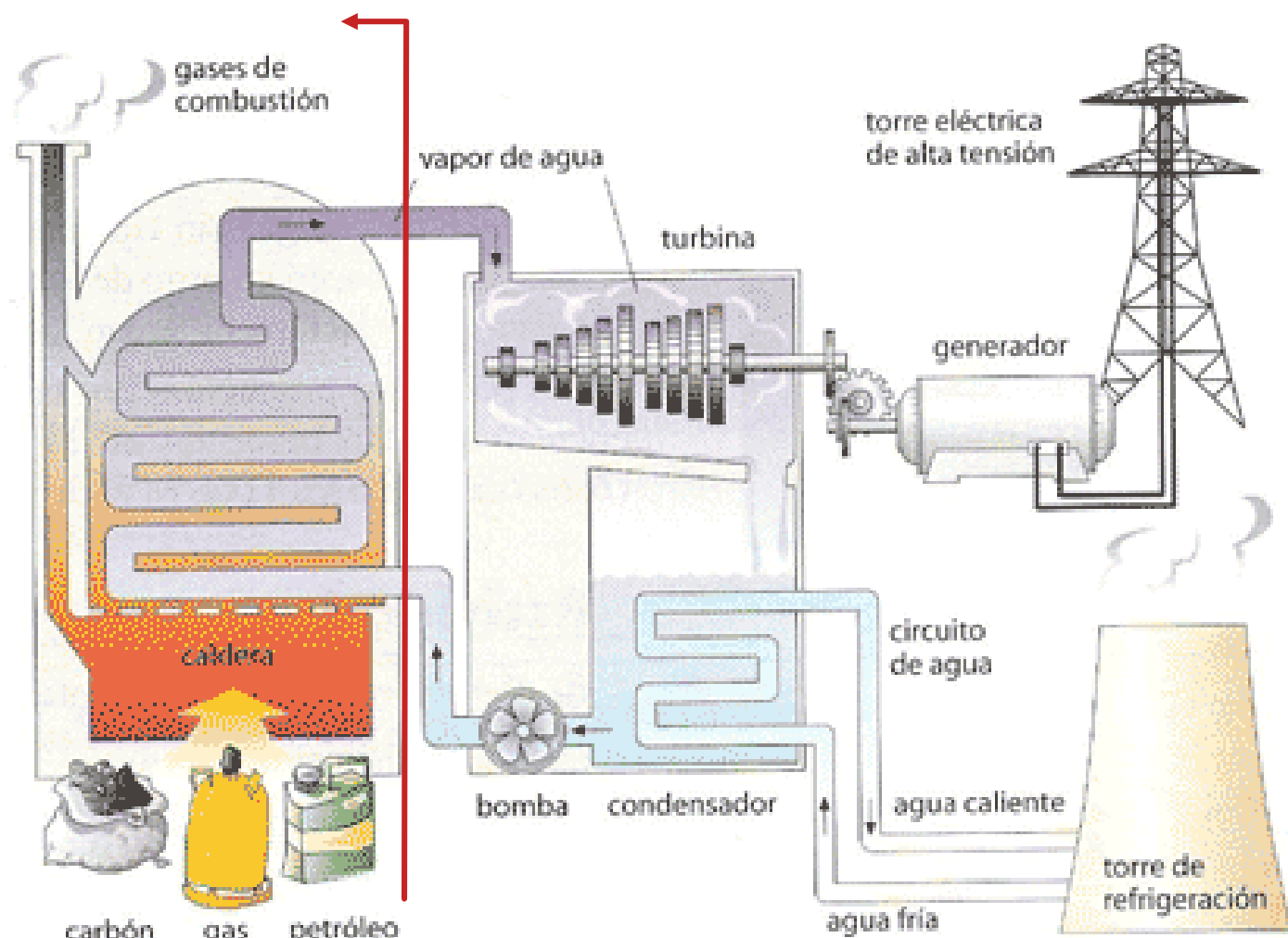


Moderador

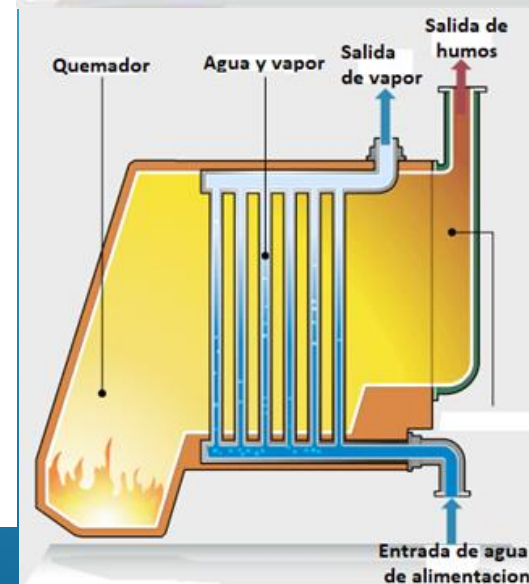
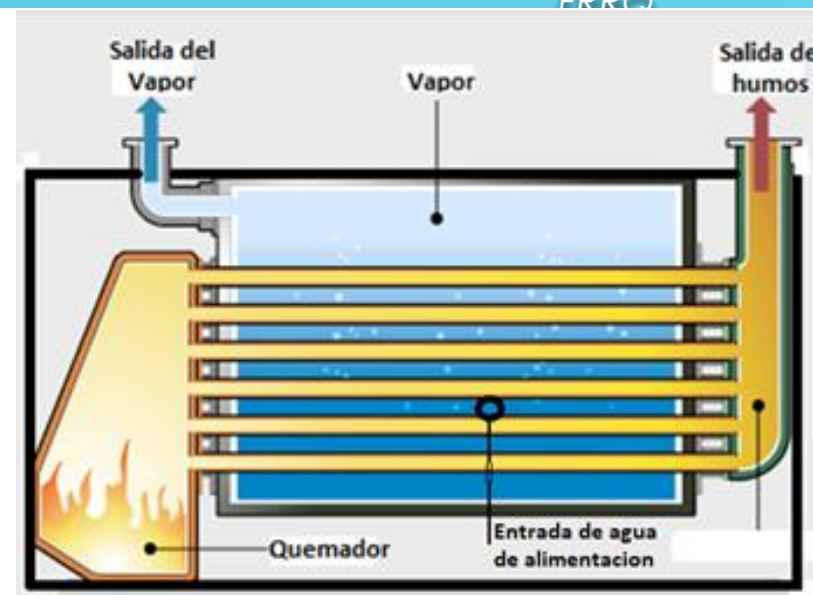
El papel del moderador es, por tanto, disminuir la energía cinética del neutrón, mediante choques elásticos con un átomo de un material adecuado (núcleos de átomos ligeros). Entre los moderadores más utilizados se pueden citar, entre otros, el agua natural, también llamada ligera, el agua pesada y el carbono (grafito).



Central Termo-Eléctrica



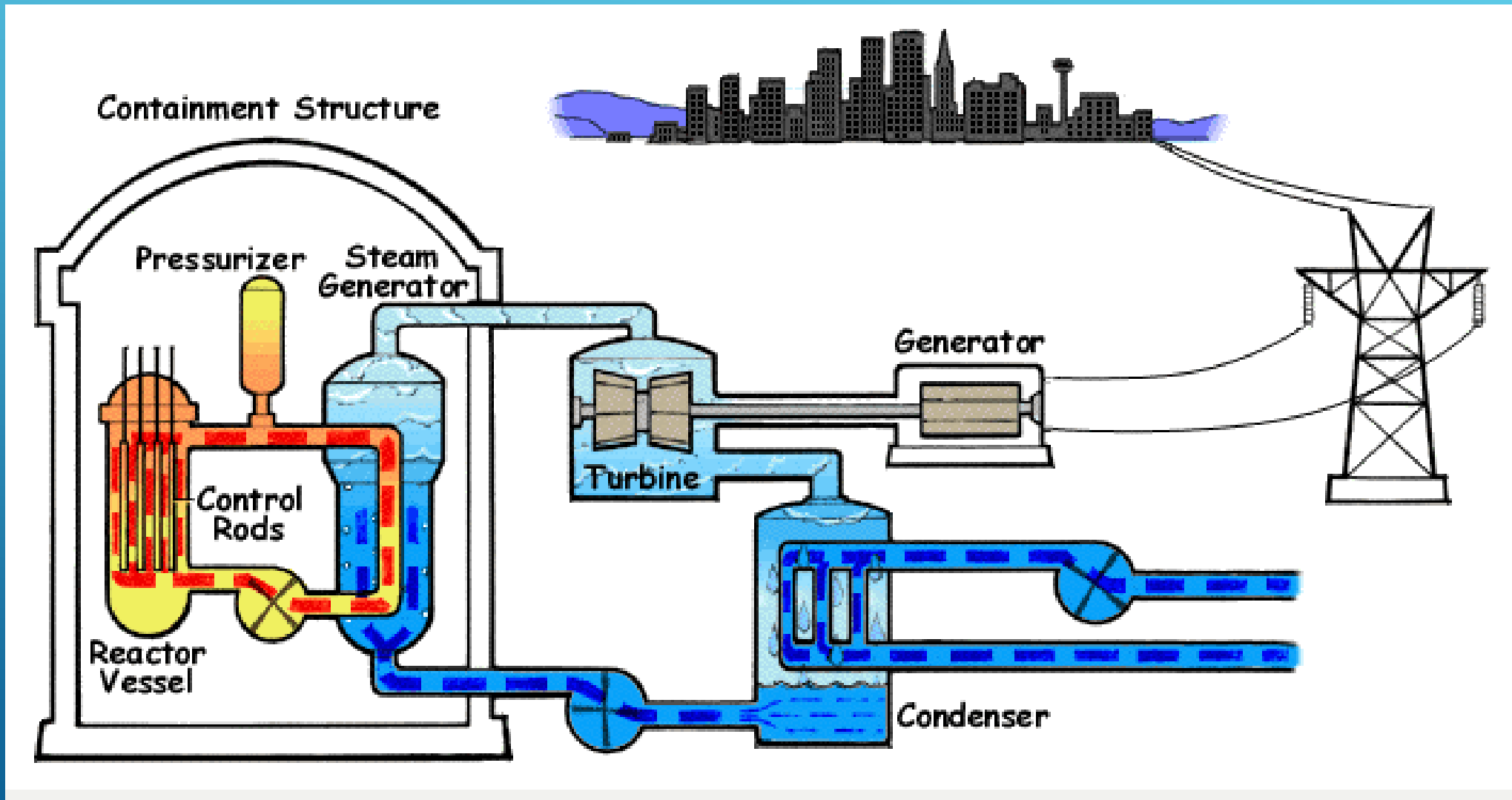
Esquema de una central térmica.



Humotubular

Acuotubular

Central Nuclear de agua a presión (PWR)

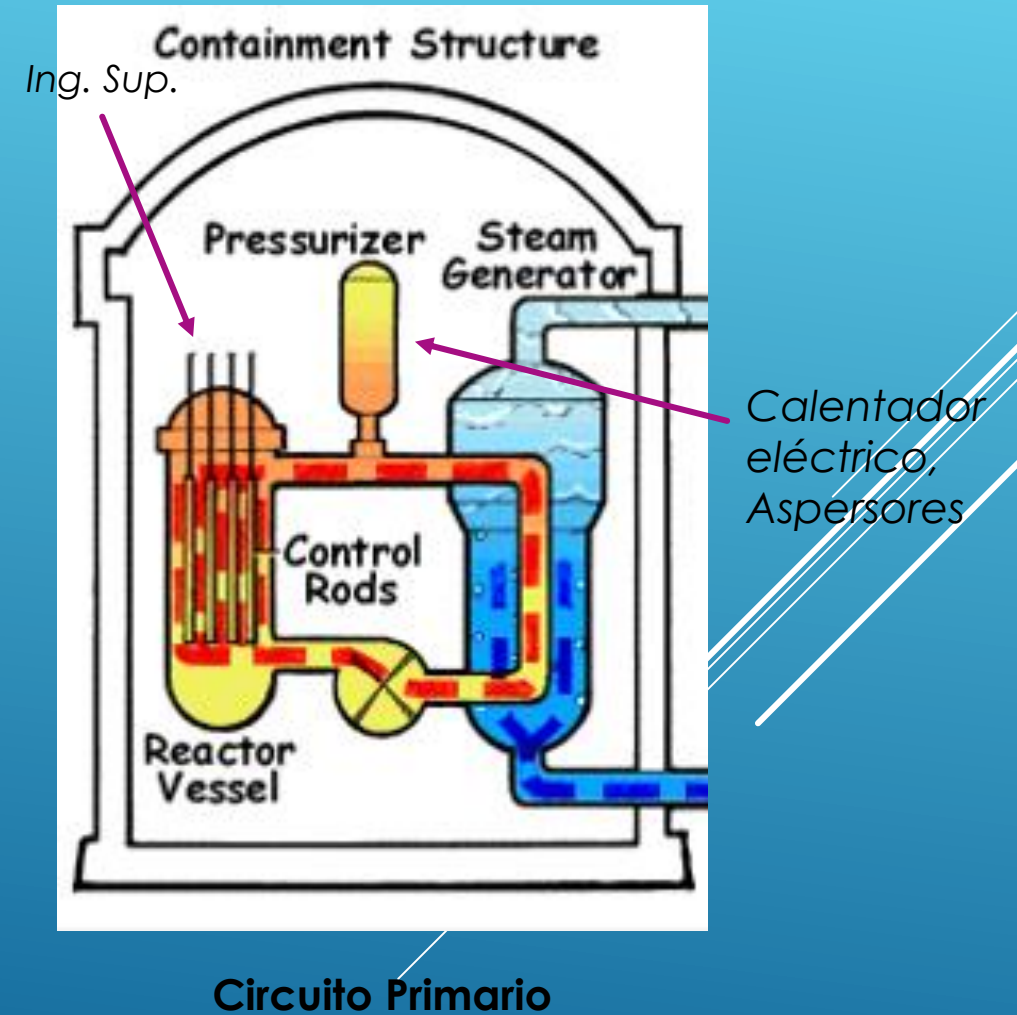


Centrales de agua a presión PWR (Presurized Water Reactor), *Reactores Térmicos*.

Emplea agua liviana como Moderador y Refrigerante y UO₂ enriquecido como combustible.

En el reactor de agua a presión el agua de refrigeración, **que circula a gran presión (150atm)**, lleva la energía desprendida del núcleo del reactor a un intercambiador de calor, donde se genera el vapor que alimentará al turbo-grupo.

La característica básica es que el agua, que actúa como **refrigerante, usándose agua liviana también como moderador**, permanece líquida a su paso por el reactor a una temp. de 310°C.



En el caso de reactores de 1000MWe. El conjunto de componentes que constituyen el circuito primario está distribuido en tres o cuatro lazos que pasan por el corazón del circuito, que es el propio reactor. Cada lazo tiene un generador de vapor y una bomba de recirculación.

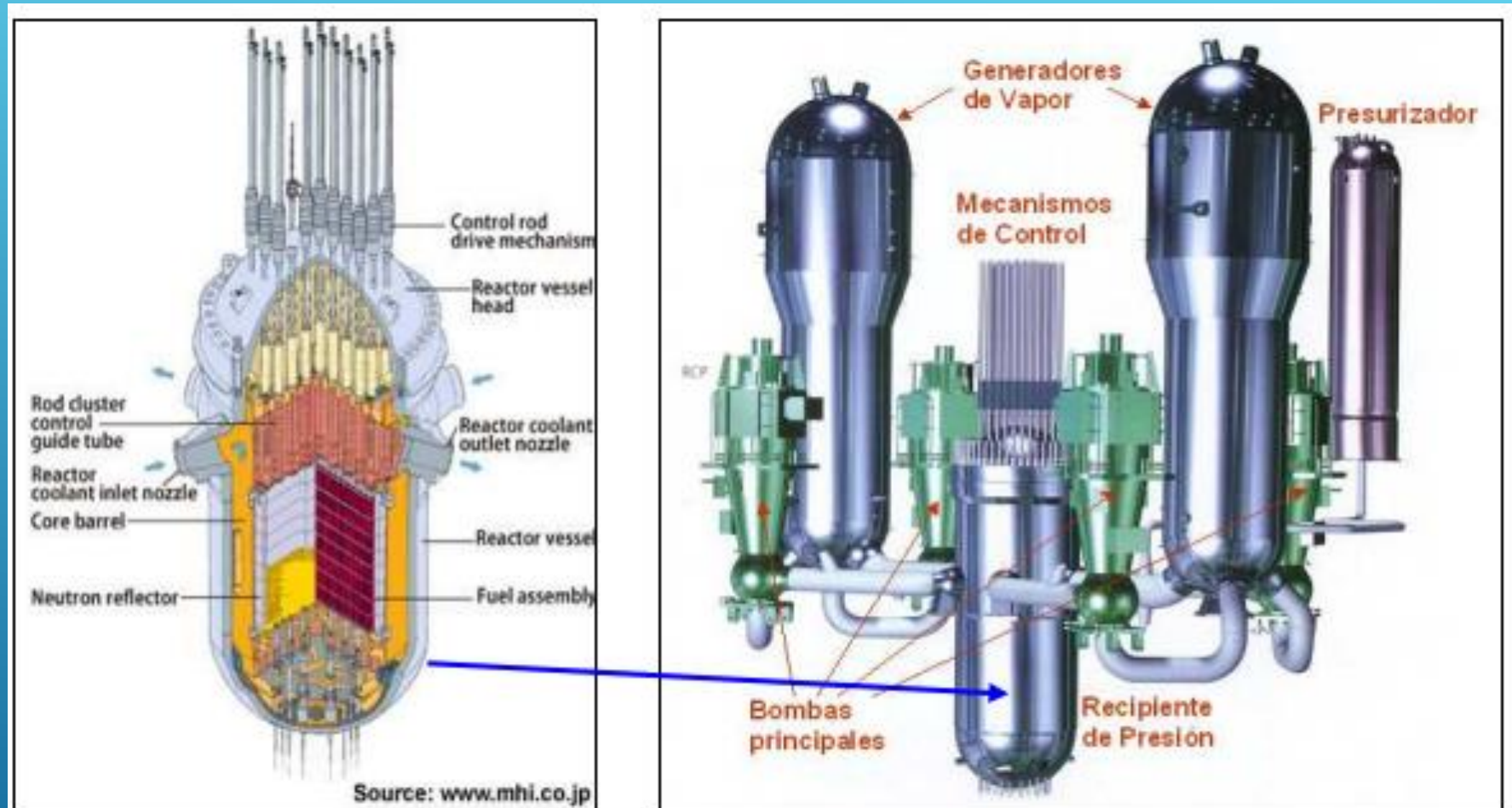
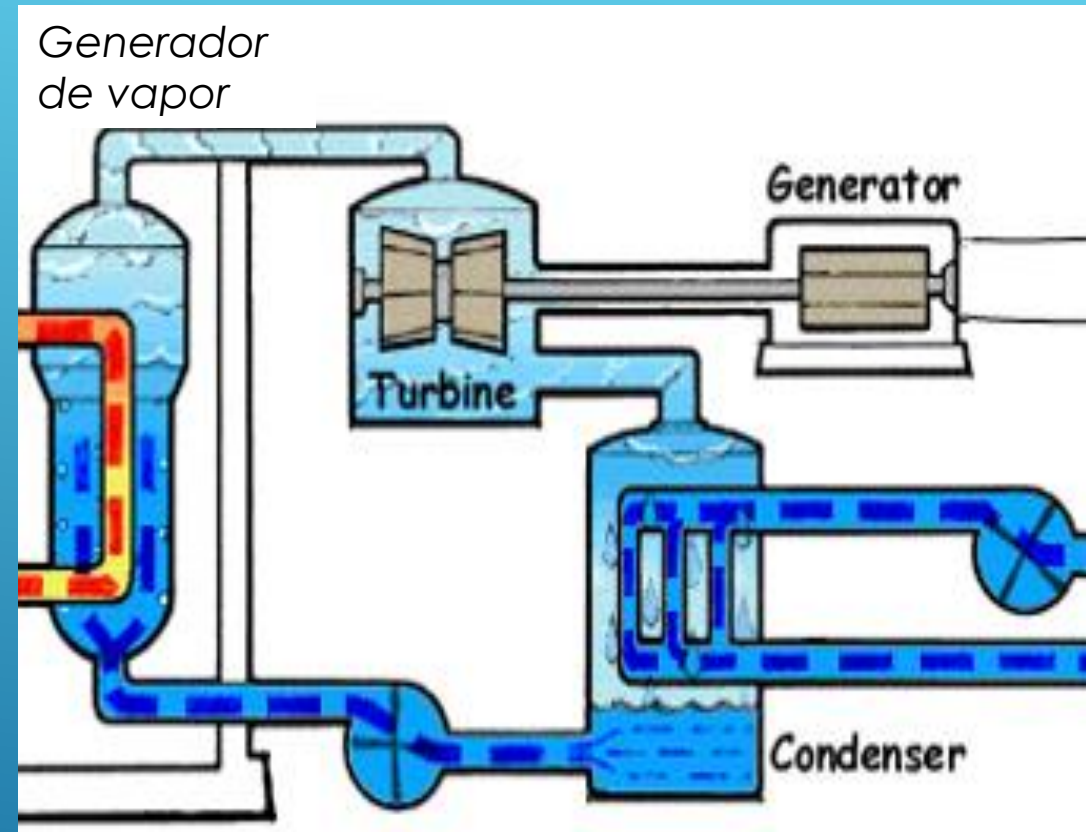


Fig. 22.- Esquema del reactor, y del conjunto Bombas, Presurizador y Generadores de Vapor

En el circuito secundario se encuentra el generador de vapor, la turbina, el condensador, las bombas de condensado y bombas de agua de alimentación.

El generador de vapor consiste en un intercambiador de calor con la peculiaridad de que ***en el secundario se produce cambio de fase***, ya que se introduce el agua caliente del primario por la parte interna de unos tubos de transmisión, por cuyo exterior viaja el fluido que se transforma en vapor, pues éste tiene mayor volumen específico.

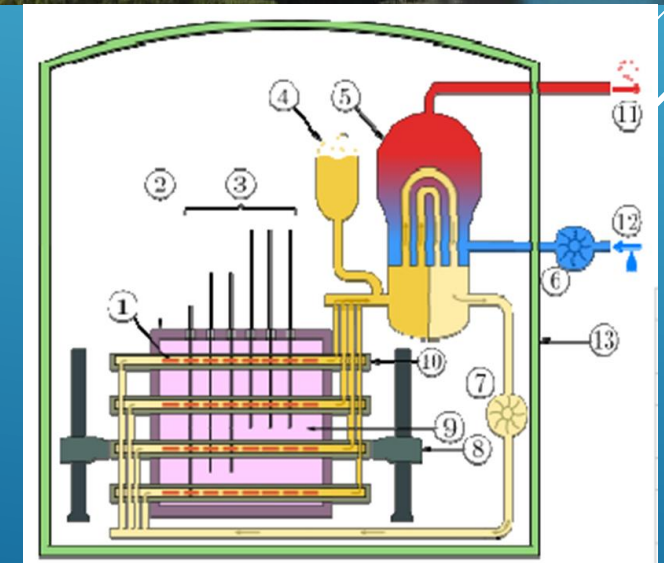
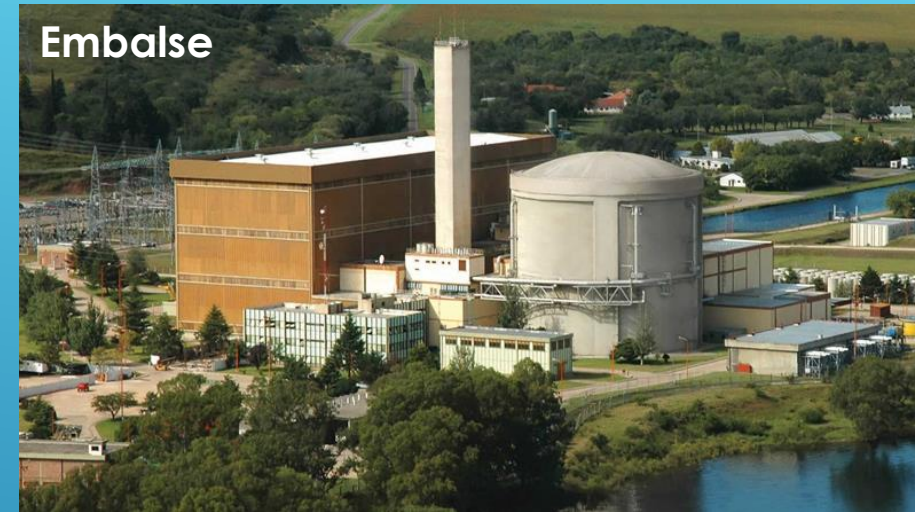


Circuito Secundario

Variante del PWR a PHWR (Presurized Heavy Water Reactor);

Emplea Agua pesada (D₂O) como Moderador y Refrigerador y Uranio Natural como combustible. Se mantiene a presión para que no entre en ebullición.

El CANDU desarrollado por una empresa canadiense (Canadian Uranium Deuterium) posee la particularidad de que el agua pesada a presión circula por el interior de tubos horizontales, empleado en la central de Embalse.

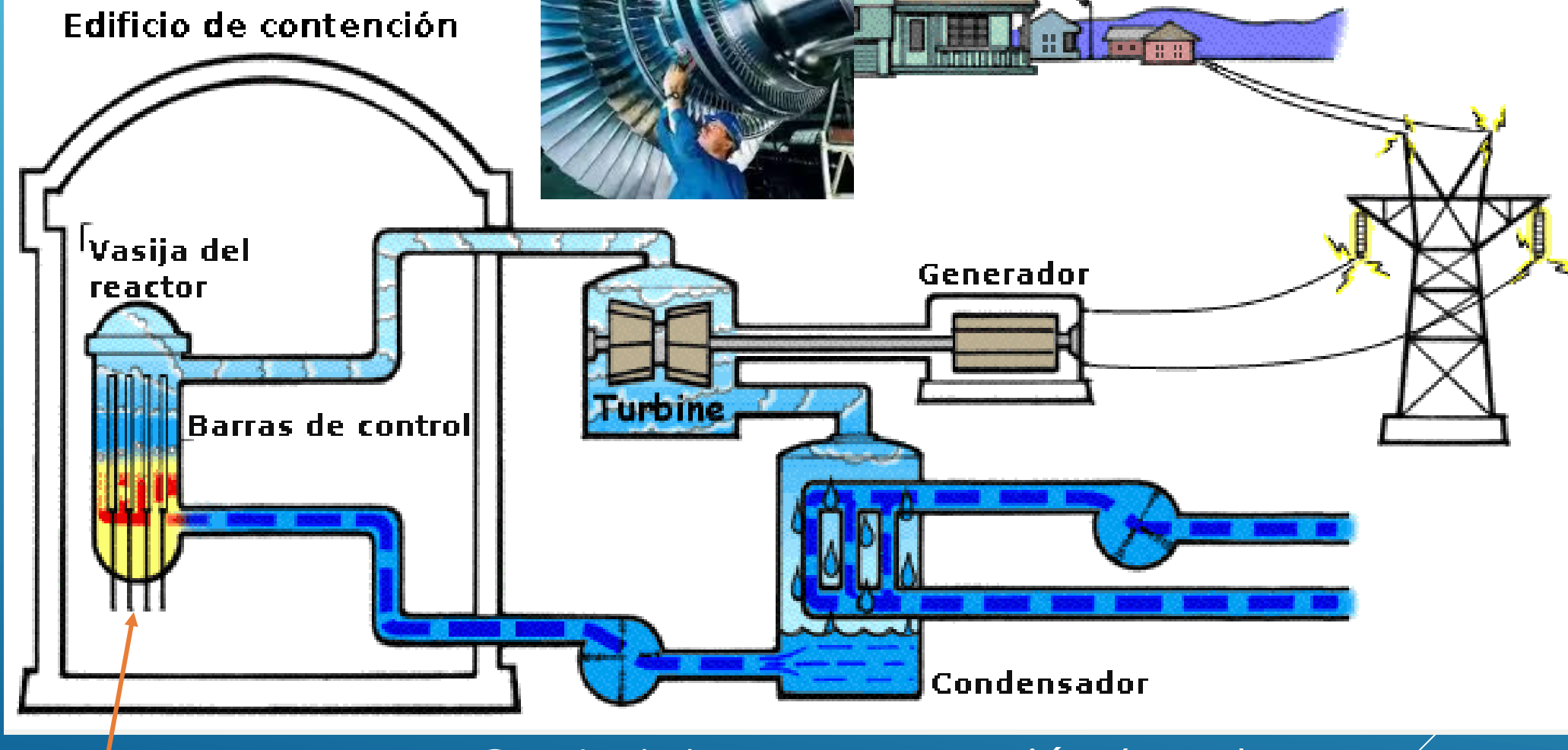
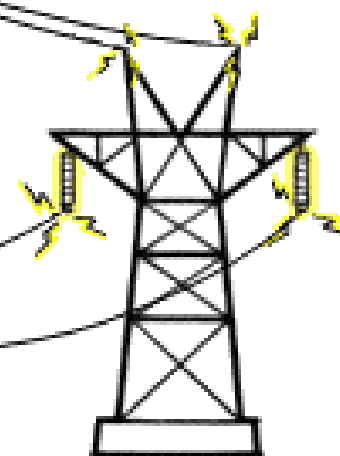


Centrales de agua en ebullición BWR (Boiling Water Reactor), *Reactores Térmicos*.

Emplea agua liviana como Moderador, Refrigerante y Fluido de trabajo y UO₂ enriquecido como combustible. Al contrario que en los reactores de agua a presión, los de agua en **ebullición** están concebidos para que el agua que refrigera el combustible del reactor cambie de fase, es decir, hierva (formación de vapor a 280°C) a su paso por el reactor.

El agua, mantenida a una presión de unas 70 atm. (la mitad de un PWR), entra en ebullición y este vapor (en un 13%) tras pasar por unos sistemas de separadores de agua y de secado, en la parte superior de la vasija, va directamente a la turbina.

Estas centrales, a diferencia de las PWR, no tienen generador de vapor, que era la inter-fase entre el agua del primario y el vapor del circuito secundario.



Ingreso Inferior
de la B. de Control

Central de agua a presión (BWR)

Tipos de reactores nucleares de fisión comerciales (neutrones térmicos)²⁷

Combustible	Moderador	Refrigerante
Uranio natural	Grafito	Aire
		CO ₂
		H ₂ O (agua ligera)
		D ₂ O (agua pesada)
	D ₂ O (agua pesada)	Compuestos orgánicos
		H ₂ O (agua ligera)
		D ₂ O (agua pesada)
		Gas
Uranio enriquecido	Grafito	Aire
		CO ₂
		H ₂ O (agua ligera)
		D ₂ O (agua pesada)
		Sodio
	D ₂ O (agua pesada)	Compuestos orgánicos
		H ₂ O (agua ligera)
		D ₂ O (agua pesada)
		Gas
	H ₂ O (agua ligera)	H ₂ O (agua ligera)

- **PWR (VVER en ruso)**. (264). Uranio enriquecido, moderador y refrigerante agua ligera.
- **BWR**. (94). Uranio enriquecido, moderador y refrigerante agua ligera.
- **CANDU**. (43). Uranio natural, moderador y refrigerante agua pesada.
- **AGR**. (18). Usa uranio enriquecido como combustible, moderador grafito, refrigerante CO₂.
- **RBMK**. (12). Uranio natural o enriquecido, moderador grafito, refrigerante agua ligera.

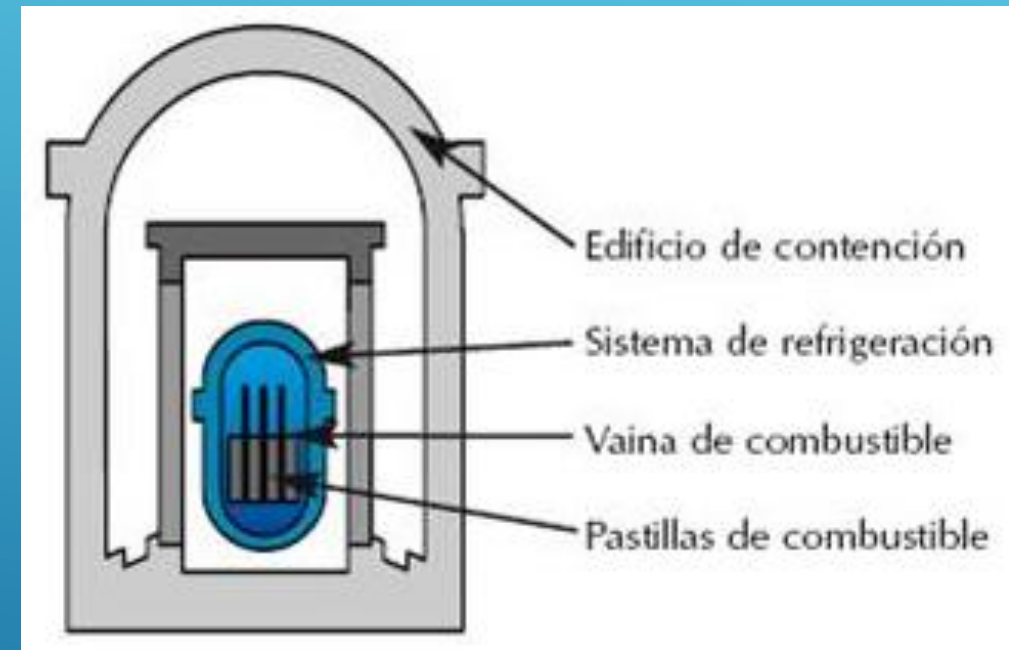
Las barreras físicas de seguridad para que no se liberen los **PRODUCTOS RADIATIVOS** son cuatro:

La primera la forman las propias pastillas de combustible que, debido a su estructura cerámica, retienen las sustancias radiactivas producidas en la fisión;

La segunda barrera está formada por las varillas que contienen el combustible y que retienen las pequeñas cantidades de sustancias radiactivas que pudieran escapar de la primera barrera, impidiendo que pudieran pasar al refrigerante;

La tercera es el circuito de refrigeración formado por la vasija del reactor, de acero especial de 20 a 25 cm de espesor y revestida interiormente de acero inoxidable, y todos los sistemas auxiliares del mismo; y

La cuarta barrera es el edificio de contención, construido de hormigón armado sobre una losa, también de hormigón, y recubierto interiormente por una chapa de acero para asegurar su hermeticidad.



Para proteger estas barreras de protección existe un conjunto de sistemas que han sido diseñados teniendo en cuenta la aparición de sucesos, posibles pero no esperados, durante el funcionamiento de la central, como por ejemplo un terremoto o una inundación.

Los sistemas que forman parte de las **SALVAGUARDIAS TECNOLÓGICAS** son:

- El sistema de ***protección del reactor***, que iniciaría automáticamente la actuación de los sistemas necesarios para poder detener el reactor mediante la rápida inserción de las barras de control;
- El sistema de ***refrigeración de emergencia del núcleo*** que se encargaría de refrigerarlo en caso de accidente con pérdida de refrigerante;
- El ***sistema eléctrico de emergencia*** que garantizaría el suministro eléctrico para el funcionamiento de los sistemas y componentes de la central, incluso después de un fallo del suministro eléctrico normal; y
- El ***sistema de contención***, que tiene como misión principal mantener dentro de los límites aceptables las descargas radiactivas al medio ambiente en caso de accidente (**Blindaje biológico**).

Sistema Eléctrico de Emergencia

Generadores diésel

Los generadores diésel son empleados para energizar el sitio durante situaciones de emergencia. Usualmente ellos son de una capacidad tal que solo uno es capaz de proporcionar toda la energía requerida para realizar el apagado durante una situación de emergencia, lo que permite tener múltiples generadores para mejor redundancia.

Motor generador por volante de inercia

La pérdida de energía eléctrica puede suceder de forma repentina, y puede dañar o romper equipos. Para prevenir el daño, los motores generadores pueden estar conectados a volantes de inercia que pueden proporcionar energía eléctrica en forma continua por un breve período de tiempo.

A menudo ellos son usados para proporcionar energía eléctrica hasta que el abastecimiento eléctrico de la central puede ser cambiado a las baterías y/o generadores diésel.

