

Reactores de onda de propagación

Traveling wave reactors

Antonio González-Jiménez
Foro de la Industria Nuclear Española (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/9944>

El Reactor de Onda de Propagación, *Traveling Wave Reactor* (TWR por sus siglas en inglés), se encuadra dentro de los denominados Reactores Rápidos Refrigerados por Sodio (*Sodium Fast Reactors*, SFR), uno de los seis diseños desarrollados por la asociación "Generation IV International Forum" y aceptados como Gen IV.

El reactor SFR utiliza sodio líquido como refrigerante y permite conciliar una alta densidad de potencia con una baja fracción de volumen de refrigerante y la operación a baja presión. Si bien se evita la corrosión al mantener un ambiente sin oxígeno, la violenta reacción del sodio con el aire y el agua requiere que el sistema por el que circula esté herméticamente sellado. El ciclo de combustible del reactor permite la regeneración del combustible fisionable y facilita la gestión de los actínidos menores producidos, que logran fisionarse gracias a la eficacia de los neutrones de alta energía.

1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El *Traveling Wave Reactor* es un reactor reproductor de paso único que pone en valor el material fisionable reduciendo en gran medida la necesidad de enriquecimiento y posible reprocesado posterior. La reproducción convierte el material fisionable inicial en nuevo combustible fisible, permitiendo la propagación de una onda de reproducción-quemado. Este concepto se basa en que las ondas de reproducción-quemado y el combustible "se mueven mutuamente" de forma relativa respecto a un observador fijo. La materialización más práctica del reactor TWR implica el movimiento del combustible al tiempo que se mantienen "fijas" las reacciones nucleares.

Los reactores TWR pueden funcionar con distintos tipos de combustible, incluyendo uranio empobrecido, uranio natural y uranio de bajo enriquecimiento (por ejemplo, 5,5% de U-235 o inferior), que de manera ordinaria no serían críticos en un espectro neutrónico rápido.

El combustible gastado de los reactores de agua ligera también podría servir como combustible de los reactores TWR. En cada uno de estos casos, se consigue un alto

rendimiento en el uso del combustible y una reducción significativa del volumen de residuos, sin la necesidad de reproceso.

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

El reactor TWR responde a una arquitectura convencional de los reactores de sodio, consistente en un circuito de refrigeración primaria de sodio, un circuito de refrigeración intermedia de sodio y un ciclo de conversión de vapor. La energía de fisión producida en el núcleo del reactor se transfiere sucesivamente a través de los circuitos primario e intermedio a los generadores de vapor, en los que se produce vapor sobrecalentado. Este vapor mueve un conjunto turbina-alternador para producir electricidad, y el vapor a baja temperatura es reconducido a través de un conjunto de condensadores refrigerados por agua que crean el vacío necesario para el funcionamiento del ciclo termodinámico.

El circuito intermedio actúa como barrera entre el circuito de refrigeración primario y el ciclo de vapor a alta presión, de manera que si existiese una fuga o una rotura en cualquiera de los componentes, se pueda asegurar la integridad del núcleo del reactor y de la barrera primaria de sodio.

El reactor TWR utiliza una configuración del tipo piscina, en el que los componentes del sistema primario (el núcleo, los intercambiadores de calor intermedios y las bombas) están instalados en una gran piscina de sodio a presión atmosférica dentro de la vasija del reactor. Esta se encuentra rodeada por una vasija de protección independiente, de tal forma que el nivel de sodio se mantiene incluso si la vasija del reactor sufre una fuga.

La utilización de una piscina tiene la ventaja de reducir la cantidad de tuberías y espacio necesarios, proporcionando una gran inercia térmica, y reduciendo la posibilidad y las consecuencias de una fuga de refrigerante.

Los diseños para los reactores TWR tienen un rango de potencias eléctricas entre 600 MW y 1.200 MW. Las temperaturas de entrada y de salida del núcleo son 360 °C y 510 °C, respectivamente, en una central con un rendimiento neto cercano al 41%, lo que representa un incremento significativo sobre los rendimientos de alrededor del 33% de los reactores actuales de agua ligera, reactores de agua a presión y reactores de agua en ebullición.

La disposición general del núcleo del TWR es la típica de los reactores SFR, y se compone de elementos hexagonales de vainas de combustible cilíndricas rodeados por un canal de acero exterior. El control del núcleo se lleva a cabo a través de barras de control que se insertan en el mismo, con un banco redundante de barras de parada.

El reactor TWR está diseñado para operar de forma indefinida después del periodo de puesta en marcha, utilizando solamente uranio natural o empobrecido. Las ondas de "reproducción-quemado" de los núcleos fisibles se propagan de forma relativa al combustible y proporcionan la posibilidad de extensos ciclos de vida del núcleo (aproximadamente 60 años). Esto permite un mayor aprovechamiento del combustible, unas 30 veces mayor que en los reactores de agua ligera.

El proceso de "reproducción-quemado" se consigue a través de una "onda estacionaria" creada mediante la reubicación periódica del combustible en el núcleo, de forma que los elementos con un mayor grado de quemado se ubican en la periferia y los elementos combustibles con uranio empobrecido reemplazan los elementos anteriores. La reactividad en el núcleo del reactor se incrementa y se controla con la inserción de las barras de control lentamente hasta compensarla. La reubicación de los elementos combustibles se realiza durante la parada del reactor, que tiene lugar cada 18 o 24 meses.

El TWR utiliza combustible metálico avanzado y vainas de acero ferrítico-martensítico, que posibilitan alcanzar altos picos de quemado de hasta el 30%.

3. EL PROTOTIPO TWR-P

La empresa estadounidense TerraPower, fundada por Bill Gates en 2006, ha desarrollado un prototipo de reactor TWR, denominado TWR-P, que pretende demostrar la gestión citada del combustible en el núcleo, cualificar los elementos combustibles avanzados y validar la realimentación, de expansión radial, de reactividad en el núcleo y la eficacia del sistema de control del núcleo.

El TWR-P alcanza una potencia térmica de 1.475 MWth y 600 MWe brutos y utiliza como combustible uranio metálico con 10% de zirconio en vainas de acero inoxidable ferrítico-martensítico HT-9.

El núcleo cilíndrico de 4 metros de diámetro y 5,5 metros de altura se sitúa cerca del fondo de la vasija del reactor, que tiene 13,3 metros de diámetro y 17,65 metros de altura y que se encuentra dentro de una vasija de contención. Esta configuración de tipo piscina no tiene penetraciones de tuberías radiales en ninguna de las vasijas, de tal manera que se elimina el riesgo de accidentes con pérdida de refrigerante.

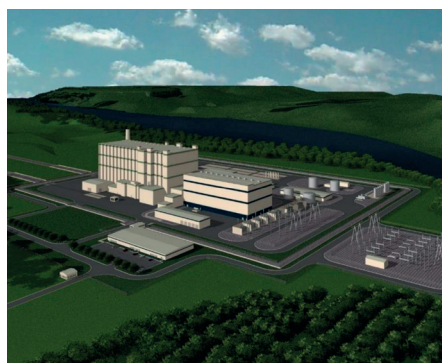
El gran volumen de sodio existente actúa como un enorme sumidero de calor, por lo que los transitorios son mucho más lentos, lo que proporciona a los operadores de la planta mucho más tiempo para responder a sucesos anormales y mejora las funciones de seguridad globales en comparación con los actuales reactores de agua ligera.

Para conseguir un perfil de flujo con unos gradientes de temperatura y potencia similares a los de un TWR y para alcanzar las distribuciones de potencia de referencia en los elementos combustibles sometidos a las ondas de "reproducción-quemado", en el núcleo también se cargan elementos de combustible frescos con uranio empobrecido.

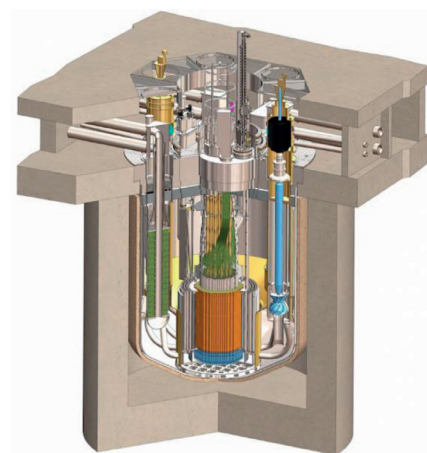
El núcleo y todos los componentes del sistema primario de refrigeración están contenidos en la vasija del reactor, junto a varias estructuras internas. Todas las vasijas y estructuras que están en contacto directo con el refrigerante primario de sodio se fabrican en acero inoxidable 316H.

En el TWR-P, los accidentes por pérdida de refrigerante se eliminan de las bases de diseño. Los accidentes bases de diseño postulados son la pérdida de caudal y la pérdida del sumidero de calor. Los sucesos transitorios de exceso de potencia son poco frecuentes debido a que los enclavamientos impiden la extracción indebida de las barras durante la operación.

Las plantas equipadas con los reactores TWR-P emplean, para la extracción del calor residual de desintegración, cuatro Circuitos de Refrigeración Auxiliares Directos (*Direct Reactor Auxiliary Cooling System*,



Concepto NATRIUM



Diseño conceptual reactor TWR

DRACS) que evacúan y disipan el calor en el aire exterior, como sumidero final de calor. Cada uno de estos circuitos es capaz de cumplir la función de evacuación de calor del reactor y en consecuencia la seguridad nuclear y la protección radiológica de la población. Estos circuitos, por los que circula un fluido formado por una aleación de sodio y potasio son completamente pasivos y no requieren la energización de equipos para su puesta en marcha y funcionamiento.

4. EL CONCEPTO NATRIUM: UN REACTOR TWR CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Así mismo, TerraPower y GE Hitachi Nuclear Energy acaban de lanzar un nuevo concepto, al que se le ha dado el nombre de Natrium, para la generación y el almacenamiento de energía, que combina un reactor tipo TWR con un sistema de almacenamiento de sales fundidas, y que se espera esté disponible para su utilización comercial a finales de la presente década.

Esta nueva tecnología pretende simplificar los tipos de reactores hasta ahora existentes. Todos los equipos no nucleares, mecánicos, eléctricos y otros, se emplazarán en edificios separados, lo que reducirá la complejidad de la instalación y su coste. Además, la mayor parte de los componentes de la planta se fabricarán según los estándares industriales y se reducirá en un 80%, respecto a los grandes reactores, el hormigón de clase nuclear necesario.

El reactor nuclear utilizará uranio empobrecido o uranio natural como combustible y tendrá una potencia de 345 MWe, con flexibilidad para adaptarse a determinados mercados y sistemas eléctricos. Así, el sistema de almacenamiento térmico será capaz de aumentar la potencia de generación hasta 500 MWe durante más de cinco horas y media cuando sea necesario.

Esto permitirá que este tipo de reactor genere electricidad fiable y flexible y con capacidad de seguimiento de carga, que pueda dar respuesta a los cambios diarios que se producen en la demanda, lo que ayudará a los consumidores a aprovechar las puntas de consumo derivadas de las fluctuaciones en aquellas redes con alto grado de producción eléctrica de origen renovable.

5. CONCLUSIONES

Las principales ventajas de los reactores TWR descansan en la aplicación de las leyes naturales de la física para mantener la seguridad de la instalación sin la intervención de los operadores; la capacidad del mantenimiento de la reacción de fisión en cadena de manera sostenida; los bajos costes de inversión y operación, en comparación con los grandes reactores de agua ligera, gracias al funcionamiento a presión atmosférica y a los bajos costes del combustible; el almacenamiento del combustible gastado en el interior del núcleo, reduciendo la necesidad de su disposición y el transporte de residuos; la eliminación del reproceso del combustible gastado y la potencial eliminación de las instalaciones de enriquecimiento de combustible.

Las innovaciones tecnológicas, como las de los reactores de onda de propagación TWR, junto con las cada vez mayores exigencias medioambientales harán que la energía nuclear siga teniendo un papel clave que jugar, como fuente masiva de producción de electricidad sin emisiones de gases de efecto invernadero, en la transición energética que posibilitará el desarrollo de un nuevo modelo económico descarbonizado y la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Generation IV International Forum. Sodium-cooled Fast Reactor www.gen-4.org/gif/jcms/c_9361/sfr
- [2] Traveling wave reactors: sodium-cooled gold at the end of a nuclear rainbow? Arjun Makhijani. Institute for energy and environmental research. Septiembre 2013.
- [3] Terrapower, LLC traveling wave reactor development program overview. Pavel Hejzlar y otros. Nuclear Engineering and Technology. Octubre 2013.
- [4] The travelling wave reactor: design and development. John Gilleland y otros. Engineering. Elsevier. Marzo 2016
- [5] Safety features of the TerraPower traveling wave reactor. TerraPower. Eighth Joint IAEA-GIF Technical Meeting/Workshop on the Safety of Liquid Metal Cooled Fast Reactors. Marzo 2019