

LA ENERGÍA NUCLEAR ORIENTADA A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: BREVE ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN A NIVEL GLOBAL

Autor: Oier Zeberio Maiztegi

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

1 de julio del 2019

Bilbao

RESUMEN

Esta ponencia está dividida en tres capítulos. En el primer capítulo se analiza brevemente la situación de la energía nuclear a nivel global. En el segundo capítulo, se exponen las características básicas de los tipos de reactores más comunes orientados a la producción de energía eléctrica. En el tercer capítulo, se efectúa un breve análisis de cada Estado, exponiendo sobre todo el número de reactores que están activos, la cantidad de reactores que se encuentran hoy en día en construcción, y la cantidad de energía eléctrica de origen nuclear producida en un año determinado.

ÍNDICE

1. capítulo:

La energía nuclear orientada a la producción de energía eléctrica: una breve perspectiva global.....P.4

2. capítulo:

Tipos de reactores nucleares: características básicas.....P.5

3. capítulo:

La energía nuclear orientada a la producción de energía eléctrica: breve análisis de cada Estado.....P.17

1. CAPÍTULO

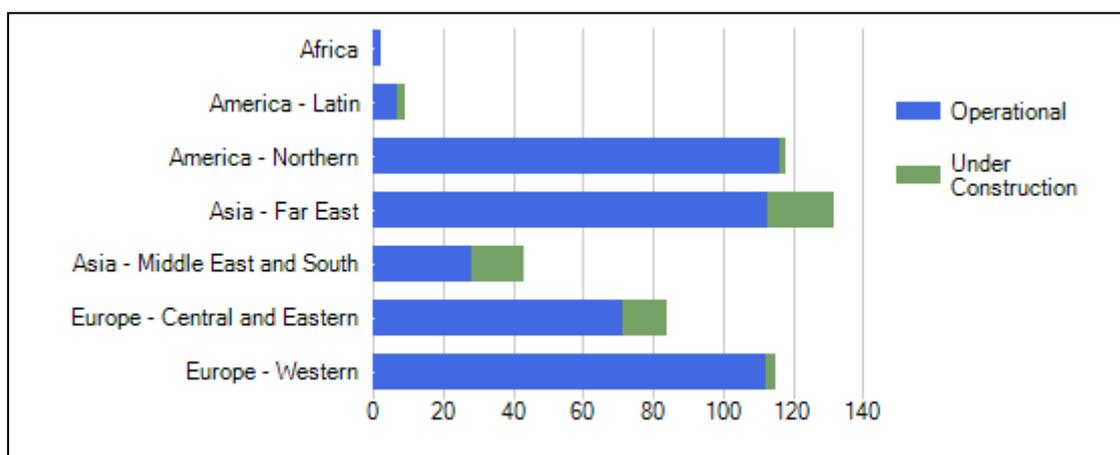
La energía nuclear orientada a la producción de energía eléctrica: una breve perspectiva global

Según el Organismo Internacional de Energía Atómica [IAEA en adelante], el 1 de julio del 2019 había en el mundo 449 reactores nucleares en operación y el número de reactores que se estaba construyendo era de 54 (IAEA, 2019a). Haciendo referencia a la capacidad eléctrica de origen nuclear instalada, el 1 de julio del 2019 esta era de 397.650 Mw_e (netos) a nivel mundial, y la capacidad neta instalada de los reactores nucleares en construcción es de 55.364 Mw_e (netos) (IAEA, 2019a). Según la World Nuclear Association [WNA en adelante] Los reactores nucleares en operación, a nivel mundial, producen el 11% de la electricidad (WNA, 2019a).

La distribución regional sería la siguiente:

Grafico 1

Distribución regional: reactores nucleares

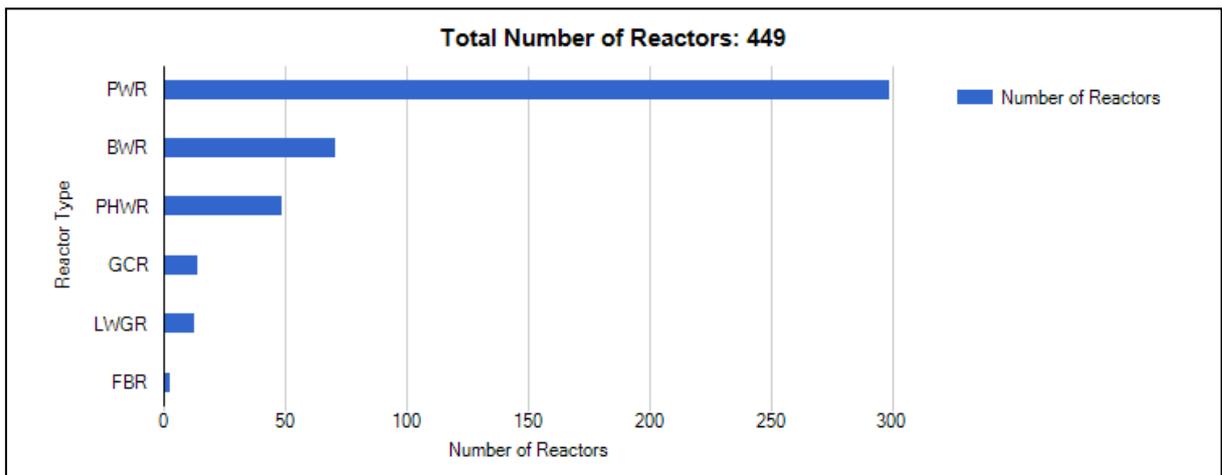


Fuente: (IAEA, 2019a)

2. CAPÍTULO

Tipos de reactores nucleares: características básicas

Grafico 2



Fuente: (IAEA, 2019c)

El 1 de julio de 2019, a nivel global, el 66,59% (299) de los reactores que se encontraban en operación eran del tipo PWR¹. El 15,81% (71) eran del tipo BWR², el 10,91% (49) del tipo PHWR³, el 3,11% (14) del tipo CGR⁴, el 2,89% (13) del tipo LWGR⁵ y el 0,66% (3) del tipo FBR⁶. En las siguientes líneas se describirán las principales características de funcionamiento.

¹ PWR (*Pressurized Light-Water Moderated and Cooled reactor*). En la Federación Rusa son conocidas como VVER: Водо-Водяной Энергетический Реактор (Reactor Energético de Agua-Agua)

² BWR (*Boiling Light-Water Cooled and Moderated Reactor*)

³ PHWR (*Pressurized Heavy-Water Moderated and Cooled Reactor*)

⁴ GCR (*Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor*)

⁵ LWGR (*Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor*) En la Federación Rusa son conocidas como RBMK: Реактор большой мощности канальный (Reactor de Alta Potencia del tipo Canal)

⁶ FBR (*Fast Breeder Reactor*)

Tabla 1*Tipo de reactores y características*

Tipo de Reactor	Países⁷	Numero	Combustible	Refrigerante	Moderador
PWR	EE.UU, Francia, Japón, Rusia y China	292	UO ₂ enriquecido	Agua	Agua
BWR	EE.UU, Japón, Suecia	75	UO ₂ enriquecido	Agua	Agua
PHWR	Canadá, India	49	UO ₂ natural	Agua Pesada	Agua Pesada
GCR	Reino Unido	14	U natural (metal), UO ₂ enriquecido	CO ₂	Grafito
LWGR	Rusia	15	UO ₂ enriquecido	Agua	Grafito

Fuente: Elaboración propia a partir de WNA (2019a)

Reactores PWR: Son reactores que usan agua ordinaria tanto como moderador⁸ como refrigerante⁹. Un PWR tiene conjuntos de combustible que están formados por entre 200 y 300 barras cada uno, dispuestos verticalmente en el núcleo. Un reactor de tamaño considerable tendría aproximadamente entre 150-250 conjuntos de combustible con entre 80 y 100 toneladas de uranio (WNA, 2019c).

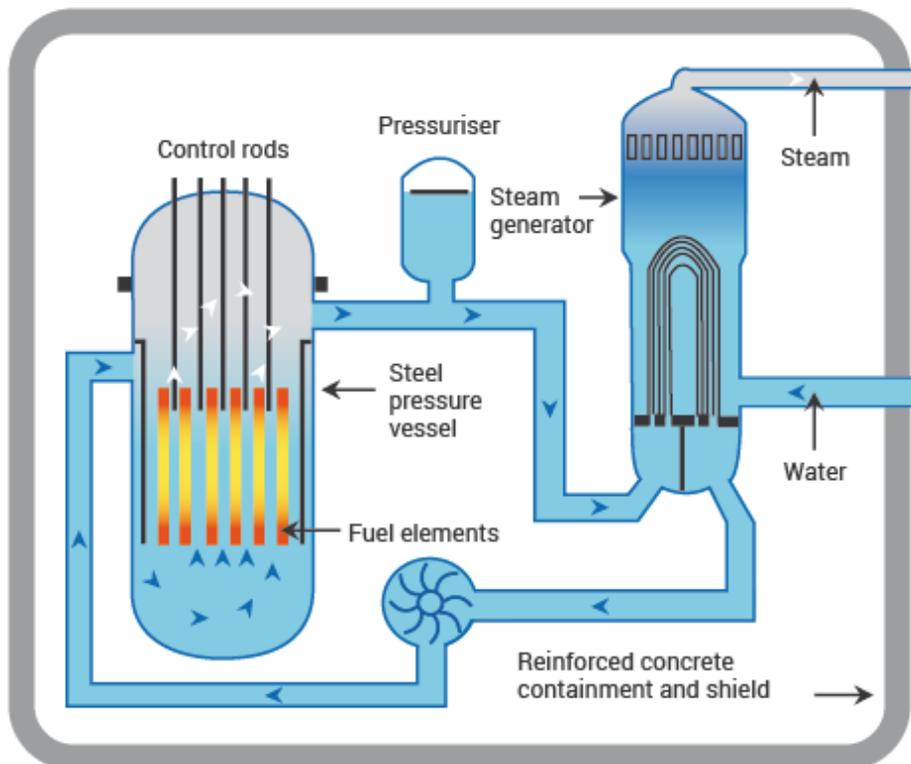
⁷ Para consultar que tipo de reactores dispone detalladamente cada país consultar la siguiente publicación: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf

⁸ «Material en el núcleo que ralentiza los neutrones liberados de la fisión para que causen más fisión. Normalmente suele ser agua, pero puede ser agua pesada o grafito» (WNA, 2019c).

⁹ «Un fluido que circula a través del núcleo para transferir el calor desde él. En los reactores de agua ligera, el moderador de agua funciona también como refrigerante primario. Excepto en los BWR, hay un circuito de refrigeración secundario donde el agua se convierte en vapor» (WNA, 2019c).

Imagen 1

A Pressurized Water Reactor (PWR)



Fuente: WNA (2019b).

En este tipo de reactores, las barras de control están situadas en la parte superior de la vasija¹⁰ del reactor. En el caso de que sea necesario efectuar una parada rápida del reactor, las barras de control¹¹ se insertan por gravedad, al liberarse los mecanismos electromagnéticos de sujeción de las mismas.

En este tipo de reactores, el agua (ordinaria) circula en estado líquido y a muy alta presión por el circuito primario, mediante unas bombas que la impulsan a través del núcleo donde se calienta antes de dirigirse a los generadores de vapor (CSN, 2019a). El agua alcanza aproximadamente los

¹⁰ «Un recipiente de acero robusto que contiene el núcleo del reactor y el moderador / refrigerante» (WNA, 2019b).

¹¹ «Se fabrican con material absorbente de neutrones, como cadmio, hafnio o boro, y se insertan o retiran del núcleo para controlar la velocidad de reacción o para detenerla. En algunos reactores PWR, se utilizan barras de control especiales para permitir al núcleo mantener un bajo nivel de potencia de manera eficiente. (Los sistemas de control secundarios involucran otros absorbentes de neutrones, generalmente boro en el refrigerante; su concentración se puede ajustar con el tiempo a medida que se quema el combustible). Las barras de control en un PWR se insertan desde la parte superior, las hojas cruciformes de un BWR desde la parte inferior del núcleo» (WNA, 2019b).

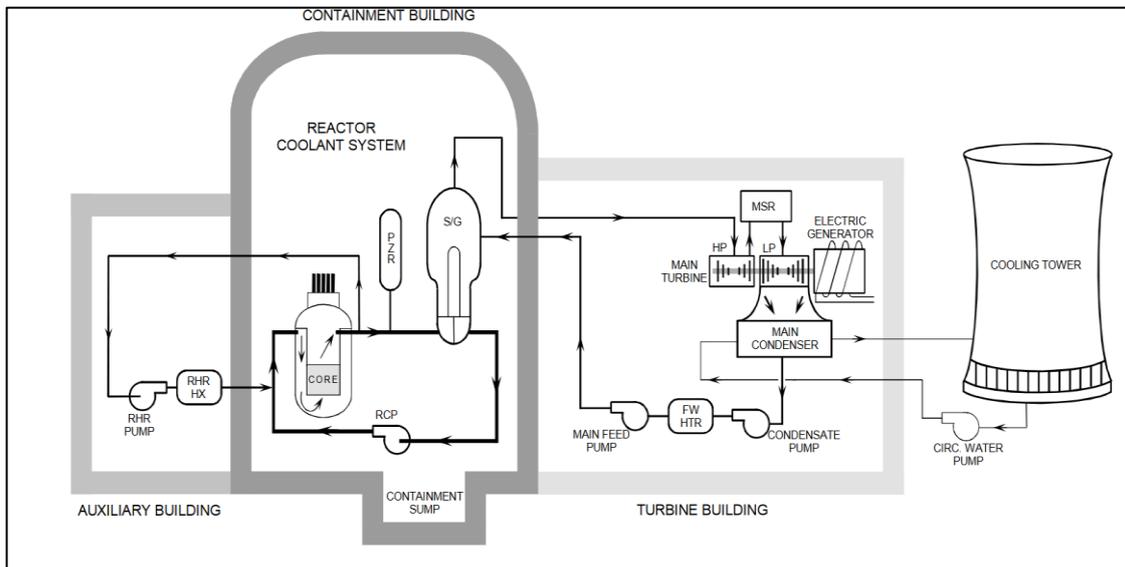
325°C en el núcleo del reactor, por lo tanto, debe mantenerse bajo una presión que es unas 150 veces la presión atmosférica para que no hierva (WNA, 2019b).

El agua líquida que sale de la vasija del reactor circula a través de los tubos del circuito primario atravesando los generadores de vapor¹² (CSN, 2019a). Dentro de los generadores de vapor, por el exterior de estos tubos circula el agua del circuito secundario, de manera que el agua del circuito primario calienta el agua del circuito secundario (no hay contacto directo entre las dos masas de agua) convirtiéndolo en vapor (CSN, 2019a). El vapor se dirige por los tubos del circuito secundario a la turbina, donde se expande y la hace girar (CSN, 2019a). El giro de la turbina se transmite al generador eléctrico, donde se produce la electricidad, enviándola después al parque de transformación, y desde allí, a la red eléctrica exterior (CSN, 2019a). El vapor que sale de la turbina, al estar muy caliente todavía, se condensa para su posterior retorno al ciclo de agua/vapor mediante un tercer circuito exterior de refrigeración que utiliza un gran caudal de agua fría que circula por el interior de los tubos del condensador (CSN, 2019a).

¹² Parte del sistema de enfriamiento de los reactores de agua a presión (PWR y PHWR) donde el refrigerante primario a alta presión que lleva el calor del reactor se utiliza para generar vapor para la turbina, en un circuito secundario. Esencialmente es un intercambiador de calor como un radiador de automóvil. Los reactores tienen hasta seis 'bucles', cada uno con un generador de vapor. Desde 1980, más de 110 reactores PWR han tenido que reemplazar sus generadores de vapor después de 20-30 años de servicio, 57 de ellos en EE. UU. Estos son grandes intercambiadores de calor para transferir calor de un fluido a otro; desde el circuito primario de alta presión de un PWR al circuito secundario donde el agua se convierte en vapor. Cada estructura pesa hasta 800 toneladas y contiene de 300 a 16,000 tubos de aproximadamente 2 cm de diámetro para el refrigerante primario, que es radioactivo debido al nitrógeno 16 (formado por bombardeo de oxígeno con neutrones, con una vida media de 7 segundos).[...] Las fugas se pueden detectar al controlar los niveles de N-16 en el vapor cuando sale del generador de vapor.

Imagen 2

Reactor del tipo PWR: diagrama general



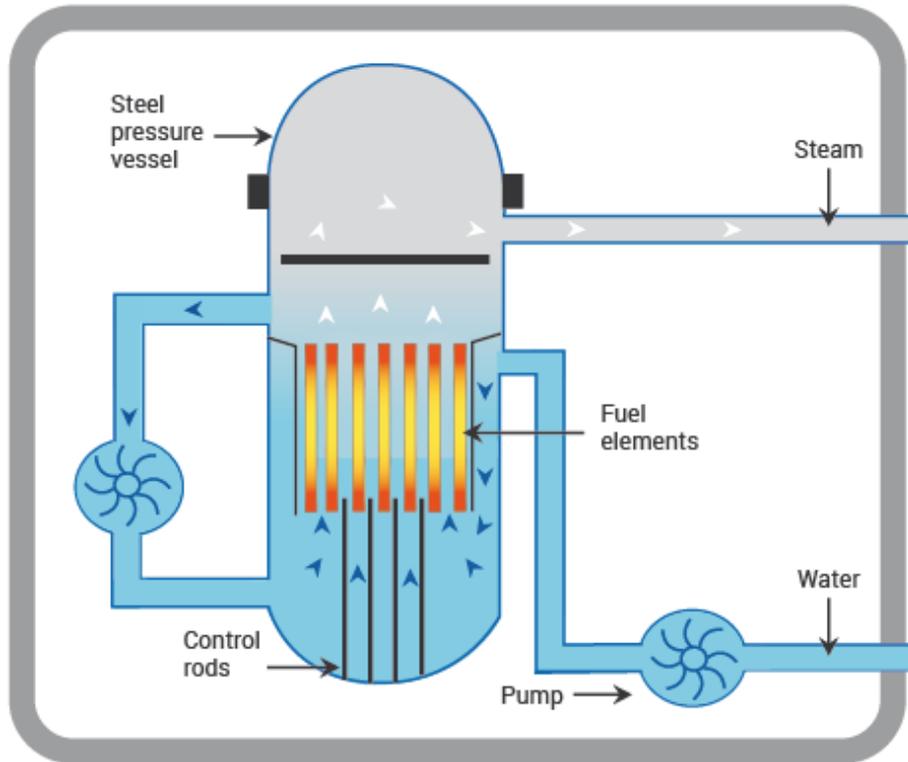
Fuente: United States Nuclear Regulatory Commission (2019)

Reactores del tipo BWR: Este diseño tiene muchas similitudes con el PWR, excepto que hay un solo circuito en el que el agua tiene una presión más baja (aproximadamente 75 veces la presión atmosférica) de modo que hierve en el núcleo a aproximadamente 285°C (WNA, 2019c). El reactor está diseñado para operar con un 12-15% del agua en la parte superior del núcleo en forma de vapor (WNA, 2019c). Un BWR tiene conjuntos de combustible que están formados por entre 90-100 barras cada uno, dispuestos verticalmente en el núcleo (WNA, 2019c). Hay hasta 750 conjuntos en el núcleo de un reactor, que contienen hasta 140 toneladas de uranio (WNA, 2019c).

En este tipo de reactores, no existe un circuito secundario agua/vapor, sino que es la misma agua la que circula por la vasija y el núcleo del reactor donde se evapora. El vapor que sale de la vasija se dirige a la turbina (CSN, 2019b). El funcionamiento de la turbina como del alternador, el condensador y el sistema de agua de alimentación, es análogo al de un reactor del tipo PWR, aunque en este caso el vapor condensado es impulsado directamente hasta la vasija del reactor (CSN, 2019b). Las barras de control están situadas en la parte inferior de la vasija (CSN, 2019b). Se insertan en su interior desde abajo utilizando un sistema hidráulico (CSN, 2019b).

Imagen 3

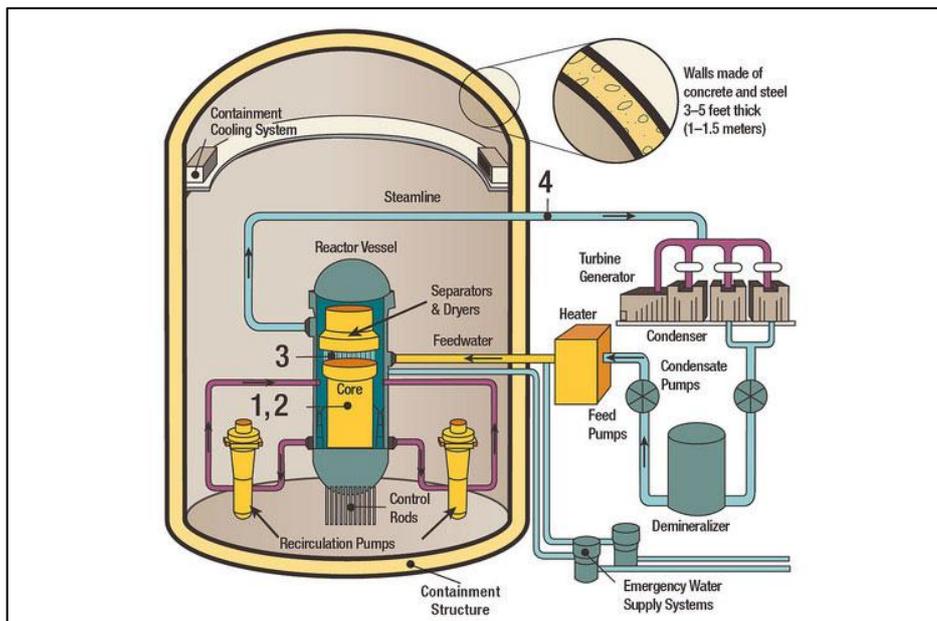
A Boiling Water Reactor (BWR)



Fuente: WNA (2019b).

Imagen 4

Reactor del tipo PWR: diagrama general



Fuente: U.S NRC (2015)

Reactores del tipo PHWR:

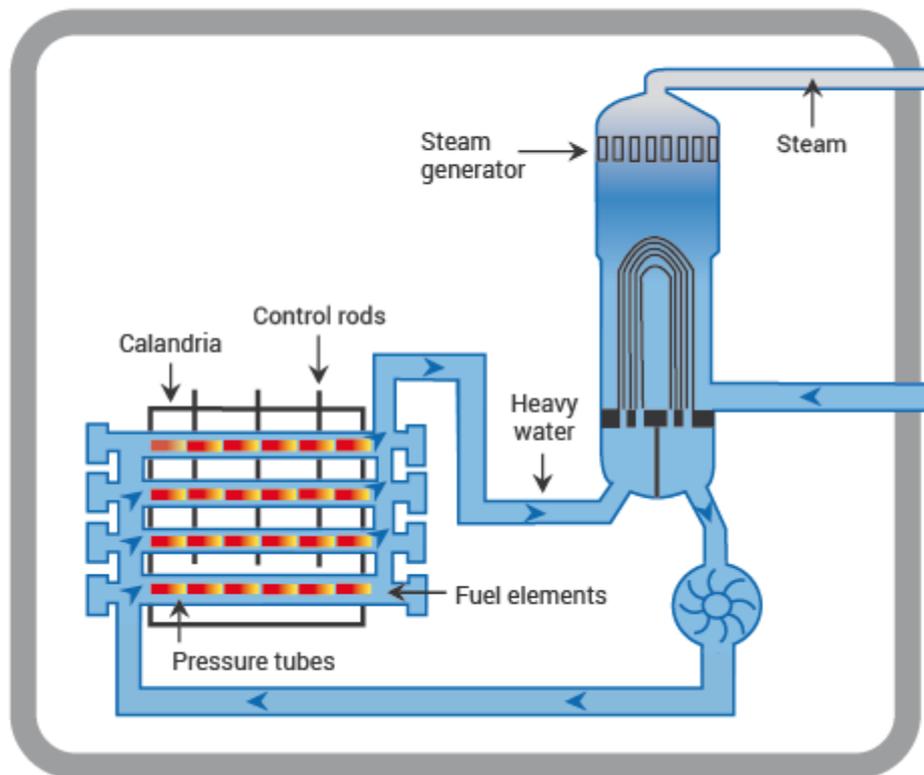
El diseño del reactor PHWR se ha desarrollado desde la década de 1950 en Canadá como el CANDU, y desde la década de 1980 en la India (WNA, 2019c). Los PHWR generalmente usan óxido de uranio natural (%0,7 de U-235) como combustible, por lo tanto necesitan un moderador más eficiente, que en este caso es agua pesada (D₂O) (WNA, 2019c). Un conjunto de combustible CANDU consiste en un paquete de 37 barras de combustible de medio metro de largo, además de una estructura de soporte, con 12 paquetes tendidos de extremo a extremo en un canal de combustible (WNA, 2019c).

El moderador se encuentra en un gran tanque llamado calandria, que es penetrada por varios cientos de tubos de presión horizontales que forman canales para el combustible (WNA, 2019c). Estos canales son enfriados por un flujo de agua pesada a alta presión (aproximadamente 100 veces la presión atmosférica), en el primer circuito, que suele alcanzar una temperatura de 290°C (WNA, 2019c). Al igual que en el PWR, con el objetivo de impulsar las turbinas, el refrigerante primario genera vapor en un circuito secundario (WNA, 2019c). El diseño del tubo de presión permite que el reactor puede reabastecerse con nuevo combustible progresivamente sin apagarse, aislando los tubos de presión individuales del circuito de enfriamiento (WNA, 2019c).

Las barras de control penetran en la calandria verticalmente, y un sistema de apagado secundario implica agregar gadolinio al moderador (WNA, 2019c).

Imagen 5

A Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR/Candu)



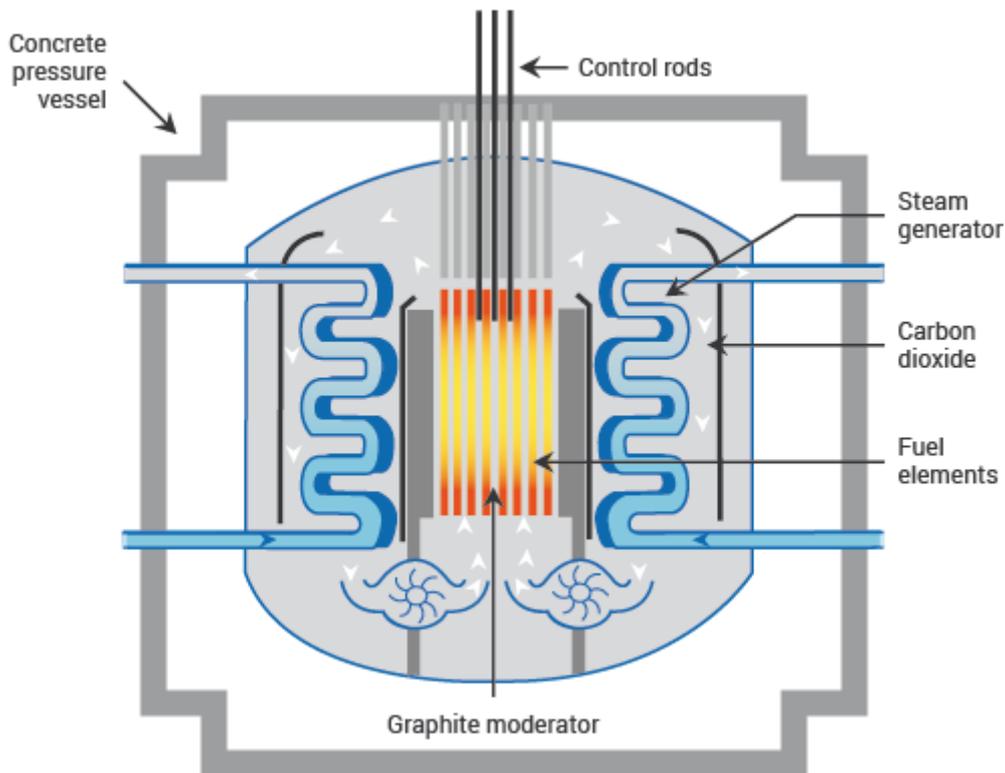
Fuente: (WNA, 2019c)

Reactores del tipo GCR:

Son la segunda generación de reactores británicos enfriados por gas, que utilizan como moderador grafito y dióxido de carbono como refrigerante primario (WNA, 2019c). El combustible está formado por pastillas de óxido de uranio enriquecido al 2.5-3.5%, que se encuentra en tubos de acero inoxidable (WNA, 2019c). El dióxido de carbono circula a través del núcleo, alcanzando los 650°C y luego pasa por los tubos del generador de vapor hacia afuera, pero aún dentro del recipiente de presión de hormigón y acero (por lo tanto, el diseño es "integral") (WNA, 2019c). Las barras de control penetran en el moderador y un sistema de cierre secundario consiste en inyectar nitrógeno al refrigerante (WNA, 2019c).

Imagen 6

An Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)



Fuente: (WNA, 2019c)

Reactores del tipo RBMK (LWGR):

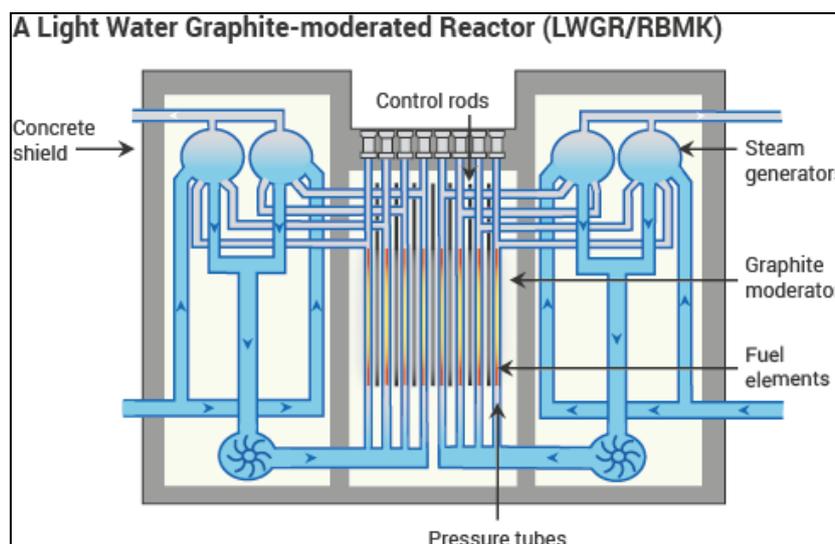
El RBMK de diseño soviético es un reactor enfriado por agua con canales de combustible individuales y que utiliza grafito como moderador. Al igual que en un reactor del tipo BWR, el agua hierve en los canales de combustible (a aproximadamente 6,9 MPa) y el vapor se separa sobre ellos en un solo circuito (WNA, 2019d). La pastilla de óxido de uranio ligeramente enriquecido están encerradas en un tubo de zircaloy de 3,65 m de largo, formando una barra de combustible (WNA, 2019d). Un conjunto de 18 barras forman un conjunto de combustible (WNA, 2019d).

Dentro del reactor, cada conjunto de combustible se coloca en su propio canal de presión vertical, que mide 7 metros de largo (WNA, 2019d). Cada canal se enfría individualmente con agua a presión que se deja hervir en el canal y emerge a aproximadamente 290°C (WNA, 2019d). Cuando los canales de combustible están aislados, los conjuntos de combustible pueden

ser extraídos, permitiendo reponer nuevo combustible mientras el reactor está en funcionamiento (WNA, 2019d). Los tubos de presión están rodeados y separados por bloques de grafito, que actúa como moderador (WNA, 2019d). Las barras de control de carburo de boro absorben los neutrones para controlar la tasa de fisión. Las barras de control cortas, insertadas hacia arriba desde la parte inferior del núcleo, controlan las distribución de energía a través del reactor (WNA, 2019d). Las barras de control principales se insertan de arriba hacia abajo, proporcionando un control automático, manual o de emergencia (WNA, 2019d). Las barras automáticas están reguladas por detectores internos (WNA, 2019d). En el caso de se produzca una desviación de los parámetros normales de operación (un aumento en el nivel de potencia por ejemplo), las barras pueden caer en el núcleo para reducir o detener la actividad del reactor (WNA, 2019d). Durante la operación algunas varillas permanecen dentro del núcleo (WNA, 2019d).

Dos circuitos de refrigeración de agua, que se encuentran separados, y cada uno con cuatro bombas, hacen circular el agua a través de los tubos de presión para eliminar un elevado porcentaje de calor generado por la fisión (WNA, 2019d). Los reactores RBMK también disponen de un sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo, que está diseñado para entrar en funcionamiento si se interrumpe uno de los circuitos de refrigerante (WNA, 2019d).

Imagen 7



Fuente: WNA (2019d).

Cada uno de los dos bucles tiene dos tambores de vapor, o separadores, donde el vapor del refrigerante calentado se dirige a la turbina para producir electricidad en el generador (cada bucle tiene un turbogenerador asociado) (WNA, 2019d). Luego, el vapor se condensa y se devuelve al refrigerante en circulación (WNA, 2019d).

Es muy diferente de la mayoría de los otros diseños de reactores, ya que su diseño derivó de un diseño que como objetivo principal tenía la producción de plutonio de graduación militar y fue diseñado y utilizado en la Unión Soviética tanto para la producción de plutonio, como para la producción de energía. La combinación de agua (como refrigerante) y grafito (como moderador) no se puede encontrar en otro ningún reactor del mundo. Como demostró el accidente de Chernóbil, varias de las características de diseño del RBMK, en particular, el diseño de las barras de control¹³ y un coeficiente de vacío positivo¹⁴, no eran seguros (WNA, 2019d).

¹³ Según el WNA (2019d) , «los reactores enfriados por agua hirviendo contienen una cierta cantidad de vapor en el núcleo. Debido a que el agua es un refrigerante más eficiente y un absorbente de neutrones más efectivo que el vapor, un cambio en la proporción de burbujas de vapor, o "vacíos", en el refrigerante dará como resultado un cambio en la reactividad del núcleo. La relación de estos cambios se denomina coeficiente de reactividad de vacío. Cuando el coeficiente de vacío es negativo, un aumento en el vapor conducirá a una disminución en la reactividad. En aquellos reactores donde el mismo circuito de agua actúa como moderador y como refrigerante, el exceso de generación de vapor reduce la desaceleración de los neutrones necesarios para sostener la reacción en cadena nuclear. Esto conduce a una reducción en la potencia, y es una característica básica de seguridad de la mayoría de los reactores occidentales. En los diseños de reactor donde el moderador y el refrigerante son de diferentes materiales, el exceso de vapor reduce el enfriamiento del reactor, pero como el moderador permanece intacto, la reacción en cadena nuclear continúa. [...]. En tales casos, la reducción en la absorción de neutrones como resultado de la producción de vapor, y la consiguiente presencia de neutrones libres adicionales, aumenta la reacción en cadena. Esto lleva a un aumento en la reactividad del sistema. El coeficiente de vacío es solo uno de los factores que contribuyen al coeficiente de potencia global de reactividad, pero en los reactores RBMK es el componente dominante, lo que refleja un alto grado de dependencia de la reactividad en el contenido de vapor del núcleo. En el momento del accidente en Chernobyl, el coeficiente de reactividad de vacío era tan positivo que superó a los otros componentes del coeficiente de potencia, y el coeficiente de potencia en sí se convirtió en positivo. Cuando la potencia comenzó a aumentar, se produjo más vapor, lo que a su vez condujo a un aumento en la potencia. El calor adicional resultante del aumento de la potencia elevó la temperatura en el circuito de enfriamiento y se produjo más vapor. Más vapor significa menos enfriamiento y menos absorción de neutrones, lo que resulta en un rápido aumento de la potencia hasta aproximadamente 100 veces la capacidad nominal del reactor. El valor del coeficiente de vacío está determinado en gran medida por la configuración del núcleo del reactor».

Después del accidente de Chernobyl, se hicieron cambios sustanciales en el diseño de los reactores del tipo RBMK con el objetivo de mejorar las seguridad¹⁵. No se ha vuelto a repetir un accidente de tales características en ningún reactor del tipo RBMK.

¹⁴ Según Medvedev (1991, p.48), «las barras de control de boro tenían cilindros de aluminio de 4,5 m de longitud, llenos de grafito incorporado a sus partes terminales. Estos cilindros jugaban un papel doble: suplementaban a los bloques de grafito, actuando como moderador extra, y también desplazaban el agua de los canales de control, cuando se hacían bajar las barras. No obstante, y comoquiera que eran demasiados cortos y estaban situados en la sección central del núcleo, cuando se les hacía descender incrementaban inicialmente la reactividad en la parte inferior del núcleo del reactor. Como consecuencia de ello, la reactividad total del reactor [RBMK-1000 de Chernobil] aumentó, en lugar de disminuir durante los cuatro primeros segundos después de que se apretara el botón AZ-5. Esto fue un error de diseño fatal».

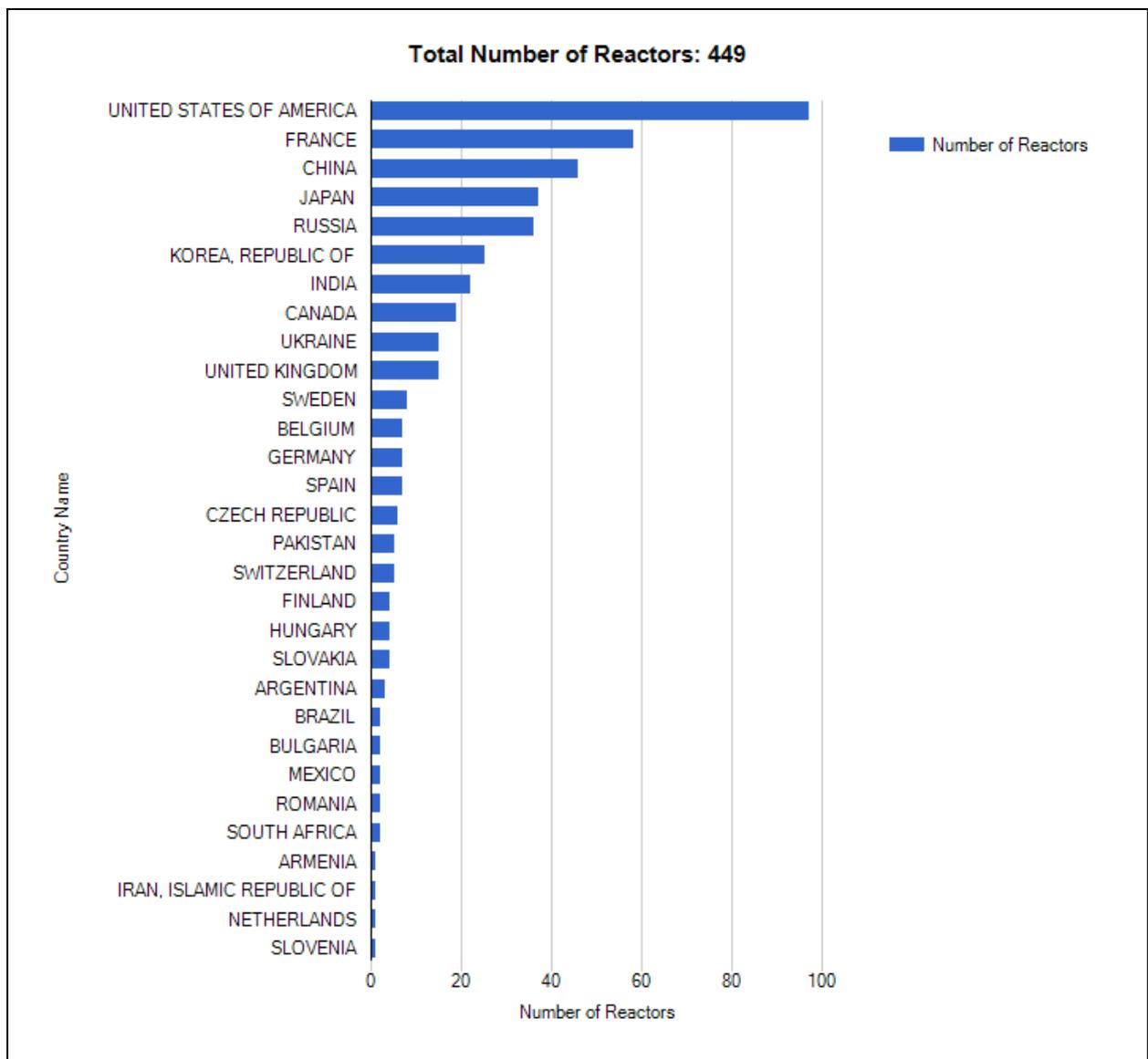
¹⁵ Para obtener más información a sobre las medidas adoptadas consultar la siguiente página <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>

3. CAPÍTULO

La energía nuclear orientada a la producción de energía eléctrica: breve análisis de cada Estado.

Grafico 3

Numero de reactores nucleares el 1 de julio del 2019



Fuente: (IAEA, 2019b)

- **Estados Unidos:** En 2018, EE.UU disponía de 98 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Hoy en día son 97 (IAEA, 2019d). Haciendo referencia al año 2018, 65 eran del tipo PWR y 33 del tipo BWR. Es el mayor productor mundial de energía nuclear, ya que representa más del 30% de la generación nuclear mundial del electricidad (WNA, 2019b). Dos reactores del tipo PWR se encuentran en proceso de construcción (IAEA, 2019d). En el año 2018, la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 4.177.810,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 807.078,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 19,32% (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), «después de un período de 30 años en el que se construyeron pocos reactores nuevos, se espera que dos unidades más entren en funcionamiento poco después de 2020, como resultado de 16 solicitudes de licencia realizadas desde mediados de 2007 para construir 24 nuevos reactores nucleares».
- **Francia:** En 2018, Francia disponía de 58 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 58 reactores eran del tipo PWR. Hay un reactor nuclear del tipo PWR en construcción (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 548.600,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 393.200,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 71,67% (IAEA, 2019c). La política del gobierno es reducir la energía eléctrica de origen nuclear al 50% para el 2035 (WNA, 2019b). Según el WNA (2019c), Francia es el mayor exportador neto de electricidad del mundo debido a su muy bajo costo de generación. El país ha sido muy activo en el desarrollo de tecnología nuclear (WNA, 2019b). Los reactores y en especial los productos y servicios de combustible han sido una importante exportación (WNA, 2019b).
- **República Popular de China¹⁶:** En 2018 China disponía de 51 reactores nucleares (46+5) activos (IAEA, 2019c). 43 son del tipo PWR, 2 del modelo PHWR y 1 del modelo FBR (IAEA, 2019c).

¹⁶ En el caso de China, se separan los datos de la R.P.C y Taiwán pero ambos se incluyen en el apartado de la R.P.C. Los datos que tienen un número inferior pertenecen a Taiwán.

Son 13 (11+2) los reactores que se están construyendo en estos instantes (IAEA, 2019d). 10 serían del tipo PWR, 2 del tipo BWR (Pertenechentes a Taiwán) y uno del tipo HTGR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 6.791.420,00 Gw/h + 233.383,20 Gw/h (IAEA, 2019c). 286.501,00 Gw/h + 26.656, 43 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 4,22% y el 11, 43% respectivamente (IAEA, 2019c). China es uno de los estados que mas a apostado por la energía nuclear a nivel global. Según los datos disponibles, China plantea construir 31 reactores nucleares más en los próximos años (IAEA, 2019d). Según el WNA (2019b) «China se ha vuelto en gran parte autosuficiente en el diseño y construcción de reactores, así como en otros aspectos del ciclo del combustible, pero está haciendo un uso completo de la tecnología occidental mientras la adapta y la mejora [...] La política de China es "volverse global" con la exportación de tecnología nuclear, incluidos los componentes pesados de la cadena de suministro». La política de China es tener un ciclo de combustible cerrado (WNA,2019b).

- **Japón:** Según la IAEA (2019c) en el caso de Japón, en 2018 39 reactores eran operables (en la actualidad son 37) (IAEA, 2019b). Haciendo referencia a los datos de 2018, 17 serían del tipo PWR y 22 del tipo BWR. Los dos primeros reactores se reiniciaron en agosto y octubre del 2015, y desde entonces se han reiniciado otros siete, con 9 reactores activos en la actualidad (debido o al accidente nuclear sufrido por la central nuclear de Fukushima Daiichi el 11 de marzo del 2011) (WNA, 2019b). 17 reactores están actualmente en proceso aprobación para el reinicio (WNA, 2019b). Según los datos proporcionados por la IAEA (2019c), en el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 793.681,00 Gw/h. 49.199,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 6,20% (IAEA, 2019e).
- **Federación Rusa:** En la actualidad la Federación Rusa dispone de 36 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 20 son del tipo PWR, 14 del tipo LWGR y dos del tipo FBR. Son 6 los que se encuentran en proceso de construcción y son del tipo PWR (IAEA, 2019d). En

el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 1.070.922,40 Gw/h (IAEA, 2019c). 191.331,49 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 17,87% (IAEA, 2019c). Junto con China, Rusia es uno de los países que más fuertemente ha apostado por la energía nuclear. Según la IAEA (2019d), Rusia plantea construir 20 reactores nucleares en los próximos años. Como en el caso de China, la transferencia de tecnología nuclear se ha convertido en un arma para obtener más influencia a nivel global. Según ROSATOM (2019a), la compañía «ocupa el primer lugar en cuanto a número de proyectos de construcción de reactores nucleares implementados simultáneamente (6 en Rusia y 36 en el extranjero). Según el WNA (2019b), Rusia es un líder mundial en tecnología de reactores de neutrones rápidos. Se compromete a cerrar el ciclo del combustible y considera que los reactores rápidos una clave para esto (WNA, 2019b).

- **Corea del Sur:** En 2018 Corea del Sur disponía de 24 reactores nucleares (IAEA, 2019c) (actualmente, dispone de 25 reactores nucleares activos). Haciendo referencia a los datos de 2018, 20 reactores eran del tipo PWR y 4 eran del tipo PHWR. Hoy en día, son cuatro los reactores que se encuentran en proceso de construcción, siendo los 4 del tipo PWR (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 536.951,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 127,075.00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 23,67% (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), Corea del Sur se encuentra entre los países más importantes del mundo en materia de energía nuclear ya que exporta ampliamente también su tecnología. Actualmente participa en la construcción de cuatro reactores nucleares en los Emiratos Árabes Unidos. No obstante, el nuevo presidente electo en 2017 apunta a eliminarla en unos 45 años (WNA, 2019b).
- **India:** India dispone de 22 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 2 son del tipo PWR, 2 del tipo BWR y 18 del tipo PHWR. Son 7 los reactores que se encuentran en proceso de construcción (IAEA, 2019d). 2 son del tipo PWR, 4 del tipo PHWR y uno del tipo FBR. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la

nuclear) fue de 1.129.886,28 Gw/h (IAEA, 2019c). 35.388,68 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 3,13% (IAEA, 2019c).

- **Canadá:** Actualmente, Canadá dispone de 19 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Todos son del tipo PHWR. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 638.938,72 Gw/h (IAEA, 2019c). 95.037,24 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 14,87% (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), durante muchos años, Canadá ha sido un líder en investigación y tecnología nuclear, exportando sistemas de reactores desarrollados en el mismo país.
- **Ucrania:** Ucrania dispone de 15 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Todos son del tipo PWR. Dos se encuentran en proceso de construcción y son del tipo PWR (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 159.350,50 Gw/h (IAEA, 2019c). 84.398,06 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 52,96% (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), Ucrania recibe la mayoría de sus servicios nucleares y de combustible de Rusia, pero está reduciendo esta dependencia comprando combustible producido por Westinghouse (WNA, 2019b). El gobierno está mirando a Occidente en materia de inversión y tecnología para sus plantas nucleares (WNA, 2019b).
- **Reino Unido:** Actualmente, el Reino Unido dispone de 15 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Un reactor es del tipo PWR y los 14 restantes del tipo GCR. Pero casi la mitad de esta capacidad se retirara para el 2025 (WNA, 2019b). En estos instantes, se está construyendo un reactor nuclear (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 333.458,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 59.098,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 17,72% (IAEA, 2019c).
- **Suecia:** Suecia dispone de 8 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 3 son del tipo PWR y 5 del tipo BWR. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 158.313,00

Gw/h (IAEA, 2019c). 63.849,36 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 40,33% (IAEA, 2019c).

- **Bélgica:** Actualmente, Bélgica dispone de 7 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Todos son del tipo PWR. Desde el 2003 ha habido poco apoyo gubernamental para la energía nuclear (WNA, 2019b). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 69.212,35 Gw/h (IAEA, 2019c). 26.995,63 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 39% (IAEA, 2019c).
- **Alemania:** Actualmente, Alemania dispone de 7 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 6 son del tipo PWR y el restante del tipo BWR. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 613.100,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 71.866,45 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 11,72% (IAEA, 2019c). Según la WNA (2019b), « Un gobierno de coalición formado después de las elecciones federales de 1998 tuvo como consecuencia una política de eliminación gradual de la energía nuclear. Con un nuevo gobierno en 2009, la eliminación se canceló, pero luego se reintrodujo en 2011, con ocho reactores que se cerraron de inmediato. La opinión pública en Alemania sigue oponiéndose en gran medida a la energía nuclear, prácticamente sin apoyo para la construcción de nuevas plantas nucleares».
- **España:** España dispone de 7 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 6 son del tipo PWR y el restante es del tipo BWR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 260.906,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 53.295,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 20,43% (IAEA, 2019c).
- **República Checa:** Actualmente, la República Checa dispone de 6 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 6 son del tipo PWR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 81.896,40 Gw/h (IAEA, 2019c). 28.255,40 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 34,50% (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el compromiso del con el

futuro de la energía nuclear es fuerte, siendo reafirmado en 2015 en la política energética.

- **Pakistán:** Pakistán dispone de 5 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 4 son del tipo PWR y el restante del tipo PHWR. Dos se encuentran en proceso de construcción (IAEA, 2019d). Cabe una mención especial, la ayuda recibida por China en el desarrollo de su programa nuclear. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 136.475,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 9.289,66 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 6,81% (IAEA, 2019c).
- **Suiza:** Actualmente, Suiza dispone de 5 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 3 son del tipo PWR y 2 del tipo BWR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 64.928,28 Gw/h (IAEA, 2019c). 24.496,46 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 37,73% (IAEA, 2019c).
- **Finlandia:** Finlandia dispone de 4 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). 2 son del tipo PWR y los dos restantes del tipo BWR (IAEA, 2019c). En estos instantes se está construyendo un reactor del tipo PWR (IAEA, 2019d). A día de hoy existe un proyecto para construir un reactor mas (WNA, 2019b). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 67.462,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 21.889,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 32,45% (IAEA, 2019c).
- **Hungría:** Hungría dispone de 4 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 4 son del tipo PWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), El Parlamento húngaro ha expresado su apoyo abrumador para la construcción de dos nuevos reactores nucleares, y se han firmado los contratos para estos. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 29.339,91 Gw/h (IAEA, 2019c). 14.857,26 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 50,64% (IAEA, 2019c).

- **Republica de Eslovaquia:** Actualmente, Eslovaquia dispone de 4 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 4 son del tipo PWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el compromiso del gobierno con el futuro de la energía nuclear es fuerte. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 25.057,17 Gw/h (IAEA, 2019c). 13.788,90 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 55,03% (IAEA, 2019c).
- **Argentina:** Argentina dispone de 3 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los tres son del tipo PHWR (IAEA, 2019c). En estos instantes se está construyendo un reactor del tipo PWR (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 137.830,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 6.452,97 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 4,68% (IAEA, 2019c).
- **Brasil:** Brasil dispone de 2 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los dos son del tipo PWR (IAEA, 2019c). En estos instantes se está construyendo un reactor del tipo PWR (IAEA, 2019d). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 581.898,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 15.674,03 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 2,69% (IAEA, 2019c).
- **Bulgaria:** Bulgaria dispone de 2 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los dos son del tipo PWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el compromiso del gobierno con el futuro de la energía nuclear es fuerte, aunque hay problemas de financiación. Se planificó la construcción de una nueva planta nuclear, pero en cambio, es probable que se agregue una unidad a la planta actual. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 46.527,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 16.125,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 34,66% (IAEA, 2019c).
- **México:** Actualmente, México dispone de 2 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 2 reactores son del tipo BWR. Según el WNA (2019b), existe cierto apoyo gubernamental para expandir la energía nuclear. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 249.144,37 Gw/h (IAEA, 2019c).

13.200,33 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 5,30% (IAEA, 2019c).

- **Rumania:** Rumania dispone de 2 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 2 reactores son del tipo PHWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el apoyo del gobierno rumano a la energía nuclear es fuerte. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 60.705,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 10.442,00 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 17,20% (IAEA, 2019c).
- **Sudáfrica:** Actualmente, Sudáfrica dispone de 2 reactores nucleares activos (IAEA, 2019c). Los 2 reactores son del tipo PWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el compromiso del gobierno con el futuro de la energía nuclear ha sido fuerte, pero en agosto de 2018, la nueva administración abandono los planes de construir nuevas instalaciones antes del 2030. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 225.756,09 Gw/h (IAEA, 2019c). 10.563,92 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 4,68% (IAEA, 2019c).
- **Armenia:** Actualmente, Armenia dispone de un reactor nuclear activo del tipo BWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), Armenia está considerando el desarrollo de una nueva unidad. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 7.423,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 1.898,08 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 25,57% (IAEA, 2019c).
- **Irán:** Irán dispone de un reactor nuclear activo del tipo PWR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 301.000,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 6.300,12 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 2,09% (IAEA, 2019c).
- **Países Bajos:** Países Bajos dispone de un reactor nuclear activo del tipo PWR (IAEA, 2019c). En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 109.511,00 Gw/h (IAEA, 2019c). 3.340,53 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 3,05% (IAEA, 2019c).

- **Eslovenia:** Actualmente, Eslovenia dispone de un reactor nuclear activo del tipo PWR (IAEA, 2019c). Según el WNA (2019b), el país considera instalar más capacidad. En el año 2018 la producción eléctrica total (incluyendo la nuclear) fue de 15.290,30 Gw/h (IAEA, 2019c). 5.489,91 Gw/h fueron de origen nuclear, es decir, el 35,90% (IAEA, 2019c).
- **Bielorrusia:** Actualmente, Bielorrusia está construyendo 2 reactores del tipo PWR.
- **Turquía:** Actualmente, Turquía está construyendo su primer reactor nuclear del tipo PWR.
- **Emiratos Árabes Unidos:** Actualmente, EAU está construyendo 4 reactores nucleares del tipo PWR.

CONCLUSIONES

Los países Asiáticos y los que se encuentran en Europa Central y en el Este han sido los que han apostado de una manera más notoria a favor del uso de la energía nuclear para la obtención de energía eléctrica. De acuerdo con los datos disponibles, se puede afirmar que ha habido un desplazamiento de oeste a este en favor de la utilización de la tecnología nuclear, ya que casi la totalidad (el %85) de los reactores nucleares que se están construyendo hoy en día se están construyendo en el eje Europa Central-Oriental /Asia.

Hay que mencionar sobre todo los casos de Rusia y China. En el caso de Rusia, el accidente que ocurrió el 26 de abril de 1986 en el reactor número 4 de ChernobíI asestó un golpe terrible a la credibilidad de la industria nuclear Soviética. Después del colapso de la Unión Soviética y la formación de la actual Rusia, hubo una reestructuración muy importante de la industria nuclear rusa. Actualmente, la Federación Rusa es líder global en exportación de tecnología nuclear. Es una manera muy inteligente de expandir su influencia en el mundo, ya que cada proyecto implantado, o los acuerdos que se realizan atan económicamente a los dos países. La lógica en la que se basa China es la misma. Ha hecho una fuerte apuesta en favor de la energía nuclear también, con el objetivo de combatir internamente la contaminación producida por la quema de combustibles fósiles y para ganar soberanía en términos energéticos. Un accidente nuclear grave en territorio nacional tendría consecuencias nefastas para los planes de los dos países en términos de credibilidad y confianza. Esto nos lleva a pensar que pueden desarrollarse dos lógicas paralelamente: la primera, la de construir reactores con un alto grado de seguridad, fiabilidad y rendimiento, y la segunda, la de ocultar a toda costa toda información relativa a los accidentes que puedan suceder en los nuevos diseños. El tiempo lo dirá.

BIBLIOGRAFÍA

- Consejo de Seguridad Nuclear (2019). *Reactores de agua a presión (PWR)*. Recuperado de <https://www.csn.es/reactores-de-agua-a-presion-pwr->
- Consejo de Seguridad Nuclear (2019). *Reactores de agua en ebullición (BWR)*. Recuperado de <https://www.csn.es/reactores-de-agua-en-ebullicion-bwr->
- International Atomic Energy Agency (2019a). *Current estatus*. Recuperado el 1 de julio del 2019 de <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- International Atomic Energy Agency (2019b). *Operational & Long-Term Shutdown Reactors. By Country*. Recuperado el 1 de julio del 2019 de <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
- International Atomic Energy Agency (2019c). *Nuclear Power Reactors in the world*. Viena: IAEA. Recuperado de <https://www.iaea.org/publications/13552/nuclear-power-reactors-in-the-world>
- International Atomic Energy Agency (2019d). *Operational & Long-Term Shutdown Reactors. By Type*. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>
- Medvedev, Z. (1991). *El legado de Chernobíl*. Barcelona: Ediciones Palomares-Corredor.
- Rosatom (2019). *Projects*. Recuperado el 1 de julio del 2019 de <https://www.rosatom.ru/en/investors/projects/>
- United States Nuclear Regulatory Commission (2015). *Boiling Water Reactor (BWR) Systems*. Ondorengo gunetik berreskuratua 2019ko martxoaren 29an <https://www.nrc.gov/reactors/bwrs.html>

United States Nuclear Regulatory Commission (2019). *Presurized Water Reactor (PWR) Systems*. Ondorengo gunetik berreskuratua 2019ko martxoaren 28an <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>

World Nuclear Association (2019a). *Nuclear Power in the World Today*. Recuperado el 1 de julio de 2019 de <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>

World Nuclear Association (2019b). *Countries A-F*. Recuperado el 1 de julio del 2019 de <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f.aspx>

World Nuclear Association (2019c). *Nuclear Power Reactors*. Recuperado de <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>

World Nuclear Association (2019d). *RBMK reactors*. Recuperado de <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>