



## **UNIDAD DIDÁCTICA 1**

# **LA ENERGÍA NUCLEAR. CENTRALES**



## Introducción



Vídeo introducción: <https://www.youtube.com/watch?v=ENkpJ38kQ3k>

## 1.1 La energía nuclear.

### Introducción

La energía es una de las fuerzas vitales de nuestra sociedad. Nuestro estilo de vida sería imposible sin energía. De ella dependen, entre otras cosas, la iluminación de interiores y exteriores, el calentamiento y refrigeración de nuestras casas, el transporte de personas y mercancías, la obtención de alimentos y su preparación, o el funcionamiento de las fábricas.

Hace poco más de un siglo las principales fuentes de energía eran la fuerza de los animales y la de los hombres (energía mecánica) y el calor obtenido al quemar madera (energía calorífica). El ingenio humano también había desarrollado algunas máquinas con las que aprovechaba la fuerza hidráulica para moler los cereales o preparar el hierro en las herrerías, o la fuerza del viento en los barcos de vela y los molinos de viento. Pero la gran revolución vino con la máquina de vapor.

Si bien James Watt no inventó la máquina de vapor, realizó, en la segunda mitad del siglo XVIII, una serie de mejoras tales que permitieron utilizarla en miles de aplicaciones, dando lugar a la Revolución Industrial.

A finales del siglo XIX comenzó a utilizarse la energía eléctrica, principalmente para la iluminación de las calles y las casas. Poco a poco fueron surgiendo gran número de aplicaciones que convirtieron a esta energía en el motor de una segunda revolución industrial.

James Watt da nombre a la unidad de potencia en el Sistema Internacional de Unidades: El vatio (en inglés: watt). Su símbolo es W. Esta unidad también se utiliza para referirse a la potencia eléctrica. Un kilovatio (1kW), es decir, mil vatios 1000 W, equivale a 1,36 caballos de vapor (CV).

La energía nuclear lleva ya más de 50 años entre nosotros (la primera central nuclear entró en funcionamiento en el año 1951). Se trata de una tecnología que proporciona una gran cantidad de energía por unidad de masa, casi 100 millones de veces más de energía por una reacción de fisión nuclear que por una reacción de combustión. Como explicaremos en el siguiente capítulo, la energía se obtiene del calor producido por la pérdida de masa en la reacción nuclear.

Respecto a las otras fuentes de energía, la energía nuclear presenta una serie de particularidades:

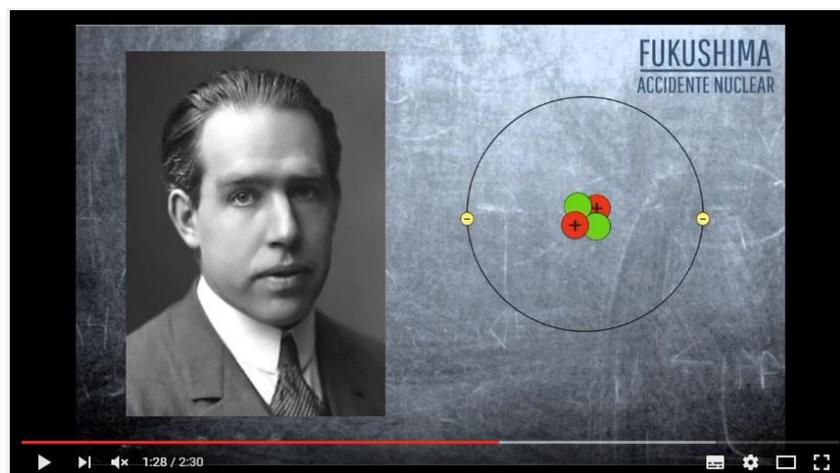
- Las reacciones de fisión nuclear provocan la generación de productos radiactivos, lo que obliga a extremar las medidas de seguridad, siendo un proceso crítico. Por ello, en todo momento se están controlando las reacciones presentes en el reactor y es necesario desarrollar la tecnología de protección radiológica y una vigilancia radiológica ambiental para asegurar que no tengan efectos nocivos sobre el público ni el medio ambiente.
- El reactor siempre produce calor incluso cuando está parado y no hay reacciones de fisión, el calor residual, por lo que toda central debe contar con sistemas de extracción de calor disponibles en todo momento. Como veremos más adelante, esta particularidad es especialmente crítica en caso de accidente.

- El núcleo del reactor tiene una carga de combustible suficiente para funcionar, según los diseños, del orden de 18 meses a plena potencia sin paradas.
- Es una industria con una regulación muy estricta:
  - o Nivel internacional: Hay múltiples organismos internacionales que favorecen la creación conjunta de conocimiento y la mejora de la seguridad así como la coordinación entre los distintos países. Podemos hablar de, por ejemplo, el Organismo internacional de Energía Atómica (OIEA, IAEA en siglas inglesas), la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA), la comunidad europea de la energía atómica (EURATOM).
  - o Nivel nacional: El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), organismo regulador en España. Vela por el cumplimiento de la normativa (inspecciones anuales en las centrales nucleares, inspectores residentes en centrales...) y, en general, por la seguridad de las centrales nucleares españolas.

Hay que destacar la alta formación y cualificación de los trabajadores del sector, unido a una cooperación internacional en el intercambio de conocimiento operativo y la no competencia entre centrales.

Otra particularidad es la gran influencia de la opinión pública sobre las decisiones políticas en este campo y, por tanto, la trascendencia de la comunicación al público en esta materia. En general, se observa que en los países con mayor número de centrales nucleares la opinión pública es mejor. En este sentido, tenemos como ejemplo a Finlandia donde actualmente hay cuatro centrales en operación, una está en construcción y está planificada una más. A su vez, los países donde no hay ninguna central en operación suelen tener peor opinión pública de la energía nuclear. No obstante, si vemos el caso español, que ocupa el 6º lugar de peor opinión pública, es un país que con ocho centrales nucleares está entre los que peor opinión pública tienen. Por ello, se requiere un trabajo continuado de comunicación clara y consistente.

### Historia de la energía nuclear

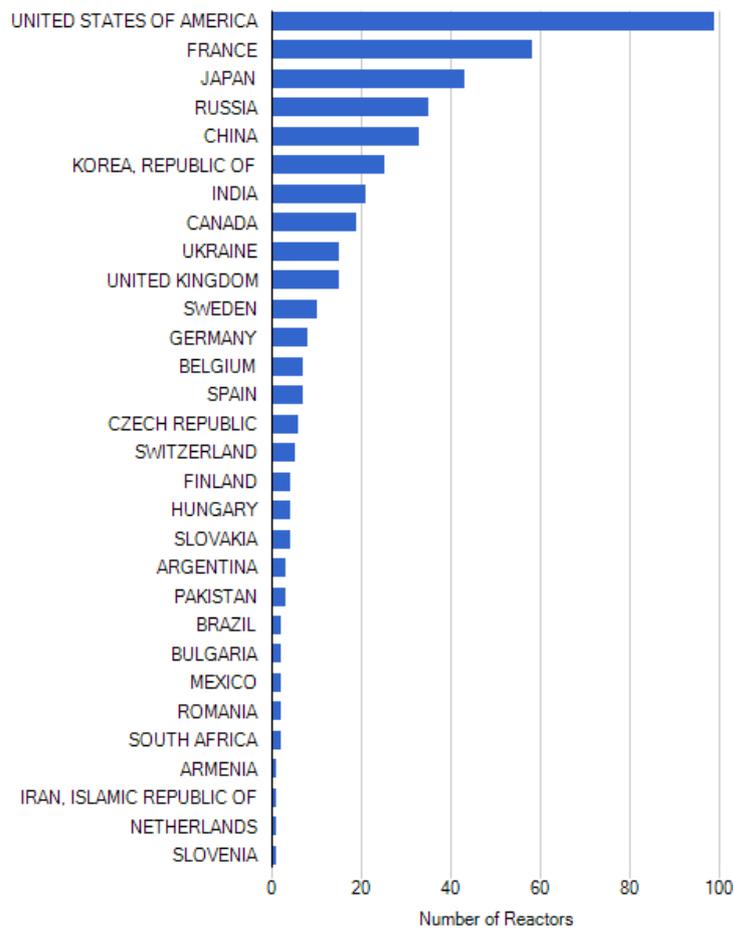


Vídeo 1: <https://www.youtube.com/watch?v=nCWQWFXqmks>

### Situación actual de la energía nuclear

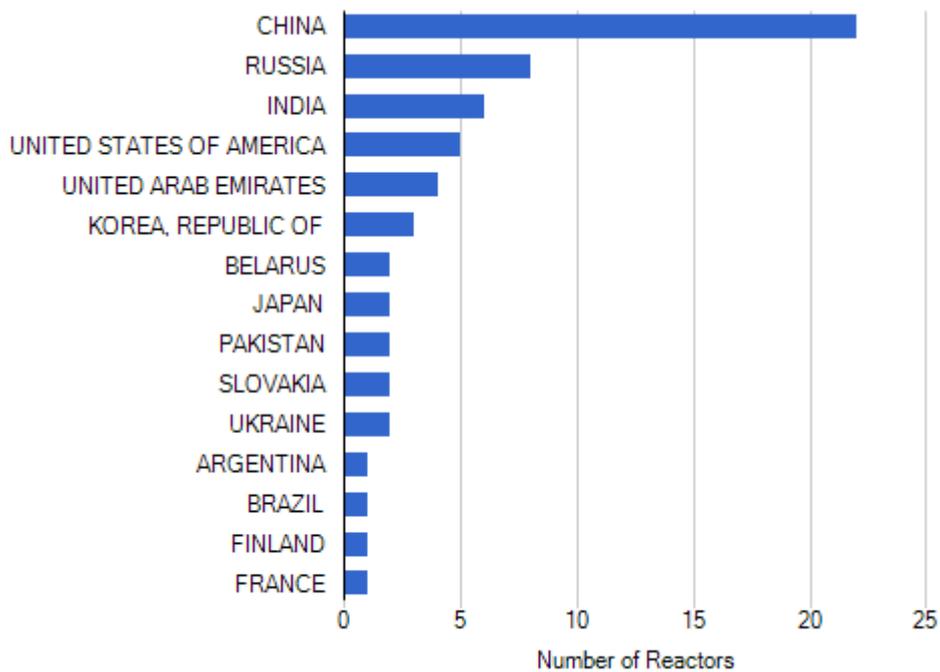
Como podemos observar en las figuras 1 y 2, en marzo de 2016, según el Sistema de Información de Reactores Nucleares (PRIS) de la IAEA, habían 444 centrales nucleares operando en todo el mundo (el 78% están en países de la OCDE) y 64 reactores en construcción.

**Figura 1. Número de reactores en servicio: 444**



Fuente: IAEA. Power Reactor Information System. (12/04/2016)  
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

**Figura 2. Número de reactores en construcción: 64**



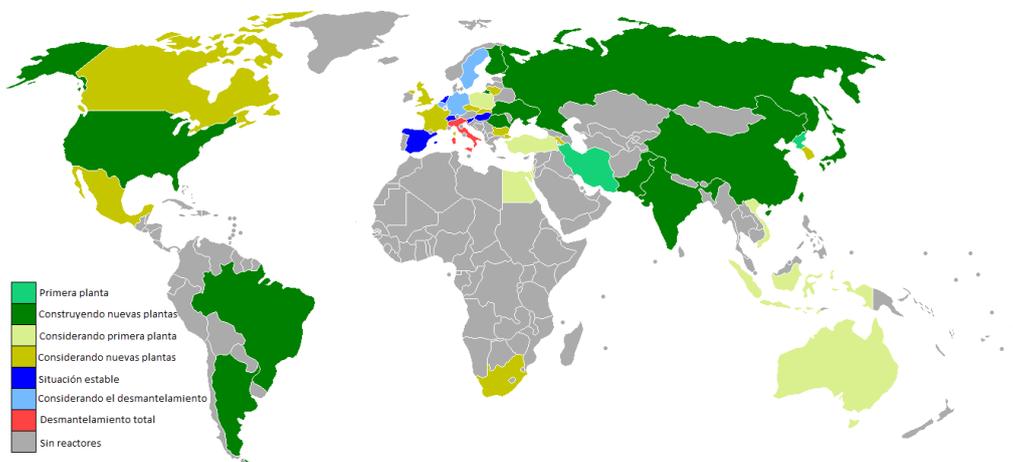
Fuente: IAEA. Power Reactor Information System.

<https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx> (12/04/2016)

Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Hay un desplazamiento de la construcción de centrales nucleares de occidente a Asia ya que prácticamente el 80% está realizándose en China, India, Corea y Rusia, como se observa en la figura 3. No obstante, en Estados Unidos se han autorizado cuatro nuevas centrales que están en construcción y que se están finalizando una central en Brasil y otra en Argentina.

**Figura 3. Estado de las centrales nucleares a nivel mundial**

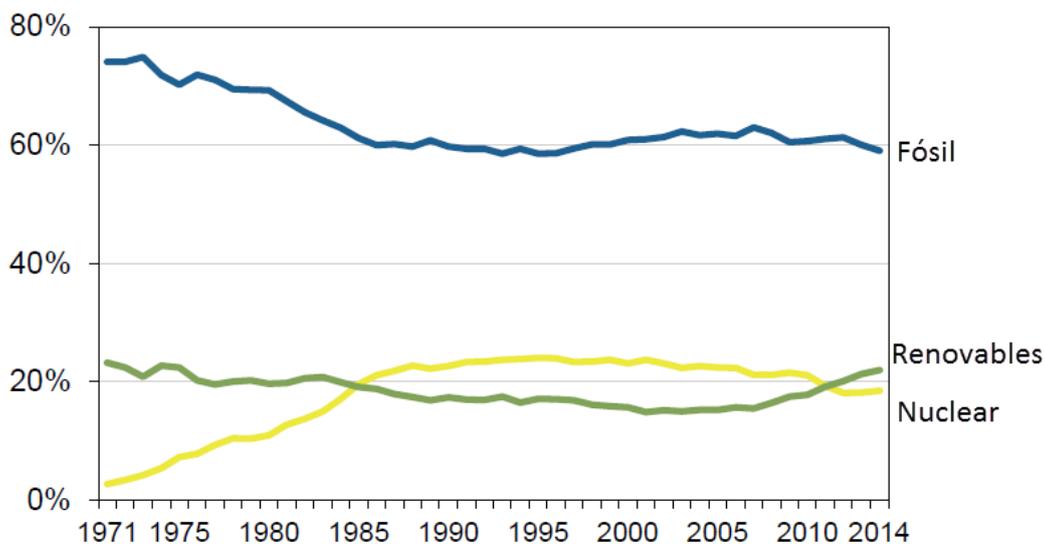


Fuente: Dominio público (13/04/2016)

Por otro lado hay 240 reactores de investigación en funcionamiento en 56 países.

El conjunto de fuentes de energía renovable en la generación de electricidad superó en volumen a la nuclear en 2011 y ha seguido aumentando esta diferencia, en parte como consecuencia del progresivo cierre de las plantas nucleares en Japón tras el accidente nuclear de Fukushima (la generación nuclear en Japón en el 2014 fue nula). En la figura 4 podemos observar la evolución del mix de generación de electricidad en los países de la OCDE.

**Figura 4: Evolución del Mix de Generación de Electricidad en la OCDE: 1971-2014**



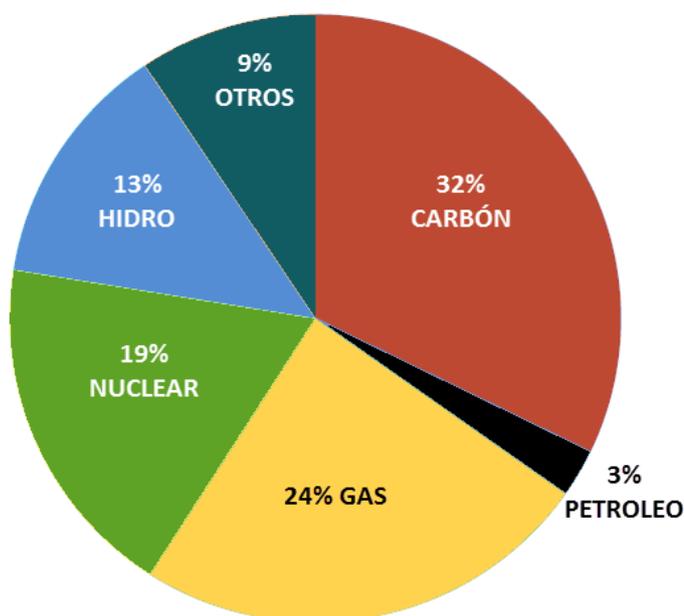
Fuente: © OECD/IEA *Energy Balances of OECD Countries (2015 Edition)*. IEA Publishing.

Licence: <http://www.iea.org/t&c/termsandconditions/>

Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

A pesar del crecimiento de las renovables, la generación con combustibles fósiles apenas ha variado desde 1985, después de la entrada de la producción nuclear. El mix de generación en los países de la OCDE en 2014 ha permanecido dominado por los combustibles fósiles, principalmente carbón y gas, como se representa en la figura 5.

**Figura 5. Mix de Generación de Electricidad en 2014 en la OCDE**



Fuente: Elaboración propia

La fisión nuclear contribuye de forma importante al mix de generación: en el 2014, las centrales eléctricas de fisión nuclear produjeron el 19% de la electricidad de los países de la OCDE.

### **El panorama energético mundial**

En los últimos años, el escenario energético mundial y europeo ha cambiado sustancialmente. Se ha producido un incremento muy importante de la demanda energética, particularmente de la eléctrica, aumentada de forma espectacular por el desarrollo de los países emergentes.

Al mismo tiempo, ha surgido la amenaza de un cambio climático originado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono, procedentes fundamentalmente de la combustión de los combustibles fósiles. Conviene considerar que, pese a las llamadas al ahorro energético, indudablemente necesarias, la demanda energética va a continuar su escalada, impulsada por el aumento de población y la acelerada incorporación de las sociedades emergentes a los niveles de consumo de los países desarrollados. Además, a más largo plazo habrá que utilizar crecientes cantidades de energía para sustituir la empleada en el sector del transporte por otra no emisora de gases de efecto invernadero y para la producción de agua potable por desalación del agua del mar. Hay que esperar, por tanto, una fuerte penetración de la electricidad como sustitutiva del uso directo de los combustibles fósiles.

Ante esta situación, en el futuro va a ser necesario contar con todas las fuentes disponibles, incluida la nuclear, en un mix energético lo más equilibrado posible, de tal forma que se alcancen de forma simultánea los criterios necesarios de sostenibilidad, competitividad y garantía de suministro.

Las centrales nucleares se presentan como parte de la solución a corto plazo para el problema del calentamiento global ya que, junto con otras fuentes de energía sostenibles, la energía nuclear es un método de la producción de electricidad de baja generación carbono. La emisión de gases de efecto invernadero por unidad de energía generada es similar a otras fuentes renovables.

Organizaciones como la Asociación Nuclear Mundial (WNA), la Agencia Internacional de la Energía (IAEA) y ambientalistas para la Energía Nuclear sostienen que la energía nuclear es una fuente de energía segura, sostenible, que reduce las emisiones de carbono, mientras que otras organizaciones como Greenpeace Internacional y Nuclear Information and Resource Service (NIRS), sostienen que la energía nuclear plantea muchas amenazas a las personas y al medio ambiente.

Ha habido varios accidentes en plantas de energía nuclear, como el accidente de Three Mile Island (1979), el desastre de Chernobyl (1986) o el desastre nuclear de Fukushima Daiichi (2011). También ha habido algunos accidentes en submarinos nucleares. En términos de vidas perdidas por unidad de energía generada, el análisis ha determinado que la energía nuclear ha causado menos muertes por unidad de energía generada que las otras fuentes principales de generación de energía. La producción de energía a partir del carbón, el petróleo, el gas natural y la energía hidroeléctrica causa un mayor número de muertes por unidad de energía generada debido a la contaminación del aire y a los efectos de los accidentes. Sin embargo, el coste económico de los accidentes nucleares es alto, y éstos pueden generar zonas inhabitables durante períodos muy largos. Los costes humanos de las evacuaciones de las poblaciones afectadas y de los medios de vida perdidos también son significativos.

Según la IAEA la estrategia energética debe considerar el desarrollo de fuentes de energía inteligentes que permitan que la energía sea más sostenible, con mayor seguridad de suministro, aumentar la independencia energética (mayormente de áreas geográficas en conflicto) y que sea competitiva.

La energía nuclear contribuye de manera significativa a la mayoría de los criterios anteriormente comentados. Por tanto la energía nuclear forma parte de la solución. En este caso, habría que incrementar la potencia nuclear instalada y pasar de los 400 GW a los 650 GW de capacidad instalada para el 2025.

### **Futuro de la energía nuclear**

La energía nuclear presenta una enorme barrera de entrada ya que las centrales nucleares están al alcance de muy pocos inversores porque requieren grandes recursos financieros y conocimientos muy especializados, lo que implica que en la práctica, un operador nuclear no reside en una sola empresa sino en un conglomerado de ellas y, normalmente, va ligado al

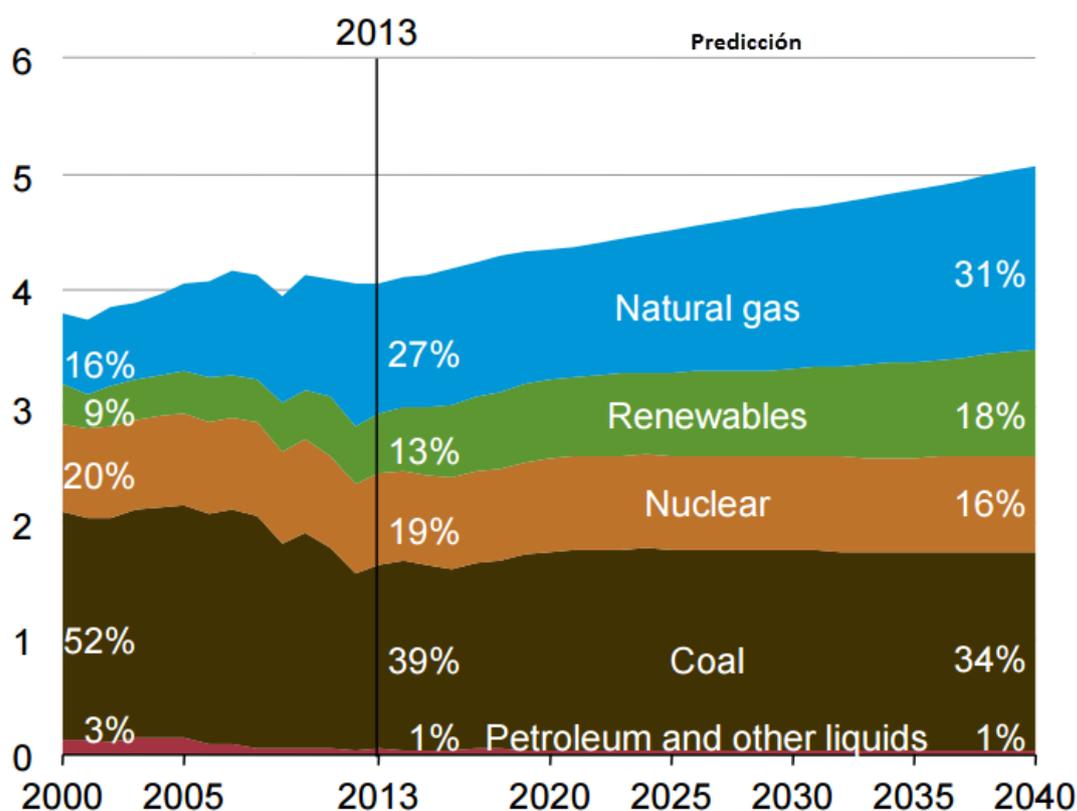
desarrollo tecnológico del país. Esta elevada inversión inicial y las incertidumbres durante la construcción de un proyecto exigen una planificación de larga duración.

La inestabilidad de los precios de la energía según en qué áreas geográficas requiere unos contratos a largo plazo para asegurar el retorno de la inversión a muy largo plazo.

La selección del emplazamiento es crítica: criterios sísmicos, infraestructuras, red eléctrica, disponibilidad de foco frío, etc.

El accidente de Fukushima ha ocasionado el aumento de la seguridad de las centrales nucleares, y ha demostrado que la seguridad actual es tremendamente satisfactoria. La Unión Europea reaccionó de manera inmediata y requirió que se llevaran a cabo inspecciones en todas las centrales para asegurar que los sistemas estaban en perfectas condiciones para hacer frente a sucesos similares. También se llevaron a cabo pruebas de resistencia para conocer hasta qué punto las centrales serían capaces de operar de forma segura en caso de sucesos mayores que los de las condiciones de diseño. Estas medidas las trataremos en profundidad en capítulos posteriores.

**Figura 6. Previsión de generación de electricidad 2000-2040 (Millones de MWhora)**



Fuente: Annual Energy Outlook 2015. (Abril 2015). US Energy Information Administration.  
Dominio Público.

## El ejemplo español

En España existen actualmente 7 reactores nucleares en funcionamiento: Almaraz I y II, Ascó I y II, Cofrentes, Trillo I y Vandellós II. La central de José Cabrera, más conocida como Zorita, y la central Vandellós I se encuentran en proceso de desmantelamiento. Recientemente (marzo del 2016) se ha declarado el cierre definitivo de la central nuclear de Santa María de Garoña.

Entre todas las centrales nucleares españolas se produce una potencia de más de 7.700 MW, que cubre, aproximadamente, un 20% de las necesidades del país.

Con la profunda crisis financiera y en una situación en la que la energía está dominada por combustibles fósiles que suponen una alta dependencia exterior, desde el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) se aconseja mantener el parque nuclear con las mismas o mejores condiciones de eficiencia y de seguridad.

Ahora bien, el consumo ha caído de manera significativa (los valores actuales se asemejan a los del 2005) y por tanto hay una sobrecapacidad instalada, más de 100.000 MW, mientras que la punta de consumo son 40.000 MWh. Añadimos una conexión internacional escasa y que para el sector nuclear es necesaria una regulación sostenible y predecible ya que la vida útil de la central está actualmente en 60 años. Y por último, el desmesurado déficit de tarifa es un gran inconveniente para la construcción de nuevas centrales.

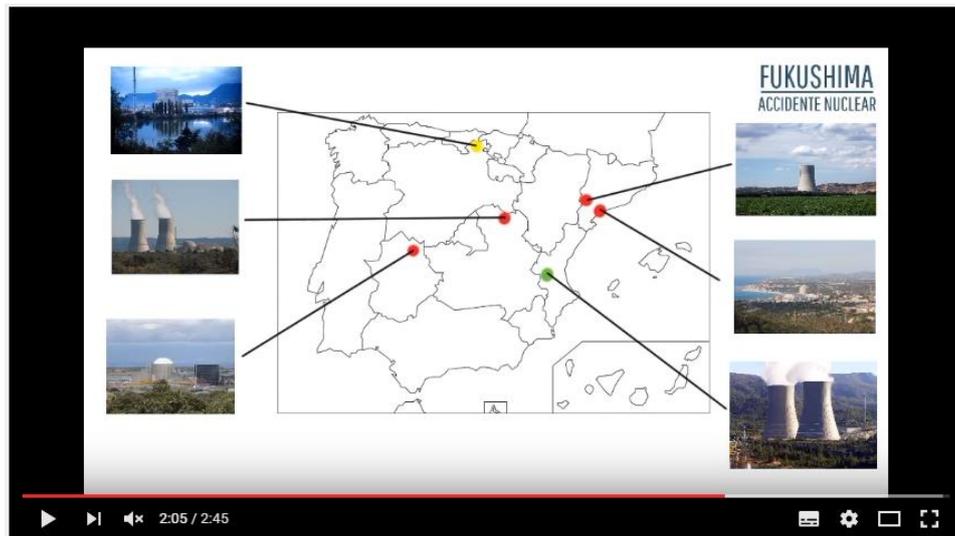
Las centrales nucleares españolas están en los mejores niveles de seguridad si las comparamos internacionalmente, en los mejores niveles de eficiencia, y están preparadas para una operación a largo plazo hasta 60 años. La energía nuclear representa el 8% del total de capacidad instalada siendo la principal fuente de contribución a la energía producida en el 2014 con un 22%.

En la figura 7 se puede observar cómo se distribuyen las diferentes tecnologías de generación en el mix en España.

**Figura 7. Mix de generación de electricidad en España en 2014**



Fuente: El Sistema Eléctrico Español. Avance del Informe 2014. Red Eléctrica de España.  
[http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance\\_informe\\_sistema\\_electrico\\_2014b.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2014b.pdf)  
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.



Vídeo 2: <https://www.youtube.com/watch?v=sLlKZEQ7Zw>

## 1.2 La fisión y la fusión nuclear.

La fisión y la fusión nuclear son dos procesos antagónicos que, sin embargo, tienen algo en común: ambos liberan grandes cantidades de energía susceptible de ser utilizable.

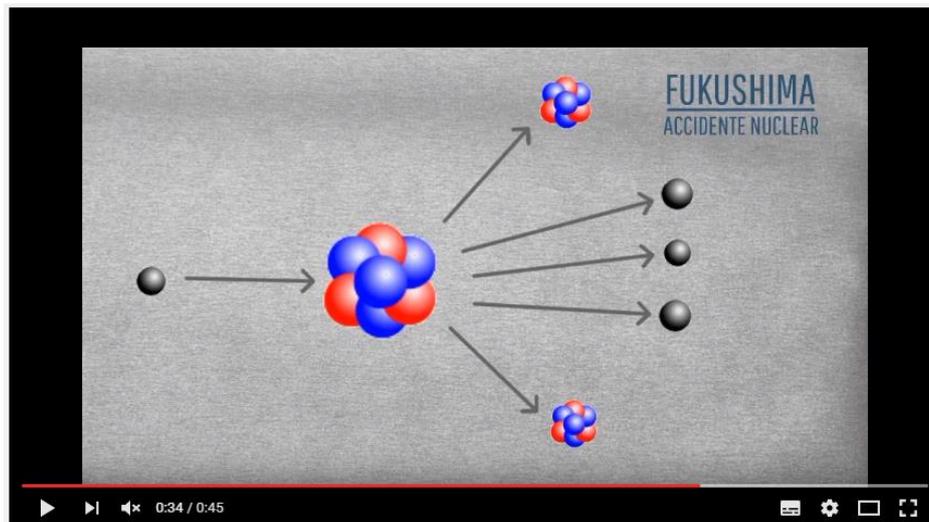
### Fisión Nuclear

Ésta es la reacción más importante ya que las centrales nucleares actuales basan su funcionamiento en este tipo de reacciones.

Las reacciones de fisión nuclear consisten en la división del núcleo (que posee más del 99'9% de la masa total del átomo) de un átomo de alto peso atómico (por ejemplo uranio-235, que es el más habitual que se usa en las centrales nucleares convencionales) en otros más ligeros (llamados productos de fisión), por medio de bombardeo con partículas, por ejemplo con neutrones, liberando en el proceso una enorme cantidad de energía y dos o tres neutrones más. Estos neutrones a su vez pueden dividir otros átomos y generar una reacción en cadena.

Cuando este proceso de fisión nuclear está controlado y la energía es liberada lentamente en un reactor nuclear, puede transformarse en energía eléctrica.

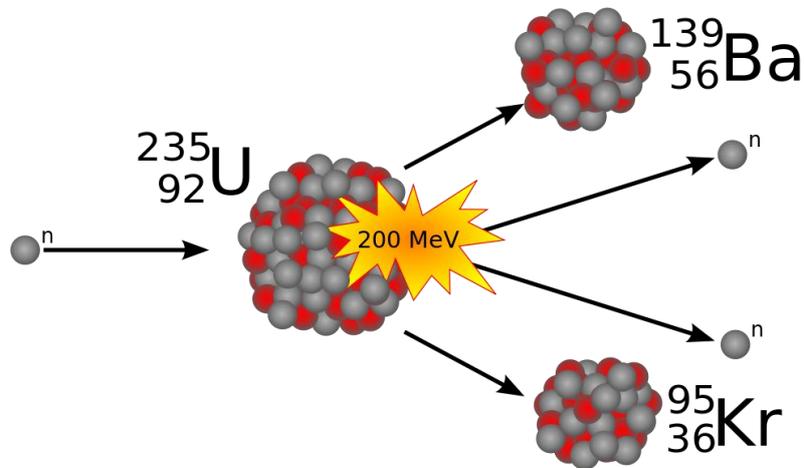
Los isótopos que tienen esa capacidad de fisionarse como por ejemplo el uranio-235 (U-235), el plutonio-239 (Pu-239) y el plutonio-241 (Pu-241), de uso común en reactores nucleares.



Video 3: <https://www.youtube.com/watch?v=mWhbda2KvuA>

Tal y como inicialmente postuló Einstein en su famosa ecuación  $E=mc^2$  (Energía igual a masa por la velocidad de la luz al cuadrado), existe una equivalencia entre la energía y la masa. Así, el núcleo pesado inicial (material fisible) tiene una masa superior a la suma de los dos núcleos en los que se divide y, por tanto, según la mentada ecuación, la diferencia de masa se transforma en energía. En la figura 8 se puede observar un ejemplo de fisión de un átomo de Uranio-235.

Figura 8. Fisión nuclear

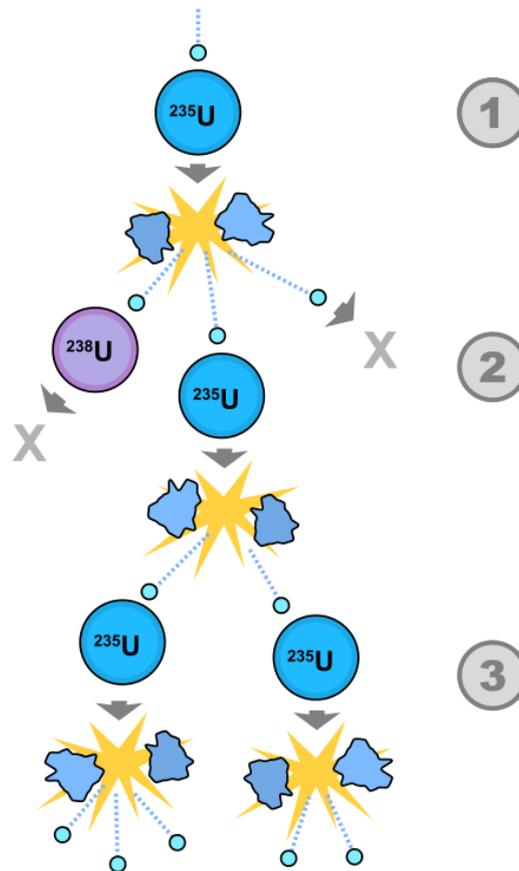


Fuente: Por Stefan-Xp Obra derivada: Wondigoma (Kernspaltung.png)  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernspaltung.svg?uselang=es>  
06/09/2015 CC-BY-SA-3.0

### Reacción en cadena

Si en las inmediaciones del núcleo que ha fisionado hay otros núcleos susceptibles de ser fisionados, éstos pueden absorber los neutrones emitidos por la fisión del primer núcleo, y a su vez emitirán nuevos neutrones que serán absorbidos por otros núcleos del material fisible y así sucesivamente como se puede observar en la figura 9, teniendo lugar una reacción en cadena, que es la clave para el funcionamiento de las centrales nucleares.

Figura 9. Reacción en cadena



Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fission\\_chain\\_reaction.svg?uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fission_chain_reaction.svg?uselang=es)  
06/09/2015 Dominio Público

En un reactor nuclear, la reacción en cadena debe ser autosostenida durante mucho tiempo, todo lo que dura el ciclo de operación entre las recargas de combustible (normalmente entre uno y dos años según el diseño del reactor). Por eso es una fuente continua de energía térmica, gracias a la ingente cantidad de fisiones nucleares que se producen a lo largo de ese periodo.

Los productos de la fisión tienen una energía cinética alta, lo que se traduce en una temperatura elevada. La clave para controlar una reacción en cadena es tener bajo control el número y la energía de neutrones presentes en el reactor nuclear. Así, se debe ser capaz de capturar dos de los tres neutrones que aparecen como promedio en dichas reacciones.

Esto es posible gracias a que hay elementos que absorben neutrones de forma muy eficiente sin que produzcan reacciones nucleares que emitan tales partículas como contrapartida.

## **Neutrones térmicos y neutrones rápidos**

A nivel atómico, la energía la medimos en una unidad llamada electronvoltio (eV). La energía de los neutrones que se generan en la reacción de fisión es de entre 1 y 20 MeV (entre 1 y 20 millones de electronvoltios), por eso se llaman neutrones rápidos, por su alta energía. Sin embargo la energía del neutrón que con más probabilidad fisiona en los reactores convencionales (donde mayoritariamente se fisiona Uranio-235) es de apenas 0,025 eV. Por tanto, es necesario reducir la energía de estos neutrones. Para conseguir reducir la energía hasta esos valores (8 órdenes de magnitud menor), se utiliza un moderador, que puede ser agua o grafito. Mediante choques entre los átomos del moderador y los neutrones se reduce la energía de éstos últimos. A este proceso se le llama termalización o moderación de los neutrones.

Los reactores pueden operar con espectro térmico o espectro rápido.

Los reactores que operan con espectro térmico, que son la gran mayoría de los reactores nucleares actuales, usan agua como refrigerante y moderador y cuentan con la seguridad intrínseca de que la reacción en cadena se detendrá si falta el agua en el reactor, ya que es el intermediario para reducir la energía del neutrón tal cual se genera en la fisión hasta la energía adecuada para que se produzcan las sucesivas fisiones en el uranio-235.

También están los reactores de espectro rápido, que usan los neutrones rápidos y que permiten mejorar el rendimiento del combustible nuclear posibilitando también el uso de otros combustibles distintos al uranio enriquecido en uranio-235.

Las centrales nucleares que se van a estudiar en este curso operan todas con espectro térmico, usando agua como refrigerante y moderador.

## **Calor residual**

En los reactores de fisión, los productos que se forman en este entorno (no son todos consecuencia de fisiones) son muy variados. Entre los muchos elementos producidos, encontramos los transuránidos, que son elementos más pesados que el uranio, generados al absorber éste neutrones y son altamente radiactivos durante muchos años desintegrándose lentamente y liberando energía.

Así, en un reactor nuclear cuando se ha detenido la reacción en cadena el combustible sigue produciendo calor durante muchos años debido a la desintegración del material radiactivo que ha ido generándose. Este calor es el calor residual, y por ello es necesario que el reactor sea refrigerado continuamente, incluso cuando está parado. El calor residual decrece de forma aproximadamente exponencial, tal y como decrece la actividad de los isótopos radiactivos que lo producen. Es decir, el combustible, después de terminar las reacciones de fisión, produce mucho calor a corto plazo, reduciéndose enormemente a largo plazo. Normalmente, el combustible gastado del reactor debe pasar al menos cinco años en una piscina refrigerándose antes de poder ser almacenado en contenedores, debido a ese alto calor residual.



Audio Radio Uned: [https://www.youtube.com/watch?v=6KJGFxNsz\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=6KJGFxNsz_c)

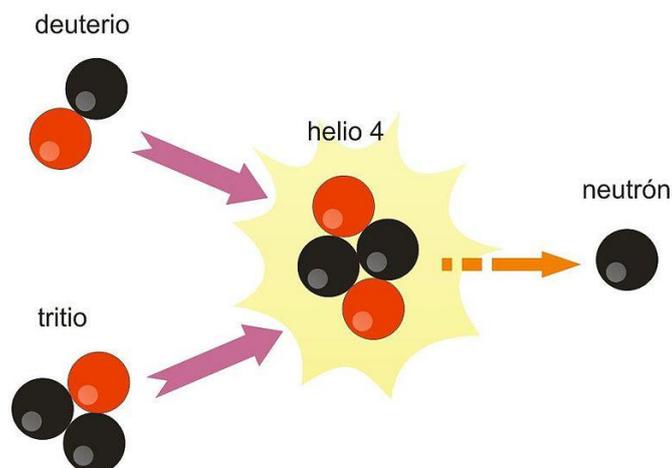
La refrigeración del calor residual es una de las cuestiones que tiene que mantener bajo control una central nuclear. Como veremos, el calor residual tuvo una importancia crucial en el desarrollo del accidente de Fukushima.

### Fusión Nuclear

Las reacciones de fusión nuclear son inversas a las de fisión. La fusión nuclear es un proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado, con la particularidad de que su masa es inferior a la suma de las masas de los dos núcleos iniciales. Es decir, el núcleo final es más estable que los núcleos iniciales. Si el núcleo final tiene menos masa que los dos núcleos iniciales, ese defecto de masa, tal y como hemos comentado antes, se ha transforma en energía que es liberada.

La reacción de fusión más fácil de conseguir en la tierra, es aquella en la que interaccionan los núcleos de dos isótopos del hidrógeno (el deuterio  $H_2$  y el tritio  $H_3$  dando lugar a un núcleo de helio y un neutrón, además de energía. El deuterio existe en la naturaleza en una proporción muy baja y el tritio se crea de forma artificial en laboratorio.

Figura 10. Fusión nuclear



Para que este tipo de reacciones tenga lugar se necesita un enorme aporte de energía que finalmente permita que los núcleos ligeros venzan la fuerza de repulsión que existe entre ellos (ambos están cargados positivamente). Debido a las altas temperaturas que se alcanzan en este proceso, los átomos se desprenden de los electrones y la materia pasa a un estado especial, denominado plasma, una especie de gas compuesto de electrones e iones. Debido a las elevadísimas temperaturas que alcanza, que no existe ningún material conocido que las resista, el plasma no puede ser confinado de ninguna manera excepto por medio de enormes campos magnéticos o mediante potentísimos rayos láser que permiten el confinamiento.

Actualmente existen varias líneas de investigación para poder conseguir, en el futuro, un reactor de fusión nuclear para la generación de energía eléctrica.

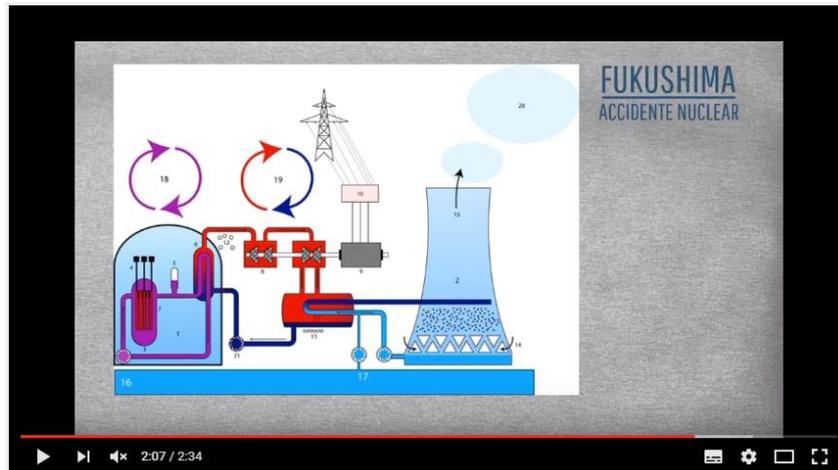


Vídeo 4: <https://www.youtube.com/watch?v=c7yWbAeiLvw>

## 1.3 Las centrales nucleares.

### Introducción

Casi todas las centrales de producción eléctrica, con la excepción de las fotovoltaicas, tienen algo en común: la electricidad se produce haciendo girar una máquina llamada alternador o generador eléctrico. Lo que diferencia a unas centrales de otras es la forma en la que se hace girar este generador.



Vídeo 5: <https://www.youtube.com/watch?v=NptB16DbYU>

Una central nuclear es un tipo de central térmica, con la distinción fundamental de que la obtención del vapor para accionar la turbina que hace girar el alternador, no se produce a partir de energías convencionales como la del carbón o la del petróleo, sino mediante reacciones nucleares. Esta reacción conlleva una liberación energética muy importante, puesto que en ella se da un defecto de masa de un 0,1%, siendo éste uno de los mecanismos básicos de mayor liberación energética por unidad de masa. La materia prima nuclear que se utiliza para alimentar las centrales nucleares normalmente es el uranio, pues el ciclo del torio, el otro material fisionable abundante en la Tierra, no ha sido comercializado hasta la fecha por carecer de isótopo fisible.

Dado que la diferencia fundamental se presenta en el foco calorífico de la central, es en dicha parte donde se dan sus características específicas. El hecho de que exista radiación implica diferencias adicionales, incluso en el aspecto físico externo de la central, y por supuesto, en todo lo referente a la protección y a la vigilancia radiológica.

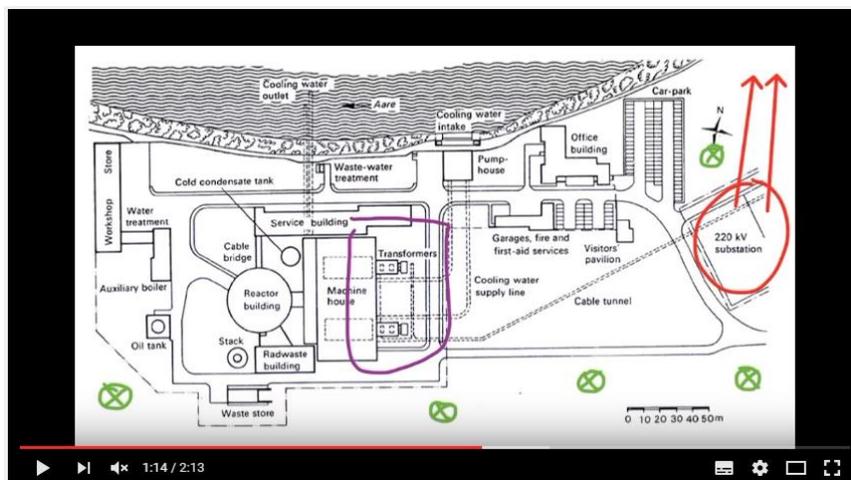
Hay tres características fundamentales que diferencian la energía nuclear del resto:

- La densidad de energía. Tras una parada por recarga, el núcleo del reactor contiene todo el uranio del que se extraerá la energía que se va a producir en el siguiente ciclo (de 12,

18 o 24 meses) dependiendo de la duración del ciclo. Esta característica hace que durante la operación se debe ser especialmente cuidadoso con el control de la reactividad. Como comparación, en una central térmica de carbón, el carbón que se quemará para obtener la energía en los próximos meses no se encuentra dentro del propio generador sino que está almacenado en los silos o probablemente en la mina.

- El calor residual. Como hemos visto en el capítulo anterior, cuando se para el reactor (la reacción en cadena) aún debemos extraer el calor residual, pues en caso contrario llegaremos a la fusión del núcleo, como ocurrió en el accidente nuclear de Three Mile Island o en el de Fukushima. En una térmica, cuando paramos la combustión, la extracción del calor remanente no es crítico.
- La radiación. Durante la operación de la instalación, los productos de fisión y de activación emiten radiación nociva para los seres humanos y el medioambiente. Los residuos producidos y el combustible irradiado, también emiten radiación. Por ello se debe disponer de un sistema de barreras múltiples para evitar que la radiación interacciones con las personas y el medioambiente.

Estas características hacen que durante el funcionamiento de la instalación el objetivo primordial sea la protección del reactor mediante el control de la energía disponible en su interior, la capacidad de extracción del calor residual y la protección de personas y medioambiente con múltiples barreras.



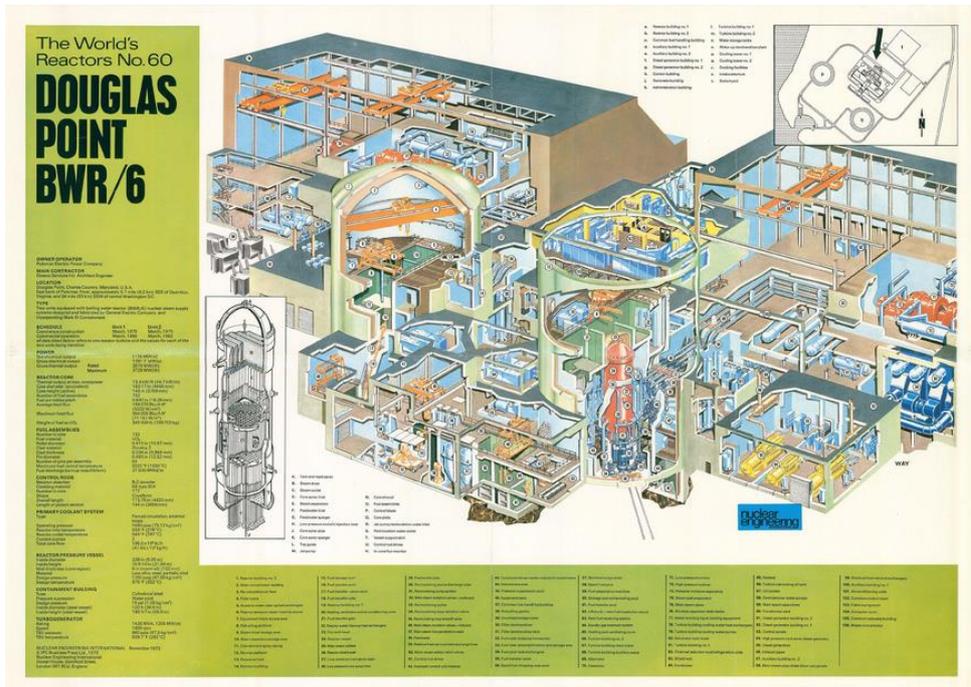
Vídeo 6: <https://www.youtube.com/watch?v=sb1G0toTqw8>

La gran mayoría de las centrales utilizan uranio como combustible para obtener calor. Para ello, los neutrones provocan que se rompan los núcleos de uranio (fisión), liberando gran cantidad de energía. El calor generado se utiliza para calentar agua y producir vapor. El vapor se convierte en energía mecánica en las turbinas y ésta se transforma finalmente en electricidad en el alternador.

## El reactor nuclear

El reactor es la instalación de la central nuclear en la que se inician, mantienen y controlan las reacciones de fisión nuclear en cadena, que producen la energía térmica necesaria para la generación de energía eléctrica.

Figura 11. Ilustración del reactor de una central nuclear



Fuente: Paul K. (CC BY 2.0)

<https://www.flickr.com/photos/bibliodyssey/4194963570/in/album-72157623023520842/>  
10/10/2015 CC-BY-2.0

El reactor consta de una vasija de acero en cuyo interior se dispone un conjunto de elementos de combustible nuclear siguiendo un cierto patrón geométrico. Los núcleos de los átomos del combustible nuclear son impactados por neutrones, lo que provoca su ruptura, dando lugar a la aparición de fragmentos conocidos como productos de fisión y de más neutrones que, a su vez, impactarán de nuevo sobre otros átomos de combustible. En este proceso, conocido como reacción en cadena, se desprende gran cantidad de energía térmica que se utiliza para la producción de vapor de agua. En la figura 11 podemos observar una ilustración de un reactor nuclear que nos proporciona una visión general de éste.

En la mayoría de reactores, para facilitar el proceso de reacción en cadena es necesaria, asimismo, la presencia dentro del reactor de un elemento moderador de los neutrones que se producen en las reacciones de fisión. Esto se debe a que estos neutrones tienen una elevada energía cinética y es conveniente reducir su velocidad para facilitar nuevas reacciones en cadena, lo que se consigue mediante choques elásticos de los neutrones con los átomos del elemento que hace de moderador. El moderador utilizado en las centrales que vamos a estudiar es el agua ligera.

Por otro lado, para controlar de manera segura las reacciones de fisión que tienen lugar en el reactor nuclear existen mecanismos de accionamiento de una serie de barras de control que contienen un material que absorbe los neutrones. Estas barras de control se pueden insertar

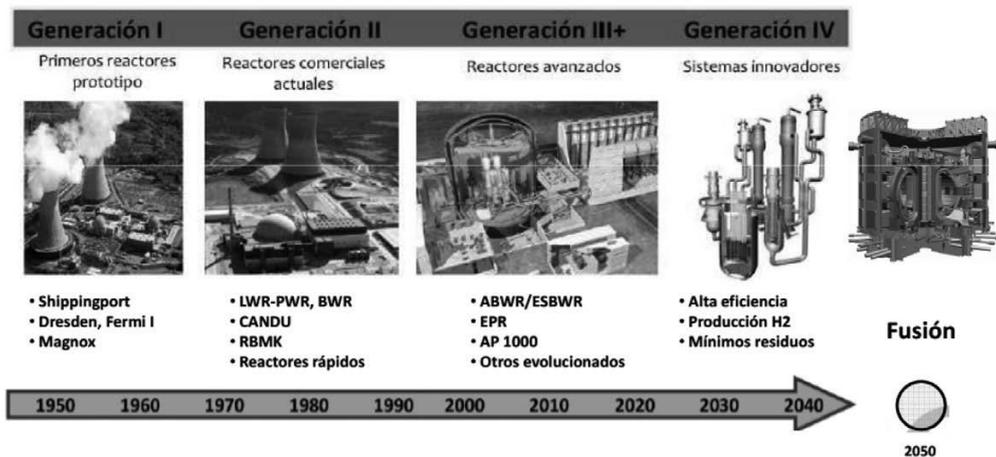
total o parcialmente dentro de la vasija del reactor para impedir en mayor o menor medida que los neutrones sigan desencadenando sucesivas reacciones de fisión. En caso de ser necesario detener todas las reacciones de fisión se insertan inmediatamente todas las barras de control dando lugar a lo que se denomina parada automática, "disparo" o "SCRAM" del reactor. El reactor de una central nuclear está rodeado de un blindaje de hormigón que intercepta las radiaciones ocasionadas en las radiaciones de fisión. Tanto el reactor como los sistemas auxiliares mencionados anteriormente se disponen dentro de un edificio diseñado para limitar las emisiones de radiación en caso de accidente y que se conoce como edificio de contención.

La energía producida por las reacciones de fisión se utiliza para generar el vapor que alimenta la turbina de la central nuclear. Para ello, el agua circula a través del núcleo del reactor aumentando su temperatura. Los dos tipos de centrales nucleares más numerosos en operación se diferencian en si la generación de vapor tiene lugar dentro o fuera del reactor.

### Los diferentes tipos de reactores nucleares

En la figura 12 puede verse la evolución de las centrales nucleares, desde los primeros reactores prototipo en la década de los 60 y 70, que dio paso a los reactores comerciales actuales o de 2ª generación.

Figura 12. Evolución de los reactores nucleares desde 1950



Fuente: Una década de análisis de las tecnologías energéticas. Colección Avances de Ingeniería. Asociación nacional de ingenieros del ICAI. Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas. ICAI. Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Los reactores de 2ª generación son reactores que usan uranio enriquecido (uranio-235 en forma de pastillas) como combustible y agua ligera (agua común) como moderador y se dividen en dos grupos según tecnologías:

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

En este tipo de centrales nucleares, el agua circula en estado líquido y a muy alta presión por el llamado "circuito primario" por medio de unas bombas que la impulsan a través del núcleo del reactor donde se calienta antes de dirigirse a los generadores de vapor. La presión del circuito

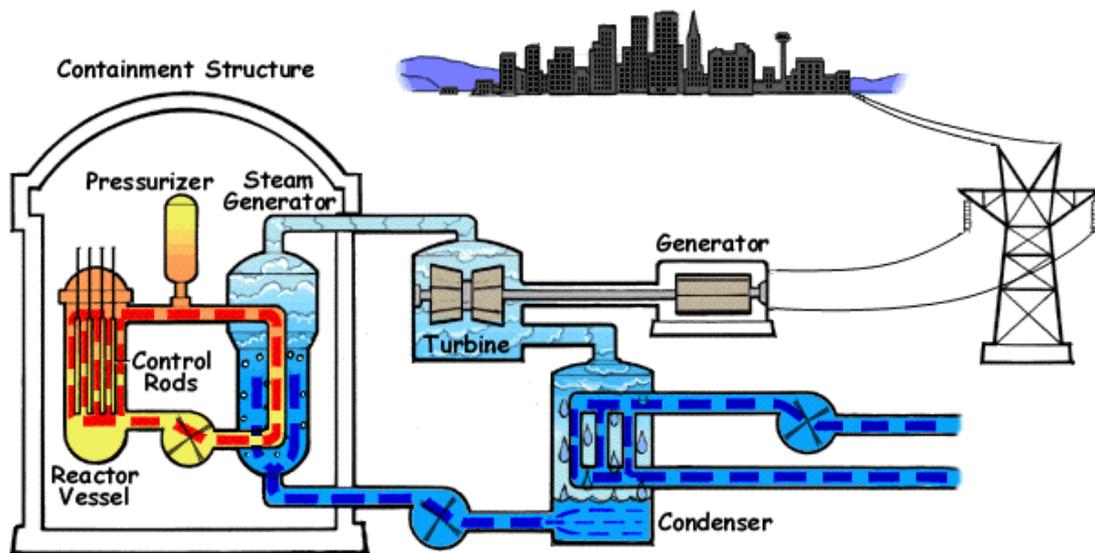
primario se mantiene gracias a un elemento denominado “presionador” cuyo objetivo es evitar la formación de vapor dentro de este circuito.

En estas instalaciones, las barras de control están situadas en la parte superior de la vasija del reactor. En caso de ser necesaria la parada rápida del reactor, ésta se produce por la inserción de las barras de control por acción de la gravedad, al liberarse los mecanismos electromagnéticos de sujeción de las mismas.

El agua líquida a alta temperatura que sale de la vasija del reactor circula a través de los tubos del circuito primario atravesando los generadores de vapor. Dentro de los generadores de vapor, por el exterior de estos tubos circula el agua del circuito secundario, de manera que el agua a alta temperatura del circuito primario calienta el agua del circuito secundario hasta convertirla en vapor. Posteriormente, el vapor se dirige por los tubos del circuito secundario a la turbina, donde se expande haciéndola girar. El giro de la turbina se transmite al generador eléctrico, que es el componente en el que se produce la electricidad, la cual se envía al parque de transformación y, desde allí, a la red eléctrica exterior. Podemos ver un diagrama de este ciclo en la figura 13.

Como en cualquier central térmica, el vapor que sale de la turbina sigue estando muy caliente, por lo que es necesario condensarlo para su retorno al ciclo de agua/vapor. Esta condensación se hace gracias a un tercer circuito exterior de refrigeración que utiliza un gran caudal de agua fría que circula por el interior de los tubos del condensador. El agua fría que circula por los tubos del circuito de refrigeración se calienta a su paso por el condensador y posteriormente se enfría de nuevo mientras los tubos atraviesan lo que se conoce como “sumidero de calor” de la central (río, pantano, mar o torres de refrigeración).

Figura 13. Diagrama de un reactor tipo PWR



Fuente: NRC.  
Dominio Público.

El vapor que se ha condensado al contacto con los tubos del condensador es impulsado para ser precalentado antes de su envío de nuevo a los generadores de vapor. La presión en el condensador es menor que la de los tubos del circuito de refrigeración exterior que lo atraviesan, por lo que en caso de producirse una fisura en los tubos sería el agua de dicho circuito

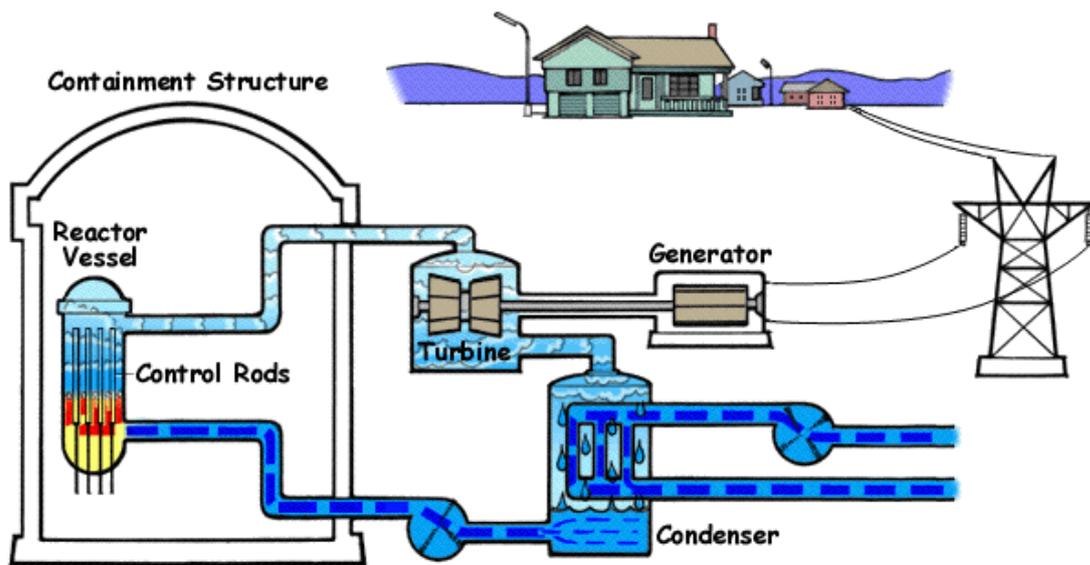
la que se fugaría hacia el condensador y no a la inversa, evitando así posibles escapes al medio ambiente.

- Centrales de agua en ebullición (Boiling Water Reactor o BWR).

En este diseño de centrales, no existe un circuito secundario agua-vapor, sino que es el mismo fluido refrigerante que circula por la vasija y el núcleo del reactor el que se evapora a su paso por el núcleo. De esta manera, de la vasija del reactor sale directamente el vapor que se dirige a la turbina. El funcionamiento de la misma, así como el del alternador, el condensador y el del sistema de agua de alimentación, es análogo al de una central PWR, aunque en este caso el sistema impulsa el vapor condensado directamente hasta la vasija del reactor. En la figura 14 se observan dichas diferencias y similitudes.

La vasija del reactor dispone de unos lazos de recirculación exteriores que permiten, mediante el uso combinado de bombas centrífugas y de chorro, la regulación rápida del caudal del refrigerante/moderador y, por tanto, el control de la potencia del reactor.

Figura 14. Diagrama de un reactor tipo BWR



Fuente: NRC.  
Dominio Público.

En este tipo de reactores, las barras de control están situadas en la parte inferior de la vasija y se insertan en su interior desde abajo mediante un sistema hidráulico que utiliza como fluido el propio refrigerante a alta presión.

Este es el tipo de central que se estudiará con mayor profundidad por ser el tipo de central donde se desarrolló el accidente de Fukushima.

Tabla 1. Diferencias y ventajas entre los reactores PWR y BWR

	PWR	BWR
DIFERENCIAS	El conjunto del combustible y las barras de control está sometido a presión en un tanque para evitar que el agua entre en ebullición. Esta presión se mantiene constante incluso cuando el agua se calienta. El agua calentada pasa a través de unos intercambiadores de calor que producen el vapor que mueve la turbina principal.	El agua del moderador se convierte en vapor y después de pasar por unos secadores y por unos separadores de humedad mueve directamente la turbina principal. No existen generadores de vapor.
VENTAJAS	El agua radiactiva circula en un circuito primario que no entra en contacto con el medio exterior.	No hay pérdida de rendimiento en los intercambiadores de calor.

Existen varias versiones de la contención en función de su antigüedad de las que explicaremos sólo una: Mark I (reactores del 1 al 5) ya que el de tipo Mark II (reactor nº 6) no fue dañado.

Por otro lado están los reactores CANDU de agua pesada (óxido de deuterio) y los reactores rápidos que permiten procesar el combustible gastado.

La tercera generación son las centrales que se han diseñado en la década de los 90 y que se están construyendo actualmente en muchos países aunque conviven con la 2ª generación. Los más conocidos son los ABWR de General Electric, el EPR de Areva y el AP 1000 de Westing House.

En el futuro veremos los reactores que ahora están en fase de desarrollo e investigación y que tomarán el relevo en la década del 2030 que corresponden a la 4ª generación. Por último están los reactores experimentales de fusión, como el proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

### Componentes básicos de un reactor nuclear de agua ligera

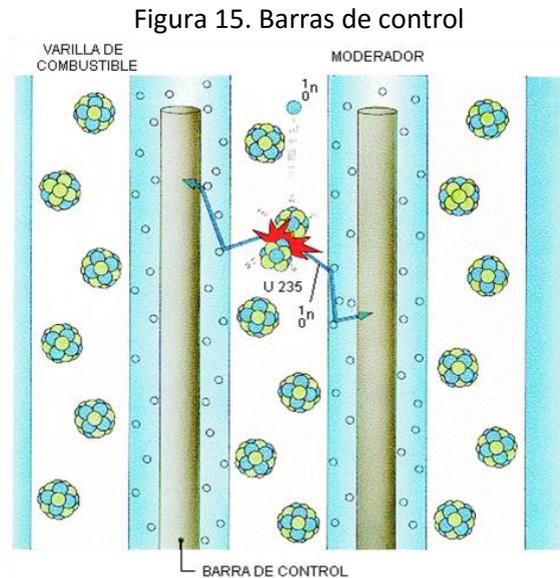
El núcleo es la parte del reactor donde se produce y se mantiene la reacción nuclear en cadena y su objetivo es calentar el agua del circuito primario. Se diseña para operar de forma segura y controlada, de modo que se maximice la cantidad de energía extraída del combustible.

Cada componente del núcleo del reactor juega un papel importante en la generación de calor:

- Barras de control

Los haces de barras de control proporcionan un medio rápido para el control de la reacción nuclear, permitiendo efectuar cambios rápidos de potencia del reactor y su parada eventual en caso de emergencia. Tienen forma cilíndrica y están fabricadas con materiales absorbentes de neutrones (carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio) y suelen tener las mismas dimensiones que las varillas de combustible. La reactividad del núcleo aumenta o disminuye subiendo o bajando las barras de control. En la figura 15 se muestra un ejemplo del funcionamiento de las barras de control.

Para que un reactor funcione durante un período de tiempo tiene que tener un exceso de reactividad, que es máximo con el combustible fresco y va disminuyendo con la vida del mismo hasta que se anula, momento en el que se hace la recarga del combustible.



Fuente: Rincón educativo. Foro nuclear.

<http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/Imagen4.png>

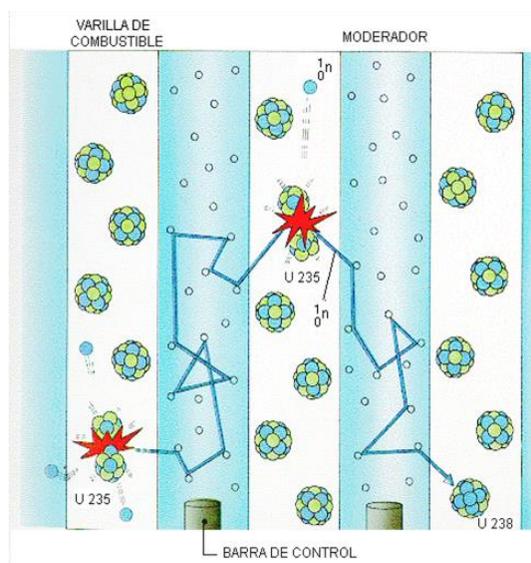
15/09/2015 CC BY-NC 2.5

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 ante un fallo en un sistema de seguridad o de control del reactor, siempre actúa en el sentido de seguridad del reactor introduciéndose las barras de control en el núcleo y llevando el reactor a parada segura en pocos segundos.

- Moderador

Los neutrones producidos en la fisión tienen una elevada energía en forma de velocidad. Para que se produzcan nuevos choques conviene disminuir su velocidad de modo que aumente la probabilidad de que sean capturados por otro átomo fisionable y no se rompa la reacción en cadena. Podemos ver un ejemplo del funcionamiento del moderador en la figura 16.

Figura 16. El moderador



Fuente: Rincón educativo. Foro nuclear.

[http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/barras\\_control.png](http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/barras_control.png)

15/09/2015 CC BY-NC 2.5

Entre los moderadores más utilizados están el agua ligera, el agua pesada y el grafito.

- Refrigerante

La mayor parte de la energía desprendida por fisión es en forma de calor. A fin de poder emplear éste, por el centro del reactor debe pasar un refrigerante, que generalmente transmite el calor a una caldera o generador de vapor. El refrigerante debe ser anticorrosivo, tener una gran capacidad calorífica y no debe absorber los neutrones. Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio, y líquidos como el agua ligera y el agua pesada. Incluso hay algunos compuestos orgánicos y metales líquidos como el sodio que también pueden emplearse para este fin.

- Reflector

En una reacción nuclear en cadena, un cierto número de neutrones tiende a escapar de la región donde ésta se produce. Esta fuga neutrónica puede reducirse con la existencia de un medio reflector, aumentando así la eficiencia del reactor. El medio reflector que rodea al núcleo debe tener una baja sección eficaz de captura.

La elección del material depende del tipo de reactor. Si tenemos un reactor térmico, el reflector puede ser el moderador, pero si tenemos un reactor rápido el material del reflector debe tener una masa atómica grande para que los neutrones se reflejen en el núcleo con su velocidad original.

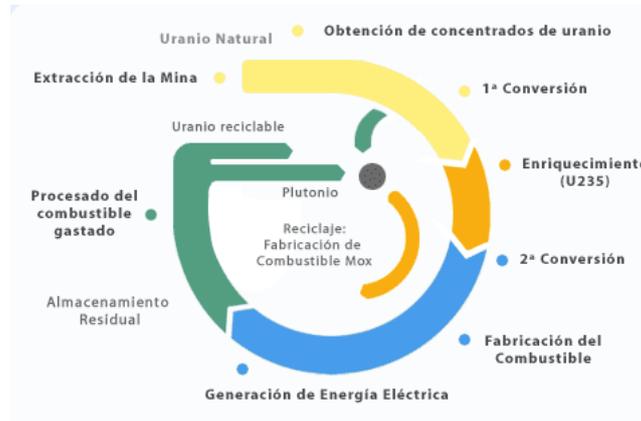
- Blindaje

Cuando un reactor está en operación, sale gran cantidad de radiación en todas direcciones. Es necesaria una protección para proteger al público y a los trabajadores de la instalación de las radiaciones de neutrones y rayos gamma ocasionados por los productos de fisión. Por ello, es necesario colocar un blindaje biológico alrededor del reactor para interceptar estas emisiones.

Los materiales más usados para construir este blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

### Ciclo de combustible nuclear

Figura 17. El ciclo del combustible nuclear

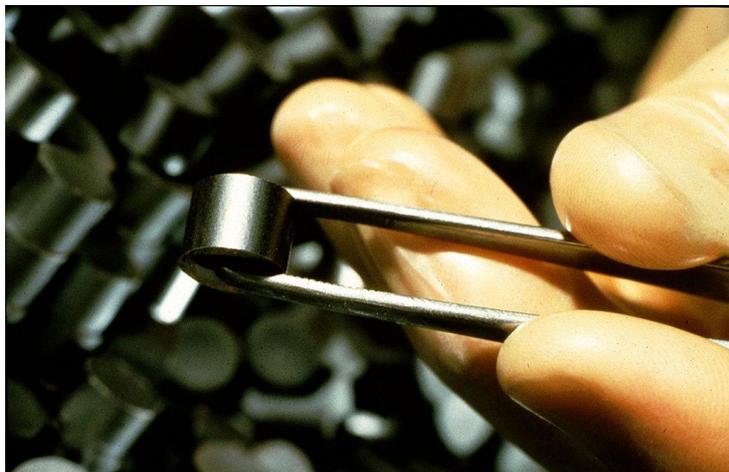


Fuente: Curso básico de Ciencia y Tecnología nuclear. Sociedad Nuclear Española.  
<http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2014/02/LibroCBCTN-ed2.pdf>  
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

### Fabricación

El combustible (óxido de uranio) se compacta en pastillas y se sinteriza en hornos a aproximadamente 1700 °C para lograr las características metalúrgicas necesarias para asegurar su integridad durante su etapa de irradiación en el reactor. Después de este proceso de fabricación las pastillas tienen unas dimensiones de aproximadamente 1 cm de diámetro y 1 cm de altura. Podemos ver una de estas pastillas en la figura 18.

Figura 18. Pastilla de óxido de uranio.

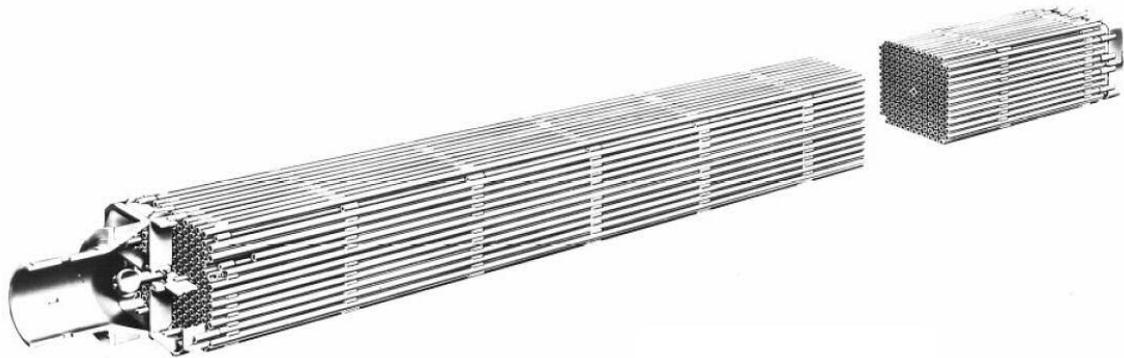


Fuente: NRC.  
Dominio público.

En el reactor las pastillas están apiladas dentro de vainas que las mantienen herméticamente aisladas del exterior en condiciones adecuadas para que la integridad del combustible esté asegurada. Estas vainas harán la labor de confinamiento del combustible y de los productos de fisión para evitar que el refrigerante se contamine. Para ello la barra de combustible, consistente en las pastillas cilíndricas de uranio apiladas y envueltas por una vaina o tubo, está sellada por su parte superior e inferior con respectivos tapones que aseguran su hermeticidad. Esta barra cerrada está presurizada con helio a una presión mayor que la atmosférica.

Pero no toda la barra está rellena de pastillas, sino que hay un hueco en la parte superior o plenum, especialmente concebido para almacenar los productos de fisión gaseosos que se producen durante la operación del combustible en el reactor. En este plenum se aloja un muelle que comprime las pastillas hacia abajo para mantener la columna combustible sin movimiento durante el transporte y manejo del elemento combustible. Un elemento combustible es un conjunto de barras combustibles agrupadas homogéneamente en matrices cuadradas o hexagonales, como se puede comprobar en la figura 19.

Figura 19. Elemento de combustible.



Fuente: U.S. Maritime Administration.  
Dominio público.

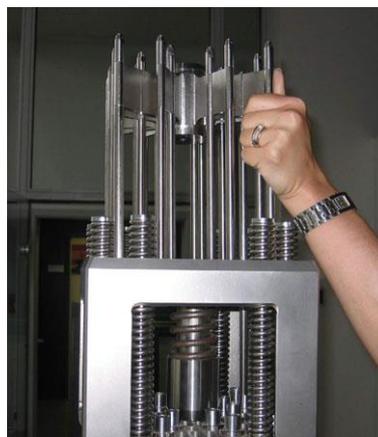
A través de la superficie de las barras de combustible se produce la transferencia del calor generado en la pastilla hacia el refrigerante. El refrigerante al circular verticalmente por el reactor extrae el calor de todas las barras de combustible.

Como la altura total de las barras puede alcanzar 4 m, es necesario un soporte que mantenga la estructura vertical de todas las barras. Para ello se colocan a distintas alturas unos dispositivos espaciadores, las rejillas. Están formadas por unas bandas metálicas entrelazadas que configuran una matriz de celdas cuadradas. Cada celda es atravesada por una barra combustible, estableciéndose y manteniéndose a lo largo de todo el combustible la distancia entre ellas. Proporcionan soporte lateral y vertical a las barras combustibles, fijando su posición en el elemento. Además las rejillas incrementan la turbulencia en el refrigerante, aumentando así la refrigeración.

Entre las barras de combustible se sitúan los tubos guía (sólo en reactores PWR), que son los conductos por los que se insertan las barras de control en los reactores PWR. En el centro del combustible existe también el tubo de instrumentación por donde se inserta la instrumentación intranuclear que sirve para medir la temperatura del refrigerante, la potencia térmica y la población neutrónica para poder hacer el seguimiento del estado del reactor.

En la parte central de la matriz del elemento BWR se sitúan dos barras de agua, dos tubos huecos que favorecen el paso de agua a través de ellos y fomentan así la refrigeración de las barras combustibles situadas en el centro del elemento combustible.

Figura 20. Cabezales.



Fuente: Nic Ransby.  
Dominio público.

Los últimos componentes del elemento combustible son los cabezales, que podemos observar en la figura 20. Cada elemento posee un cabezal superior y uno inferior. El cabezal superior conforma el combustible en su extremo superior. Consiste básicamente en una placa de acero inoxidable con orificios donde van alojadas las barras combustibles (en el caso del PWR, los tubos guía). El cabezal inferior distribuye el caudal del refrigerante entre las barras combustibles. Los cabezales tienen capacidad estructural para soportar las cargas estáticas (peso) y dinámicas (fuerzas hidráulicas, aceleraciones durante transporte y manejo) y después transmitir las a las placas del núcleo. Además gracias a ellas se fija la posición de los tubos guía (PWR) y de las barras de agua y barras combustibles (BWR). Igualmente, los cabezales mantienen los elementos combustibles debidamente colocados dentro del núcleo. A través de los cabezales pasa el caudal de agua que debe estar convenientemente distribuido para proporcionar la debida refrigeración.

Todos los materiales que componen el elemento combustible son resistentes a las condiciones de operación agresivas de temperatura, agentes químicos y radiación que se producen en el reactor, así como a la carga mecánica a la que se ve sometido (su propio peso o posibles aceleraciones durante transporte y manejo del elemento).

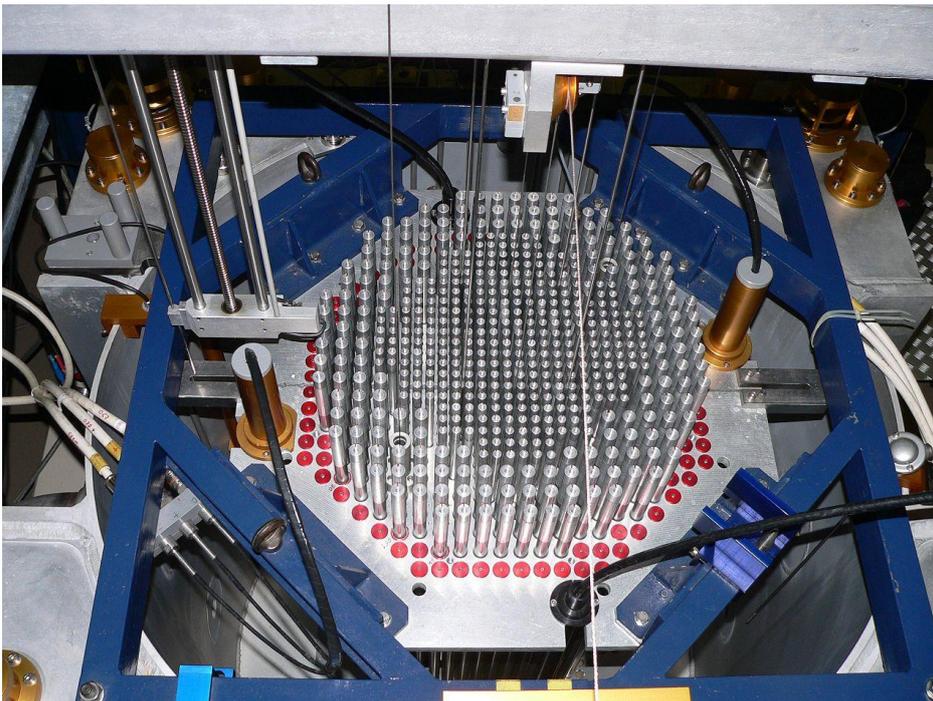
La distribución y localización de los elementos combustible en el reactor es muy importante para satisfacer los requisitos neutrónicos, termo-hidráulicos y de seguridad.

En España, ENUSA es la empresa dedicada a la fabricación de elementos combustibles. En la planta de fabricación de combustible en Juzbado (Salamanca) se realiza todo el proceso de fabricación de la pastilla a partir del polvo de óxido de uranio hasta el ensamblaje final del elemento con todos sus componentes.

### Operación

Una vez fabricado el elemento combustible, éste es enviado a la central nuclear para su inserción en el núcleo del reactor. El núcleo del reactor está conformado por 100-900 elementos combustibles (dependiendo del tipo y potencia de reactor) dispuestos en una malla rectangular con forma circular. Actualmente, los ciclos de residencia de los elementos combustibles o tiempo entre recargas están comprendidos entre 12-24 meses. Durante ese tiempo el reactor está funcionando ininterrumpidamente generando reacciones de fisión que van consumiendo poco a poco el isótopo fértil del combustible, el uranio-235.

Figura 21. Disposición de los elementos en el núcleo.



Fuente: Rama  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crocus-p1020491.jpg>  
02/09/2015 CC BY-SA 2.0

La recarga consiste en sustituir elementos gastados donde el uranio-235 se ha consumido por elementos nuevos que tienen mayor cantidad de uranio-235. En cada recarga se cambian sólo

entre un tercio y un cuarto de los elementos de combustible totales del reactor. El resto de elementos de combustible todavía tienen contenido suficiente de uranio para seguir funcionando.

En esta fase, es importante la llamada "gestión del combustible": las posiciones que ocupan los elementos combustibles dentro del reactor, el enriquecimiento o porcentaje de uranio-235 del elemento combustible, así como el tiempo de residencia (que se traduce en el uso o quemado del combustible) son factores determinantes a la hora de determinar la "recarga óptima", con la que se obtiene la mayor energía del uranio. Durante la irradiación se produce un cambio paulatino de la composición isotópica del combustible por irradiación debido a la disminución del  $^{235}\text{U}$  para producir el calor y a la generación de productos de fisión como consecuencia de las reacciones de fisión. Además se generan nuevos elementos e isótopos fisibles (plutonio-239) por medio de reacciones de captura de neutrones por el uranio-238. Algunos de estos actínidos generados pueden ser absorbentes neutrónicos. Todas estas reacciones llevan a un cambio estructural dentro de la pastilla

### Almacenamiento

El combustible descargado del reactor es almacenado bien en el propio emplazamiento del reactor, normalmente en una piscina dentro o aneja al edificio del reactor (almacenamiento en piscina), o bien, en un emplazamiento común fuera del reactor (almacenamiento en seco).

En función de la gestión que se lleve a cabo del combustible usado, se trata de un ciclo cerrado o abierto.

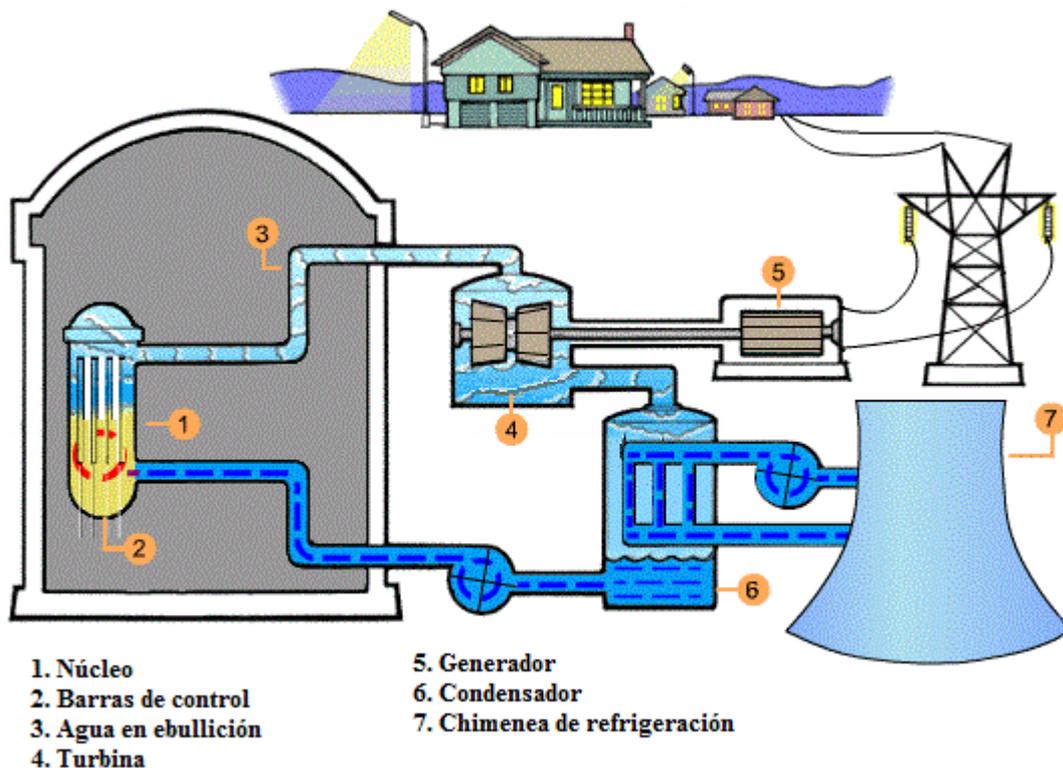
Si el combustible irradiado no se reelabora es considerado en su totalidad como residuo radiactivo, lo que se denomina ciclo abierto, con lo que no se completa el denominado ciclo del combustible nuclear.

En el caso del uranio, el ciclo cerrado incluye la minería, la producción de concentrados de uranio, el enriquecimiento (si procede), la fabricación de los elementos combustibles, su empleo en el reactor y la reelaboración de los elementos combustibles irradiados, para recuperar el uranio remanente y el plutonio producido, separando ambos de los residuos radiactivos de alta actividad que hay que evacuar definitivamente.

## 1.4 Reactores tipo BWR

En los reactores BWR (los más numerosos tras los PWR con alrededor de unos 95 reactores) sólo hay un circuito recorriendo todos los pasos (como en el ciclo termodinámico de una central térmica convencional). Los reactores nucleares del accidente en Fukushima son de este tipo. Podemos ver un esquema de su funcionamiento en la figura 22.

Figura 22. Esquema de funcionamiento de un reactor BWR



Fuente NRC.  
Dominio Público.

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, a su paso por el reactor. Desde este punto de vista, el reactor de agua en ebullición está más cerca de la concepción clásica de una central térmica, en el sentido de que no introduce componentes adicionales en el proceso de generación de vapor como es el caso anterior; sino que se emplea directamente el reactor como generador de vapor, en clara similitud a una caldera de combustión.

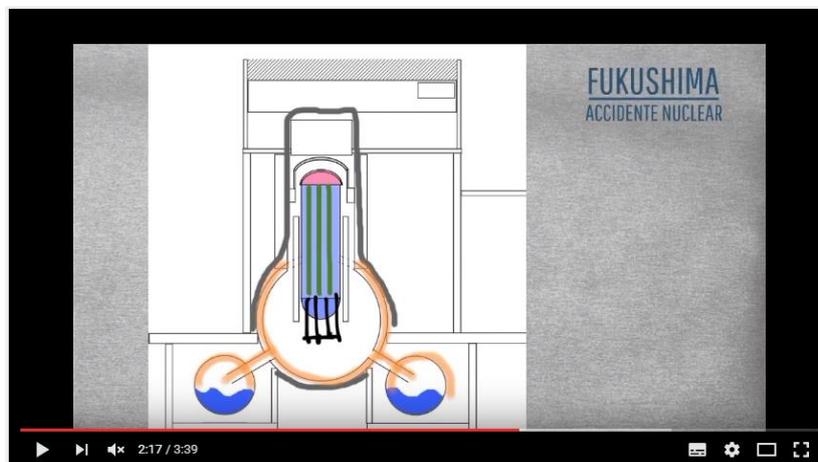
Aunque existe siempre cierta tendencia a considerar ventajas y desventajas en la adopción de uno u otro sistema, lo cierto es que presentan diferencias físicas y de funcionamiento sustanciales, pero difícilmente pueden valorarse sin que se caiga en cierta subjetividad. Sí es cierto que los reactores de agua a presión, que tienen un circuito primario absolutamente

estanco en condiciones nominales, ofrecen a priori una barrera adicional contra la propagación de la radiactividad, respecto de lo que ocurre en los reactores de agua en ebullición, en los que la fuga de los productos radiactivos al refrigerante se puede transmitir directamente al exterior, a través de la eyección de gases no condensables; aun cuando esta eyección esté lógicamente bajo control exhaustivo desde el punto de vista radiológico.

Por el contrario, la no introducción de una barrera intermedia en el proceso de generación de vapor, como es el generador de vapor en su interfaz primario-secundario, hace que los reactores de agua en ebullición presenten una realimentación nuclear-termohidráulica más viva, que permite ajustar la potencia del reactor a la demanda del turboalternador con mayor flexibilidad.

Como puede apreciarse en el esquema, la disposición de componentes en un reactor de agua en ebullición es sensiblemente igual a las centrales térmicas convencionales. Sin embargo, la vasija del reactor está configurada de manera especial, de tal forma que se establezca una buena refrigeración del reactor.

Una particularidad de estas centrales, como se habrá podido observar, es que las barras de control están situadas y se introducen por la parte inferior de la vasija. Esto es así dado que el acceso al núcleo del reactor es imposible desde la parte superior de la vasija, debido a la presencia de los separadores y secadores de vapor. El movimiento de introducción o extracción de las barras de control para regular el reactor se realiza mediante un sistema hidráulico, maniobrado desde el exterior.



Vídeo 7: <https://www.youtube.com/watch?v=KKdnaKOsipg>

El combustible nuclear es uranio enriquecido en todos los reactores de Fukushima Dai-ichi excepto en el reactor 3, que usa como combustible una mezcla de óxidos (óxido de uranio natural y óxido de plutonio) llamado MOX (Mixed Oxide Fuel).

En los reactores nucleares de agua ligera el combustible utilizado normalmente es óxido de uranio. El uranio enriquecido en torno al 3-5% en el isótopo uranio-235, se conforma en pastillas cilíndricas de aproximadamente un centímetro de diámetro y la misma altura. Es un compuesto muy estable, compatible a las temperaturas de funcionamiento con el resto de los materiales, y de color negro.

Figura 23. Varillas de combustible



Fuente: RIA Novosti archive, image #132603 / Ruslan Krivobok /  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RIAN\\_archive\\_132603\\_Nuclear\\_power\\_reactor\\_fuel\\_assembly.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RIAN_archive_132603_Nuclear_power_reactor_fuel_assembly.jpg)  
06/09/2015 CC-BY-SA 3.0

Dichas pastillas se apilan en el interior de un tubo de zircalloy (una aleación de circonio y algo de estaño) de pared muy delgada, de diámetro interior ligeramente superior al de las pastillas y de unos cuatro metros de longitud. La columna de pastillas se mantiene en su posición mediante un muelle que se encuentra en la cavidad superior de la varilla, que sirve también para almacenar los productos de fisión más volátiles. Las varillas combustibles se agrupan generalmente en conjuntos prismáticos de 8×8 varillas, enlazadas mediante rejillas soporte y dos cabezales, uno de entrada, que se apoya sobre la llamada rejilla inferior del núcleo, y otro de salida, en la rejilla superior. Cada uno de los elementos combustibles se encierra en una caja prismática de zircalloy. Entre cada conjunto de cuatro elementos combustibles se mueve un elemento de control, en forma de cruz, que contiene carburo de boro y que sirve para controlar la reacción en cadena, capturando más o menos neutrones de acuerdo con su posición en el núcleo del reactor.

# PROFUNDIZA 1

## Breve historia de la física nuclear

A lo largo de la historia, fueron varios los modelos que trataron de describir cómo estaba hecha la materia. Hacia el año 400 a.C., el filósofo Demócrito describía la materia como una entidad formada por átomos, que por definición eran entes indivisibles, sus partículas fundamentales.

Pocos avances teóricos se realizaron hasta hace poco más de doscientos años, a principios del siglo XIX, y aun así la concepción que se tenía de la estructura de la materia era radicalmente distinta a la que se tiene hoy en día. Se pensaba, gracias al modelo atómico postulado por el científico inglés John Dalton en 1808, que la materia estaba compuesta por átomos, que no se podían dividir de ninguna manera, que eran iguales entre sí en cada elemento químico y que además no tenían carga eléctrica.

A finales de dicho siglo, en 1896, debido en gran parte a la casualidad, un científico francés llamado Henri Becquerel descubrió que algunos materiales que se podían encontrar en la naturaleza emitían partículas. Ese extraño fenómeno fue denominado posteriormente "radiactividad".

Sólo un año después, el inglés J.J. Thompson descubría el electrón, una partícula muchísimo más pequeña que el tamaño de los denominados átomos y que además estaba cargada. Esos dos hechos desmontaban por completo la concepción que se tenía de la materia. El mismo Thompson, el año siguiente propuso un modelo de átomo en el que encajaba dicho descubrimiento: ese átomo anteriormente indivisible en realidad estaba compuesto por una masa de carga positiva que tenía alojados en su interior los electrones. El conjunto por tanto, era de carga neutra.

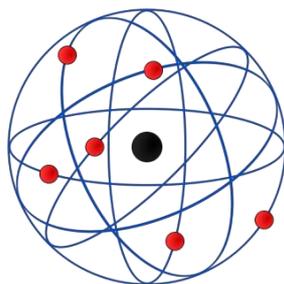
Ese mismo año 1898 el matrimonio francés formado por Pierre y Marie Curie descubrió nuevos materiales "radiactivos" como el radio y el polonio. Pero esta vez, lo que emitían era mucho más grande que un electrón y de carga positiva: una partícula alfa.

Un reputado científico neozelandés llamado Ernest Rutherford, discípulo de Thompson, quiso verificar lo bueno que era el modelo propuesto por Thompson y bombardeó láminas de oro muy finas con dichas partículas alfa. Los resultados que se esperaban eran que la mayoría de las partículas alfa (de carga positiva) rebotase debido a la dificultad de atravesar la densa masa positiva con electrones que era la materia en el modelo de Thompson. Para sorpresa de todos, la mayoría de las partículas alfa atravesaron la materia, algunas de ellas desviándose cierto ángulo, otras pocas fueron rebotadas. Eso no encajaba con el modelo anterior, había que pensarse las cosas de nuevo.

El mismo Rutherford propuso un modelo de átomo en 1911 que estaba de acuerdo con su experiencia: el átomo en realidad estaba constituido por un núcleo de carga positiva en el centro con electrones alrededor. Ese núcleo se sospechaba que estaba compuesto por partículas positivas (protones) y neutras (lo que más tarde se denominó neutrones). El tamaño del núcleo en relación con el del átomo era como un balón de fútbol en el centro de un estadio: es decir, el átomo estaba prácticamente hueco, por eso las partículas alfa pasaban a través de él, y sólo unas pocas conseguían colisionar con el pequeñísimo núcleo o eran desviadas si pasaban cerca.

Ese modelo fue completado de forma inmediata por otro de los mayores científicos del siglo XX, el danés Niels Bohr, joven discípulo de Rutherford, que a los 26 años introdujo un modelo más sólido, que tenía en cuenta la física cuántica para explicar los movimientos de los electrones alrededor del núcleo y los organizaba en distintas capas. La figura 24 representa el esquema del modelo de Rutherford.

Figura 24. Esquema del átomo según el modelo de Rutherford



Fuente: Cburnett  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/Atom#/media/File:Rutherford\\_atom.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Atom#/media/File:Rutherford_atom.svg)  
25/08/2015 CC-BY-SA-3.0

Unos años después, la total irrupción de la mecánica cuántica llegó al modelo atómico de la mano del austríaco Erwin Schrödinger, cuyo modelo propuesto en 1926 sigue aún vigente.

Años más tarde, en 1932, se verifica la existencia de esa partícula denominada neutrón, mediante una serie de experimentos realizados por el inglés James Chadwick.

Hoy se sabe que un átomo consta de un núcleo que porta casi la totalidad de la masa del átomo y unos electrones dispuestos en torno al núcleo de acuerdo con unas distribuciones de probabilidad que determina la física cuántica. El núcleo del átomo no es un ente fundamental, sino que puede ser dividido en partes más pequeñas. Está formado por neutrones (sin carga eléctrica) y protones (con carga eléctrica positiva), y

se sabe que estas dos partículas (llamadas genéricamente nucleones) tampoco son indivisibles, sino que están compuestas de otras más pequeñas denominadas quarks.

Después del descubrimiento del neutrón, muchos científicos famosos realizaron experimentos en los que bombardeaban al material más pesado de la naturaleza (uranio) con neutrones. El primero en hacer experimentos mediante el bombardeo de núcleos de uranio con neutrones fue el italiano Enrico Fermi; sus trabajos le valieron el Premio Nobel de Física en 1938. Sus investigaciones alentaron a Otto Hahn, Lise Meitner y Fritz Strassmann, que en 1939 demostraron que después de bombardear uranio con neutrones, aparecían núcleos de bario, que tenía una masa aproximadamente la mitad que el uranio. Estos resultados crearon una gran controversia en la comunidad científica, pero fueron rápidamente corroborados por nuevos experimentos que disiparon todas las dudas al respecto: se había descubierto la fisión nuclear. Estos trabajos le valieron a Otto Hahn el Premio Nobel de Química en 1944.

Gran parte de los científicos implicados en estas investigaciones eran de origen judío, y acabaron emigrando a Estados Unidos a medida que los regímenes totalitarios se adueñaban de sus respectivos países. Tal fue el caso de Enrico Fermi, que aprovechando la ceremonia de entrega de los Nobel escapó junto con toda su familia de Italia. Este insigne físico, uno de los más grandes de la historia, condujo a su equipo de investigación a uno de los mayores logros de la historia de la ciencia, la primera reacción nuclear en cadena autosostenida, que tuvo lugar a las 15:20 horas del día 2 de diciembre de 1942. Ese día se logró iniciar una reacción en cadena y posteriormente detenerla, consiguiendo liberar de forma controlada energía nuclear.

Pocos años después, impulsado por los intereses bélicos de Estados Unidos, se logró poner en marcha el primer reactor que opera de forma continuada en 1944 en Hanford y en 1951 el primer reactor que produce electricidad, el EBR-1 en el laboratorio nacional de Los Álamos.

En 1953 el entonces presidente de los Estados Unidos, Dwight D. Eisenhower pronunció su famoso discurso de Atoms for Peace en el que EEUU abrió la tecnología nuclear al mundo para su uso civil, en producción de electricidad. En 1956 se puso en operación el primer reactor de producción eléctrica de Europa, Calder Hall (Reino Unido). En los años posteriores se comenzaría la construcción de centrales nucleares en el mundo, hasta los aproximadamente 400 reactores en operación.