
CAPITULO 1: LA ENERGÍA NUCLEAR

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En 1942 un grupo de científicos liderado por Enrico Fermi se reunieron en la Universidad de Chicago para ver la viabilidad de la construcción del primer reactor del mundo conocido como *Chicago Pile-1*. El 2 de diciembre del mismo año se llevó a cabo la primera reacción nuclear auto-sostenida, dando así lugar al nacimiento de la energía nuclear. En ese tiempo.

Mucha de la investigación se enfocó principalmente al estudio de los *reactores de cría* que servirían para crear material fisionable para el armamento nuclear. Después de la guerra Estados Unidos creó en 1946 la Comisión de Energía Atómica (CEA), la cual autorizó la construcción del reactor de cría I experimental en Idaho. Para junio de 1954 la URSS tuvo la primera planta nuclear (Planta Nuclear Obninsk) de alrededor de 5MWe para generar electricidad para una red eléctrica [1].

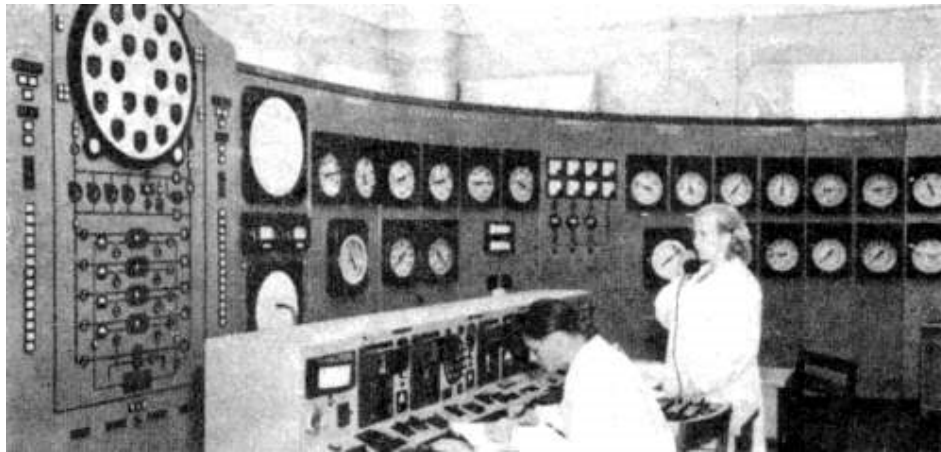


Fig. 1.1 Cuarto de control de la planta nuclear en Obninsk[2].

A mediados de los 50's después de que se construyera el reactor de cría I, la investigación se enfocó más en demostrar que la energía nuclear podía generar electricidad de manera comercial, esto se logró en 1957 con la primera planta comercial en Pennsylvania, fue el primer reactor de agua ligera.

1.2 TIPOS DE REACTORES NUCLEARES

Un reactor nuclear está compuesto por ensambles de combustible nuclear, generalmente uranio enriquecido, en los cuales se llevan a cabo fisiones nucleares que generan una gran cantidad de energía en forma de calor, éste es absorbido por un fluido que funciona como refrigerante; generalmente agua. El refrigerante se encuentra circulando por la vasija del reactor a alta presión, pero también pasa por los generadores de vapor, donde se encuentra otro fluido a menor presión (agua), el cual se evapora y se envía a las turbinas, donde se expande y produce el giro de éstas. En el eje de las turbinas se encuentra un transductor

(alternador) que transforma la energía mecánica en eléctrica, donde se genera un voltaje que es enviado a transformadores que elevan el valor de éste para que pueda ser enviado a líneas de transmisión. El vapor saliente de las turbinas pasa por condensadores y ya en forma de agua se bombea de regreso al reactor para completar el ciclo. La vasija del reactor se encuentra albergada en el llamado edificio del reactor, el cual tiene una doble contención que brinda una barrera de seguridad muy importante dentro de la central nuclear.

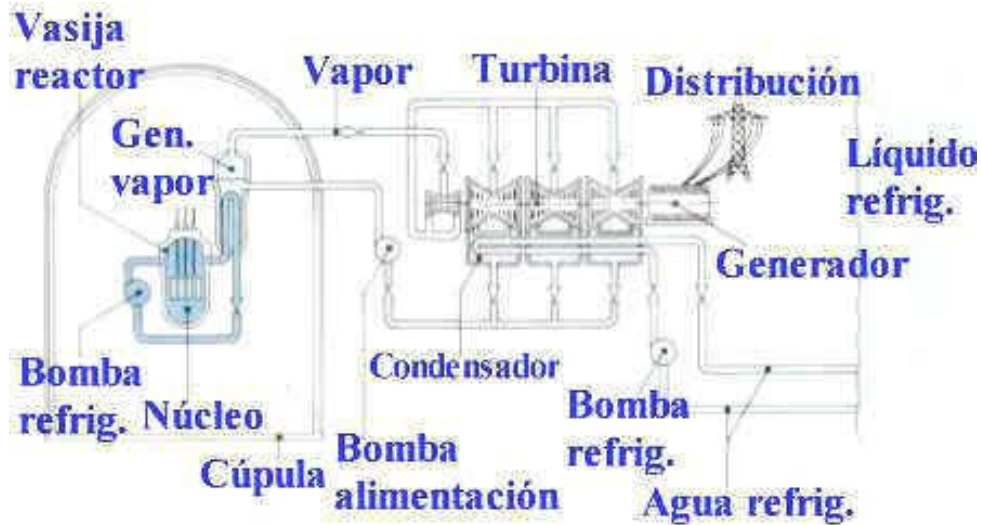


Fig. 1.2 Esquema de una planta nuclear [3].

La clasificación de reactores se puede dar de muchas maneras, por ejemplo, el tipo de reacción nuclear el cual puede ser fisión o fusión aunque ésta última es aún experimental y no se ha logrado obtener energía de ésta. Otras clasificaciones a grandes rasgos que se le dan a los reactores son por el tipo de moderador que utiliza, el refrigerante, la generación a la que pertenecen, el uso, etc.

Los tipos de reactores que se han usado para producir energía eléctrica han sido los de agua ligera aunque también ha habido otro tipo de reactores de otro tipo de tecnología, se hará una breve descripción de los reactores más comunes en la actualidad, clasificados en cuanto a la generación a la que pertenecen (Generación I,II,III,IV):

Reactores de primera generación

Los reactores de esta generación corresponden únicamente a los primeros prototipos que se desarrollaron y que dieron paso a los de segunda generación.

Reactores de segunda generación

Estos reactores surgieron a mediados y finales de los 90's ya de manera comercial y que actualmente se siguen utilizando.

PWR (Pressurized Water Reactor): Es un reactor que tiene dos circuitos de agua, uno donde el agua circula por la vasija del reactor enfriándolo y a la vez moderándolo, se encuentra a presión para que el agua no ebulle, pasa por un intercambiador de calor donde el segundo circuito contiene también agua la cual se calienta y se convierte en vapor y mueve una turbina. Utilizan uranio enriquecido y agua ligera.

BWR (Boiling Water Reactor): Es un reactor el cual en vez de tener dos circuitos de agua sólo tiene el principal, la diferencia de éste con el PWR es que, el agua no está a presión y puede ebullición dentro de la vasija del reactor y su eficiencia térmica es un poco mayor a los PWR. Utilizan agua ligera y uranio enriquecido.

PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor): Es un diseño canadiense y también es conocido como reactor CANDU, en estos reactores el combustible se encuentra en cientos de tubos de presión, permitiendo que la recarga de combustible se pueda hacer sin necesidad de parar el reactor. En este reactor se usa uranio natural como combustible y agua pesada como moderador.

RBMK (Reaktor Bolshoy Moschnosti Kanalniy): Es un reactor de diseño soviético, moderado por grafito y enfriado por agua. Al igual que el CANDU también se puede recargar durante la operación del reactor, sin embargo, son inestables y muy grandes, además de no contar con contención primaria, lo que los hace inseguros. Aunque resultan muy atractivos debido al uso de agua ligera y de uranio natural.

AGR (Advanced Gas-Cooled Reactor): Es un reactor que utiliza como moderador grafito y dióxido de carbono como refrigerante. Utiliza como combustible uranio enriquecido.

Reactores de tercera generación

Estos reactores están basados en los reactores de segunda generación, es decir, el mejoramiento de las características de estos reactores, por ejemplo, la eficiencia, nuevos materiales para reducir el mantenimiento y con esto los costos, también los costos disminuyen utilizando sistemas de seguridad pasivos que es otra mejora que se tiene en estos reactores. Éstos se dividen a su vez en generación III y generación III+.

Generación III

ABWR (Advanced Boiling Water Reactor): Este reactor fue diseñado por la compañía General Electric basado prácticamente en el BWR con mejoras en:

- Mejoramiento de las barras de control, ahora al ser electro hidráulicas tienen un movimiento más fino y de mayor precisión.
- Los controles del reactor ahora son completamente digitales, por ejemplo, el reactor ahora puede de manera automática llegar a su potencia de operación y de ahí mantenerse en piloto automático.
- También se mejoró el sistema de enfriamiento de emergencia del reactor.

APWR (Advanced Pressurized Water Reactor): Diseñado por Mitsubishi, está basado en el PWR y también tiene varias mejoras en cuanto a diseño, como lo es la eficiencia y los sistemas de seguridad que incluyen sistemas activos y pasivos.

Generación III+

Son reactores con mejores sistemas de seguridad y reducción en costo.

AP1000: Es un reactor diseñado por la compañía Westinghouse, está basado en un diseño anterior, el AP600, de igual manera es un reactor que sigue la misma filosofía de diseño de sistemas de seguridad pasivos, circulación natural, etc.

EPR (European Pressurized Reactor): Es un reactor diseñado por la compañía Areva, Electricité de France y Siemens AG. Como combustible puede utilizar uranio enriquecido o una mezcla de plutonio y uranio. También posee sistemas de seguridad pasivos y activos, algunos de estos sistemas son la implementación de cuatro sistemas de enfriamiento de emergencia independientes, dos capas de concreto que le dan una anchura de 2.6m para poder contener las sobrepresiones y algún impacto de avión.

Reactores de cuarta generación

Son reactores que aún se encuentran en desarrollo e investigación hoy en día, pero que tendrían grandes ventajas en un futuro próximo. Incluido en estos reactores se encuentra el VHTR que son de muy alta temperatura, con lo cual se puede implementar la electrólisis de alta temperatura para la producción de hidrógeno.

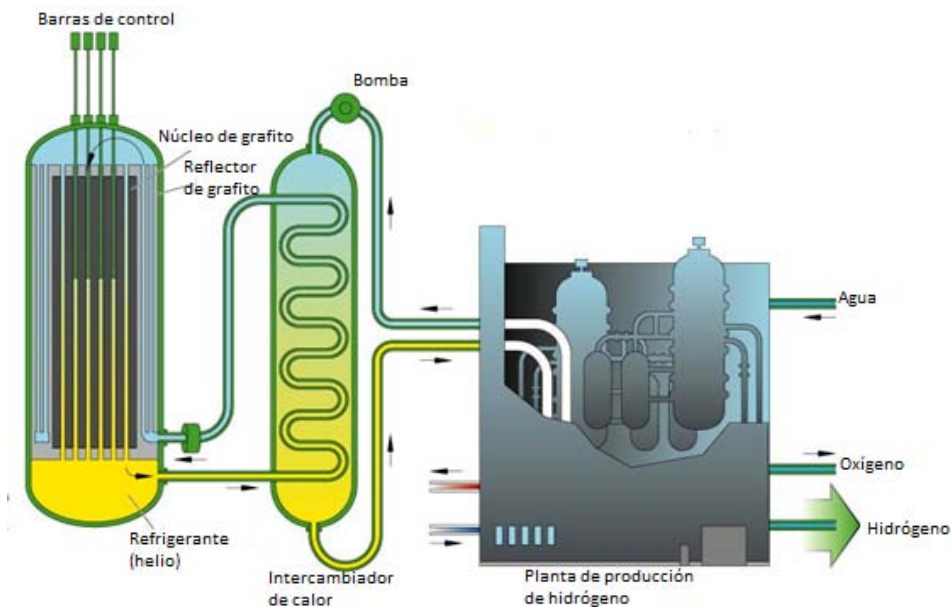


Fig. 1.3 Diagrama general de un VHTR [4].

VHTR (Very High Temperature Reactor): Es un reactor moderado por grafito y usa helio como refrigerante, además de tener una eficiencia muy alta con la cual se logra producir grandes temperaturas o calor de proceso que se destina a algunos procesos industriales como la generación de hidrógeno, este calor se encuentra en un rango de 850 a 950°C. Además produce electricidad.

SCWR (Super Critical Water Cooled Reactor): Es un reactor de alta temperatura, enfriado por agua, que opera sobre el punto crítico termodinámico del agua: 374°C y 22MPa. Parte de su diseño está basado en los reactores de agua ligera. Tienen una eficiencia estimada del 45%, además de que se eliminan componentes como los presurizadores, generadores de vapor, secadores, bombas jet, etc.

GFR (Gas Cooled Fast Reactor): Es un reactor que utiliza como refrigerante helio, neutrones rápidos, posee una turbina de conversión directa de energía eléctrica, además puede utilizar el calor que genera para la producción de hidrógeno. La configuración del núcleo del reactor primordialmente está basada en bloques prismáticos.

LFR (Lead Cooled Fast Reactor): Es un reactor enfriado por metal líquido, en este caso plomo, debido a que posee una muy baja absorción de neutrones rápidos, además tiene una temperatura de ebullición muy alta, lo que elimina la necesidad de operar a altas presiones. Su diseño está planeado para la generación de electricidad e hidrógeno.

SFR (Sodium Cooled Fast Reactor): Es un reactor enfriado por sodio, de este reactor se tiene planeado crear reactores modulares de 50MWe hasta reactores de gran escala de 1500MWe. Se contemplan dos opciones posibles de combustible, el MOX y una mezcla de uranio-plutonio en una aleación metálica de zirconio.

MSR (Molten Salt Reactor): Es un reactor que utiliza como refrigerante una sal fundida, pueden usar el combustible de manera tradicional o disuelto en la propia sal, lo que evita que se tengan que hacer las barras de combustible. La sal fundida debe tener un punto de ebullición alto alrededor de 1400°C. En el núcleo la fisión ocurre dentro del flujo de la sal que es calentada aproximadamente a 700°C.

1.3 PERSPECTIVA ACTUAL

Hoy en día debido a la preocupación por el calentamiento global, se está tratando de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero con el uso de nuevas tecnologías amigables al medio ambiente, las energías renovables son esas tecnologías que brindan ese apoyo en contra del calentamiento global entre éstas tenemos a la eólica, geotérmica y la hidroeléctrica, entre otras, sin embargo, aunque son parte de la solución debemos ser realistas y reconocer que la energía nuclear, con el desarrollo tecnológico actual, puede satisfacer gran parte de la demanda energética global. La energía nuclear puede disminuir de manera importante el uso de carbón, petróleo y gas natural para producir energía eléctrica y utilizarse como fuente de calor en otros procesos industriales. En especial los reactores nucleares de alta temperatura tienen ventajas significativas para la producción de hidrógeno.

Un ejemplo de cómo podemos satisfacer nuestras necesidades mediante energía nuclear es Francia, la cual obtiene el 75% de su energía eléctrica mediante energía nuclear. Además de que a nivel mundial existen alrededor de 440 reactores nucleares operando en 30 países, produciendo el 16% de la electricidad del mundo [2] y claramente se ve que la cifra podría aumentar si se aplicaran políticas para impulsar la energía nuclear. Otra ventaja importante es que hoy en día existen bastantes reservas conocidas de uranio, pero la gran ventaja es el torio (Th) el cual es muy abundante y se puede utilizar en los reactores de cría para crear combustible nuclear, en este caso U-233. Muchos países han desarrollado programas para la implementación de este tipo de reactores (FBR), sin embargo, han surgido problemas técnicos o problemas con los materiales de construcción lo que causa que los proyectos se hayan estancado, un ejemplo es Japón que durante su programa crearon un reactor FBR comercial prototipo y estaba conectado a la red eléctrica en Agosto de 1995 pero una fuga de refrigerante hizo que se terminará el programa de implementación. Aunque de nuevo está teniendo auge este tipo de reactores en otros países como es el caso de India, que planea construir cuatro FBR's de una capacidad de 500MWe.



Fig. 1.4 Central nuclear de Paluel, Francia [5]

Una de las tendencias actuales es la construcción de módulos, es decir, pequeñas plantas nucleares por paquete, la IAEA (International Atomic Energy Agency) ha definido como plantas pequeñas a aquellas con una capacidad menor a los 300MWe, pero hoy en día se considera 500MW el límite para las plantas pequeñas, este tipo de plantas resultan atractivas, puesto que no se tiene que hacer una inversión muy fuerte al inicio y en caso de que en un futuro se llegue a necesitar más potencia se puede implementar otro módulo.

Se están desarrollando este tipo de reactores basados en los FBR's que son parte del desarrollo de las plantas pequeñas y en general están debajo de lo 50MWe de capacidad, estos reactores son sellados y se llevarán al lugar dónde se utilizarán. Operan a presión atmosférica y poseen los sistemas de seguridad pasivos que actualmente se están empleando en los reactores de nueva generación. Dos de los más destacados hasta el momento son el 4S "Nuclear Battery" y el SSTAR. El Super-Safe, Small & Simple conocido también como el 4S "Nuclear Battery" que está siendo desarrollado en Japón por Toshiba. Utiliza sodio como refrigerante, posee sistemas de seguridad pasivos y será capaz de funcionar de manera continua durante tres décadas sin recarga de combustible alguna. Se estima que el costo overnight para una planta de 10MWe será de US\$ 2500/Kw y la proyección del costo de la energía estará en el rango de 5-7 centavos/Kwh. Este reactor resultaría muy benéfico para comunidades rurales o zonas muy alejadas del tendido eléctrico, en algunos otros países resultaría competitivo el precio del Kwh ante los generadores eléctricos que utilizan diesel.

El SSTAR (Small Sealed Transportable Autonomous Reactor) es un reactor que está siendo desarrollado en Estados Unidos por los laboratorios Argonne, tendrá una capacidad de 10 a 100MWe y puede ser transportado a la zona dónde sea requerido. Al igual que el 4S "Nuclear Battery" puede operar de manera continua durante 30 años son recargar combustible. Actualmente el diseño actual del SSTAR es de una capacidad de 20MWe y una demostración de este reactor está prevista para el año 2015.

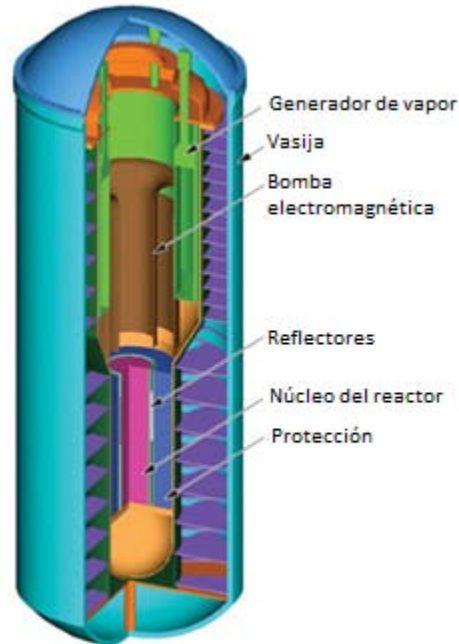


Fig. 1.5 Reactor portátil SSTAR [6].

Existen también otros reactores que no son FBR's y están basados en los LWR's pero en general son PWR "modulares" puesto que se encuentran en la capacidad establecida por la IAEA. También en esta categoría de reactores pequeños o modulares los que están basados en la tecnología de los HTR's y los MSR's. En varias partes del mundo se están desarrollando este tipo de reactores aunque para el caso de los LWR's mucho del trabajo actual está basado en los que fueron diseñados para aplicaciones militares, un ejemplo, es el submarino nuclear, el cual tiene a bordo un PWR pequeño que le brinda la energía necesaria para llevar a cabo sus operaciones, también los rompehielos soviéticos utilizaban sus reactores basados en PWR's pero con generadores de vapor exteriores, estos son el KLT y el VBER. El KLT se planea utilizar para proyectos de desalinización de agua y como fuente de energía para zonas remotas.

Dentro de los HTR's en el caso particular de Estados Unidos, se tienen contemplados tres tipos de reactores en su proyecto "Next Generation Nuclear Plant". Sin embargo en otros países ya ha desarrollado suficiente investigación y han creado sus propios reactores. El JAERI's (Japan Atomic Energy Research Institute's) creó el HTTR (High Temperature Test Reactor) que logró trabajar a una temperatura de 850°C por 30 días, y en el 2004 alcanzó una temperatura de 950°C. Ahora basándose en este modelo de reactor están desarrollando el reactor GTHTR (Gas Turbine High Temperature Reactor).

En Estados Unidos se desarrolló durante los años 60's el concepto del MSR y se construyó un prototipo de 8MWth y que estuvo en operación durante 4 años. Ahora en la actualidad países como Japón, Rusia, Francia y Estados Unidos han retomado el interés en este tipo de reactor. Un ejemplo del interés en el desarrollo de los MSR's, es el Fuji MSR de 100MWe y está siendo desarrollado por un consorcio Japonés, Ruso y Estadounidense.

Los desarrollos tecnológicos en cuanto a reactores nucleares de nueva generación es muy grande, debido a la necesidad de satisfacer las necesidades energéticas que habrá debido al gran incremento de la población y como una forma para combatir el cambio climático.

Una de las grandes aplicaciones que se están desarrollando es la implementación de reactores nucleares para la producción de hidrógeno en especial implementando HTR's, puesto que muchos procesos químicos requieren grandes temperaturas, también la electrólisis de alta temperatura es otro proceso que requiere grandes temperaturas.

Dado el creciente problema de los gases de efecto invernadero y que forma parte del problema del cambio climático, se buscan maneras de reducir las emisiones, y una gran parte del problema además de la industria es el transporte debido a que es utilizado diariamente en prácticamente casi todas las ciudades del mundo, ya sea a mayor o menor escala. Es por esta razón que se justifica nuevas fuentes de energía y una de ellas por supuesto es el hidrógeno.

El hidrógeno se ha estado utilizando ya desde hace tiempo en la creación de fertilizantes y en otros procesos químicos. Aunque actualmente se obtiene en su mayoría del gas natural y esto aumenta las emisiones de CO₂, aproximadamente una tonelada de hidrógeno genera once toneladas de CO₂ [7].

Con la escasez de petróleo, lo que conlleva a un aumento en los precios, crea un espacio y una ventaja para el mercado del hidrógeno en cuanto al uso como combustible para transporte y otras aplicaciones, además de verse impulsado con el desarrollo de nuevas celdas de combustible que utilizan preferentemente el hidrógeno. Además de que el hidrógeno destinado al transporte que se produzca, se hará preferentemente en las zonas donde se utilice.

Las etapas que se cree que se darán para la producción de hidrógeno con energía nuclear son las siguientes [8]:

- Utilizando la electrólisis convencional, utilizando la capacidad de la planta nuclear fuera de las horas pico.
- El uso del calor nuclear para el reformado del gas natural que requiere temperaturas muy altas. Aunque esto trae consigo emisiones de CO₂.
- Utilizando la electrólisis de alta temperatura, con temperaturas de 800°C, usando el calor y la electricidad de reactores nucleares.
- Utilizando procesos termoquímicos de alta temperatura que utilicen calor nuclear.

La principal ventaja del hidrógeno es que al quemarse produce únicamente vapor de agua sin emitir contaminantes, lo cual se puede llevar a cabo en un motor de combustión interna. Sin embargo, la aplicación principal del hidrógeno sería en celdas de combustible, dado a que la conversión de energía química a eléctrica tiene una eficiencia del 60% de manera teórica, pero en la realidad sólo se ha llegado a la mitad.

El principal reto actualmente es la forma de almacenamiento del hidrógeno, que sea eficaz y al mismo tiempo costeable. Existen tres métodos que resultan viables: el almacenamiento criogénico, a alta presión y como hidruros. Todo esto junto con el nuevo desarrollo de celdas de combustible que sean más económicas supone un gran reto para el mercado del hidrógeno como combustible.