

## REACTORES NUCLEARES DE IV GENERACIÓN Y TECNOLOGÍAS DE COGENERACIÓN NUCLEAR

Herrera Cardona, Daniel<sup>1</sup>

*Estudiante de Física, enfocado en física nuclear y de plasma, Universidad de Antioquia, Grupo de Ciencia y Tecnologías Nucleares – Red Nuclear Colombiana, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025*  
*herreradaniel090@gmail.com*

### Resumen:

Los reactores nucleares de IV generación representan una evolución tecnológica clave para la transición energética y la descarbonización industrial. Diseñados para operar a temperaturas más altas que los reactores actuales, permiten aplicaciones industriales adicionales, como la producción de hidrógeno y la desalinización de agua. Además, buscan mejorar la seguridad nuclear y optimizar la gestión del combustible, permitiendo el reciclaje del combustible gastado y reduciendo la cantidad y vida media de los residuos radiactivos.

Estos avances son impulsados por el Foro Internacional Generation IV (GIF), una iniciativa de cooperación que cuenta con la participación de 13 países, incluidos Francia, EE.UU., China, Brasil y Japón. El GIF ha identificado seis diseños de reactores considerados los más prometedores de esta nueva generación. Aunque algunos prototipos ya están en operación o construcción, no se espera una adopción comercial amplia antes de 2030 en Occidente.

La cogeneración nuclear, que permite aprovechar el calor de los reactores para producir energía térmica y eléctrica simultáneamente, se presenta como una solución eficiente y sostenible para diversas industrias. En conjunto, estas tecnologías ofrecen un camino prometedor hacia una industria más limpia y sostenible.

**Palabras clave:** Energía Nuclear, Reactor Nuclear, Cogeneración Nuclear, Reactores Nucleares de IV Generación, Descarbonización.

### INTRODUCCIÓN

La Cogeneración nuclear se define como la integración de plantas nucleares de potencia con otros sistemas y aplicaciones. El calor generado por las plantas nucleares puede ser utilizado para cubrir una gran cantidad de necesidades como calefacción industrial, producción de vapor de alta temperatura para procesos químicos a gran escala, desalinización de agua y, la que por supuesto es una de las aplicaciones de mayor prioridad en el marco de la transición energética global: La producción de hidrógeno a escala industrial y con bajas emisiones.

A la luz de los avances tecnológicos con los reactores que funcionan a altas temperaturas, se ha logrado demostrar que la cogeneración nuclear tiene unos beneficios ambientales, económicos y en términos de eficiencia altamente competitivos a largo plazo. Antes de

profundizar más en la materia es necesario tener en cuenta que actualmente hay varias opciones de cogeneración contempladas e incluso ya en marcha y estas dependen de la tecnología, el tipo de reactores, el tipo de combustible y por supuesto las temperaturas alcanzadas.

A parte de lo anteriormente mencionado, la cogeneración nuclear tiene el beneficio de mejorar la eficiencia de las plantas nucleares de potencia. Algunos análisis de las pruebas que se han hecho con plantas existentes dotadas de reactores de las generaciones II y III muestran que el rendimiento de las plantas y puede ser incrementado cuando estas se configuran en “modo cogeneración”, permitiendo aprovechar el vapor de alta temperatura en aplicaciones industriales que puedan beneficiarse del mismo.

El panorama es aún más alentador cuando se observa que los diseños punteros de reactores de IV Generación fueron concebidos con la cogeneración como parte integral de sus prestaciones.

Es importante tener en cuenta que la cogeneración nuclear tiene más de 30 años de haberse puesto en marcha en algunos lugares con estas tecnologías. Las instalaciones nucleares actualmente desplegadas alcanzan temperaturas de funcionamiento que rondan los 300 °C, mientras que los procesos de calefacción urbana e industrial y desalinización de agua de mar necesitan unos 150 °C. Tal y como están diseñadas, las centrales nucleares convierten actualmente en electricidad un tercio del calor producido, por razones tecnológicas principalmente relacionadas con el rendimiento y las propiedades de los materiales.

El OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) inició los análisis de las tecnologías de cogeneración hacia 1989 y estos no se han detenido, entre otras cosas se ha concluido en algunos casos que cuando el calor se utiliza para la cogeneración, la eficiencia térmica puede mejorar hasta un 80%.

El rango de temperatura de trabajo de la cuarta generación de reactores nucleares, ronda entre los 500 - 800°C, lo que los hace adecuados para diversas opciones de cogeneración que pueden suplir las demandas de vapor de alta temperatura y calor de diversos procesos químicos a escala industrial, especialmente petroquímicos, los cuales son muy altos en emisiones de gases de efecto invernadero.

### ***Cogeneración nuclear para la producción de Hidrógeno: La gran oportunidad para contribuir con la descarbonización del transporte y otros sectores industriales.***

El hidrógeno puede reemplazar a los combustibles fósiles en numerosos sectores y permitir así unas posibles emisiones cero o casi cero en procesos químicos e industriales, en sistemas de energía de bajas emisiones y en el transporte.

Actualmente, el hidrógeno se produce a gran escala mediante reformado de metano con vapor, un proceso con alto consumo energético que emite unos 830 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, el equivalente a la suma de las emisiones de CO<sub>2</sub> del Reino Unido e Indonesia, incluso la IEA (Agencia Internacional de la Energía, 2019), destaca que hay varios métodos que permiten utilizar la energía nuclear, como fuente de electricidad y calor, para producir hidrógeno de manera eficiente y con unas emisiones de CO<sub>2</sub> escasas o nulas.

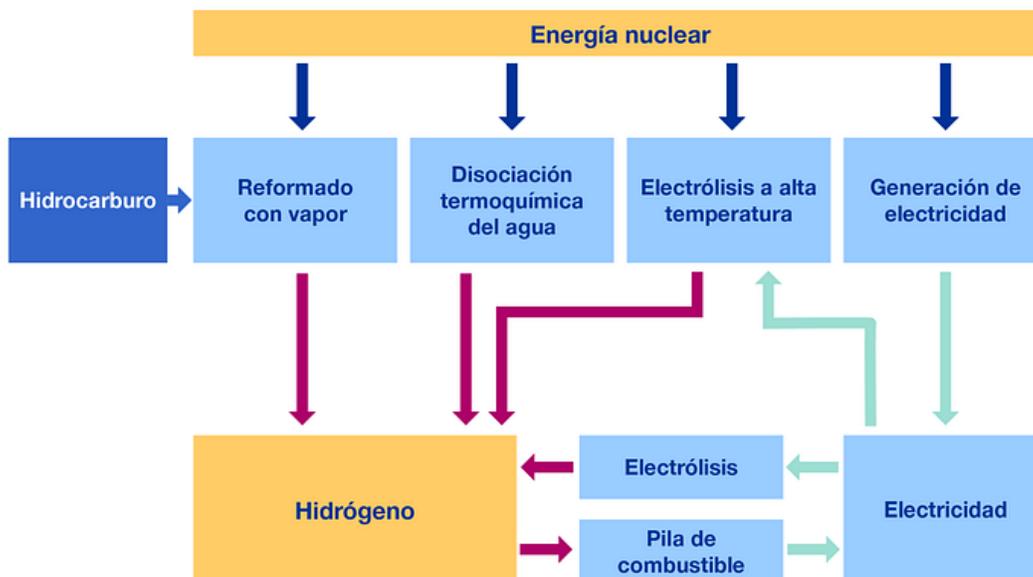


Figura 1: Energía nucleoelectrónica y producción de hidrógeno.  
Fuente: IAEA.

## DESARROLLO

Cuando hablamos de Reactores Nucleares de IV Generación, hacemos referencia a un conjunto de diseños y prototipos de reactores nucleares teóricos y en fase de construcción de los cuales la mayor parte de estos no se espera que estén disponibles para su construcción comercial antes del 2030, esto al menos en occidente, porque China ya parece llevar la delantera en el despliegue de los primeros prototipos y unidades plenamente operativas de esta nueva generación de reactores, de lo cual muy seguramente hablaremos después en otro artículo.

Históricamente, los reactores de cuarta generación son una iniciativa del Foro Internacional Gen IV (GIF). Propuesto por los Estados Unidos a inicios de la década del 2000, este marco de cooperación internacional cuenta con la participación de 13 países entre los que están: Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Francia, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, Rusia, Sudáfrica, Suiza, Reino Unido, así como EURATOM, que representa a los 27 miembros de la Unión Europea.

Hay tres aspectos básicos para tener en cuenta cuando se habla de la IV Generación de Reactores Nucleares:

1. Estas tecnologías surgen para suceder a largo plazo a los actuales reactores, normalmente refrigerados por agua, que se extienden por todo el mundo.
2. Los nuevos reactores están pensados para funcionar a temperaturas más elevadas que la mayoría de los que existen actualmente, lo cual le abre la puerta a una gran cantidad de aplicaciones industriales.

3. Los reactores de IV generación pretenden ampliar el alcance de la energía nuclear, llevar los estándares de seguridad de la industria nuclear al siguiente nivel (teniendo en cuenta que ya de por sí es una de las industrias más seguras del mundo) y permitir una gestión óptima del ciclo del combustible nuclear, facilitando el reciclaje del combustible nuclear gastado y disminuyendo la cantidad y la vida media de los radionucleidos que no se puedan aprovechar en un corto-mediano plazo.

GIF ha propuesto seis tipos de tecnología nuclear de cuarta generación y la mayoría de los países participantes del acuerdo han sellado su compromiso de contribuir activamente en el desarrollo y despliegue de al menos uno de ellos:

- *Reactor Rápido Refrigerado por Plomo (LFR).*
- *Reactor Rápido Enfriado por Gas (GFR).*
- *Reactor de Sales Fundidas (MSR).*
- *Reactor Rápido Refrigerado por Sodio (SFR).*
- *Reactor Refrigerado por Agua Supercrítica (SCWR).*
- *Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR).*

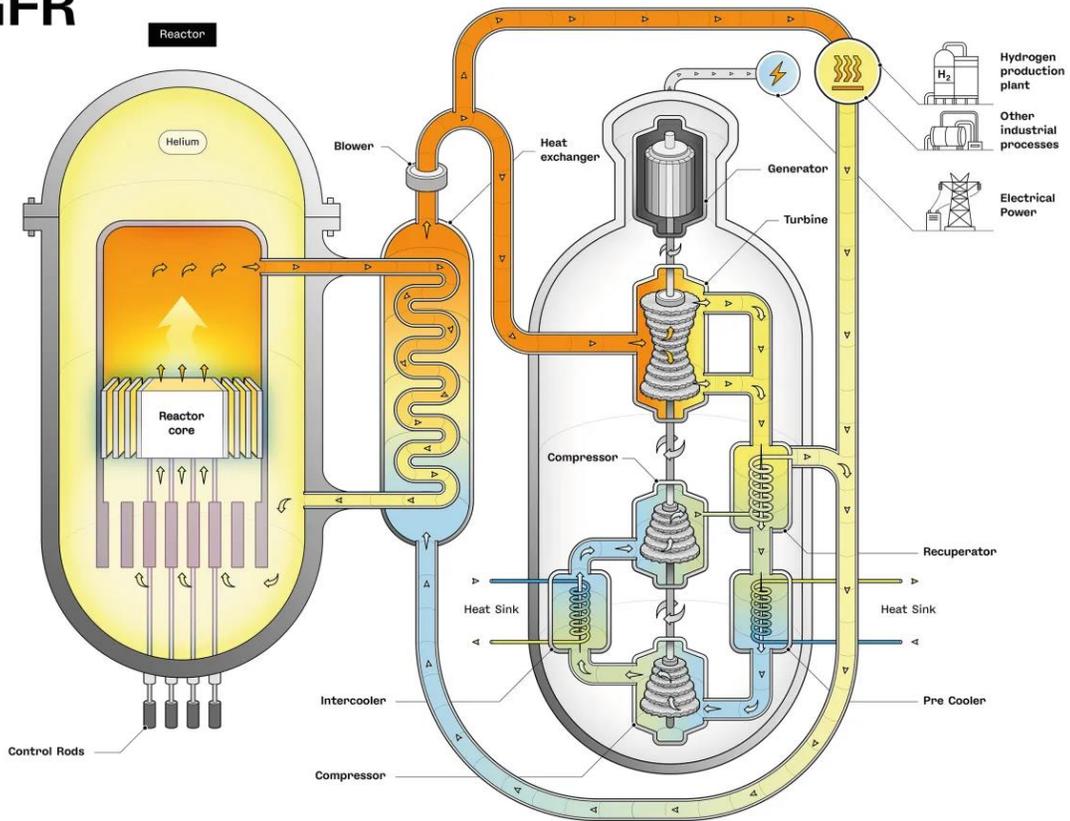
### ***Reactores Rápidos Refrigerados por Gas (GFR)***

El Reactor Rápido Enfriado por Gas (GFR) es un diseño avanzado de reactor nuclear que utiliza un refrigerante gaseoso, típicamente helio, y opera en el espectro de neutrones rápidos. Su refrigerante gaseoso inerte y transparente aporta varias ventajas: ausencia de corrosión a altas temperaturas de operación, un coeficiente de reactividad por vacío muy bajo en caso de pérdida del refrigerante, y facilidad para la inspección visual de los componentes internos.

El uso de gas como refrigerante en los sistemas GFR plantea varios desafíos tecnológicos, como el calentamiento rápido tras la pérdida del refrigerante, lo que dificulta el enfriamiento por conducción típico de los reactores de gas de alta temperatura (HTR), debido a la alta densidad de potencia de los núcleos GFR. La baja densidad del refrigerante gaseoso limita la convección natural para el enfriamiento del núcleo, lo que requiere fuelles de alta potencia a baja presión.

Abordar los efectos de la dosis de neutrones rápidos en el recipiente de presión del reactor es crucial en ausencia de moderación de grafito, elemento esencial en los sistemas HTR. Por lo tanto, el avance de los sistemas GFR requiere investigaciones y desarrollos específicos más allá del trabajo actual y previsto en el sistema VHTR, principalmente en diseño de combustible, diseño del núcleo y enfoques de seguridad. Estos se encuentran entre los objetivos clave establecidos para el Comité de Dirección del Sistema GFR del GIF.

# GFR



## Gas-cooled Fast Reactor

Figura 2. Reactor Rápido Refrigerado por Gas (GFR).  
Fuente: GIF

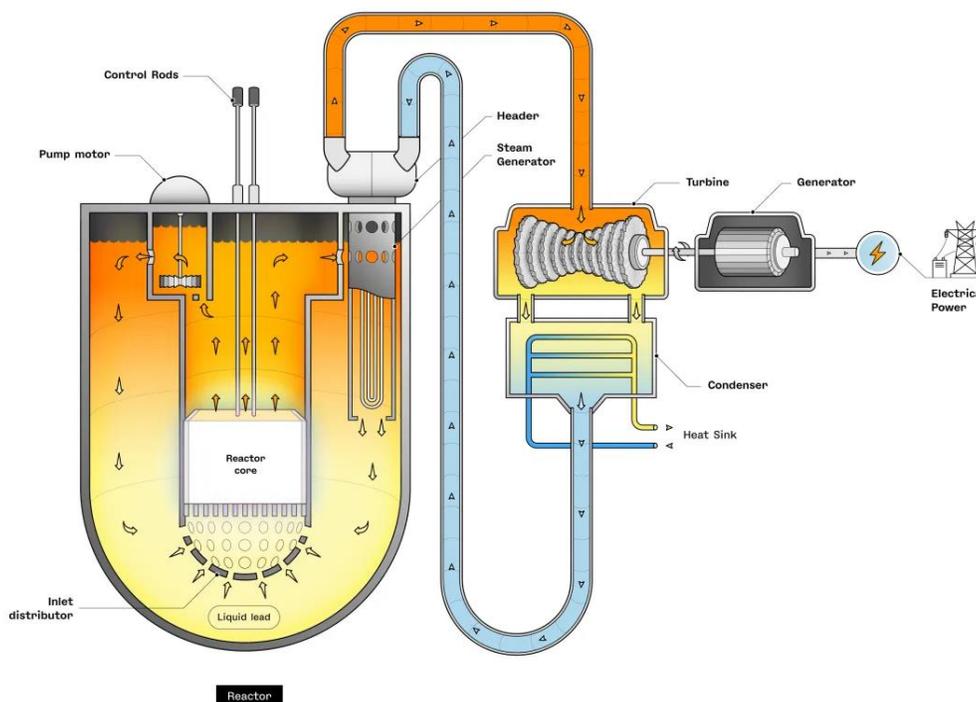
El diseño de referencia del GFR del GIF se basa en un núcleo de 2400 MWt, que satisface los requisitos de reproducción en equilibrio. Fue este requisito de reproducción en equilibrio el que llevó a aumentar la potencia nominal del concepto original de 600 MWt, el cual aún se considera para un reactor modular pequeño enfriado por gas. El concepto de referencia actual involucra un ciclo indirecto con helio en el circuito primario, un ciclo de Brayton en el circuito secundario y un ciclo de vapor en el circuito terciario.

El núcleo consta de un conjunto de elementos combustibles hexagonales, cada uno compuesto por barras de combustible de carburo mixto revestidas de cerámica, contenidas dentro de un tubo hexagonal cerámico. El material preferido actualmente para el revestimiento de las barras y los tubos hexagonales es carburo de silicio reforzado con fibra de carburo de silicio, debido a su mayor resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

### ***Reactores Rápidos Refrigerados por Plomo (LFR)***

Los Reactores Rápidos Refrigerados por Plomo (LFRs, por sus siglas en inglés) son reactores enfriados por plomo líquido (Pb) o, en algunos casos, por una aleación de plomo-bismuto (Pb-Bi), operando en el espectro de neutrones rápidos, a presión atmosférica y alta temperatura. Muchas de las ventajas de los sistemas LFR están relacionadas con la elección de su refrigerante: el plomo tiene un punto de ebullición muy alto (hasta 1743 °C), propiedades neutrónicas y de blindaje contra la radiación favorables, así como una interacción benigna con el agua y el aire.

## **LFR**



**GEN IV** International Forum  
Expertise | Collaboration | Excellence

### **Lead-cooled Fast Reactor**

*Figura 3. Reactor Rápido Refrigerado por Plomo (LFR).*

*Fuente: GIF.*

Como otros diseños de reactores rápidos, el LFR utiliza uranio y plutonio en forma de combustible de óxido mixto (MOX) o nitruro, lo que permite cerrar el ciclo del combustible y quemar actínidos transuránicos, mejorando así la eficiencia en el uso del combustible y ayudando a reducir la cantidad y la actividad de los residuos radiactivos generados durante su operación. Los desafíos relacionados con los materiales, el control químico y el ciclo del combustible del LFR se encuentran entre los puntos clave de enfoque en la cooperación de I+D en curso sobre sistemas LFR.

Según la última actualización del Generation IV Technology Roadmap, el GIF considera tres conceptos de referencia para los LFR, abarcando todo el rango de niveles de potencia, desde pequeños e intermedios hasta grandes tamaños:

1. Sistemas grandes de 600 MWe: como el Reactor Rápido de Plomo Europeo, diseñado para generación de energía en estaciones centrales.
2. Sistemas intermedios de 300 MWe: como el reactor ruso BREST-OD-300.
3. Sistemas pequeños y transportables de entre 10 y 100 MWe: como el reactor autónomo pequeño, seguro y transportable desarrollado en Estados Unidos, que fue diseñado para tener una vida útil del núcleo extremadamente larga.

Se espera que la eficiencia del ciclo secundario de cada sistema LFR sea igual o superior al 42%.

### ***Reactores de Sales Fundidas (MSR)***

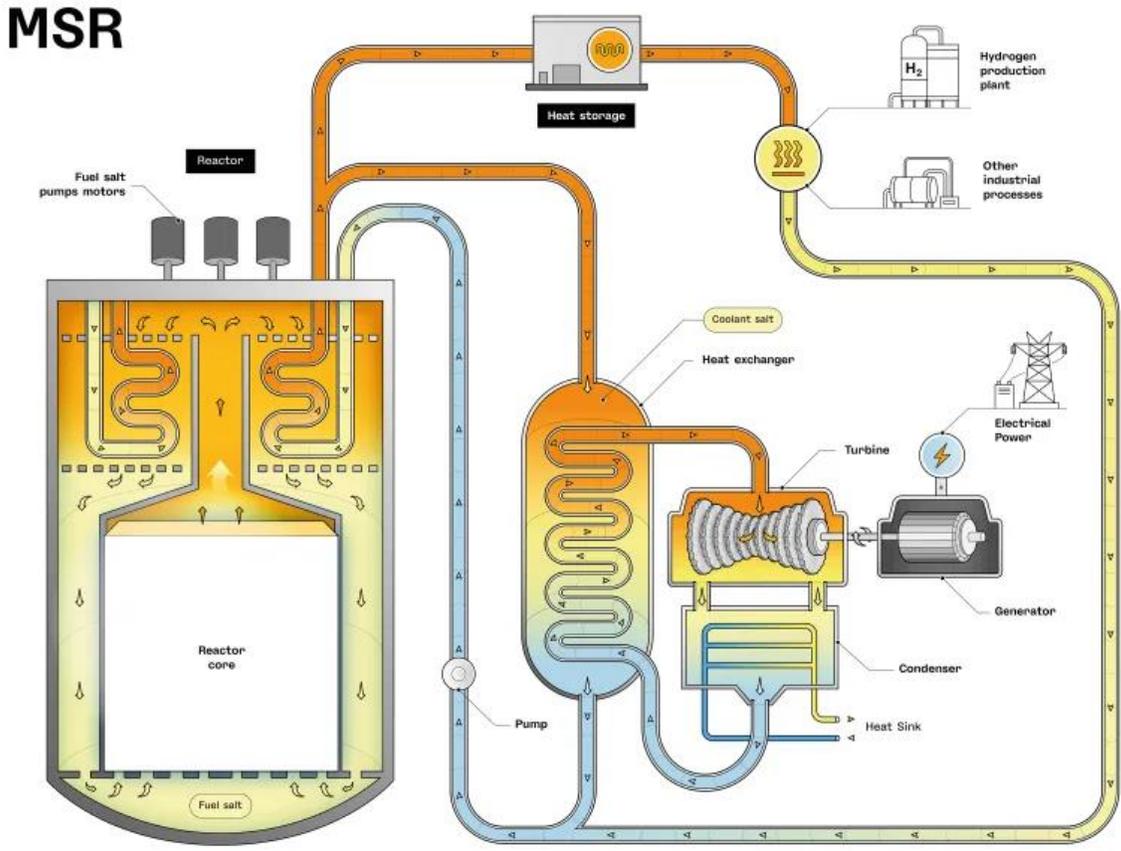
Los Reactores de Sales Fundidas (MSRs, por sus siglas en inglés) son una clase de reactores en los cuales las sales fundidas actúan como combustible del reactor, refrigerante y/o moderador. La investigación sobre los MSRs comenzó en las primeras etapas del desarrollo de la energía nuclear. Estos reactores pueden operar a presiones más bajas (ambientales) y a temperaturas más altas en comparación con los reactores convencionales refrigerados por agua.

Los MSRs abarcan una amplia gama de diseños, con numerosas opciones que se están explorando, lo que dificulta proporcionar una descripción concisa. Actualmente, se están desarrollando varios conceptos de MSRs, muchos de los cuales cuentan con diseños pequeños y modulares en diversas etapas de preparación tecnológica.

Se han propuesto numerosas variantes de diseño, y la clasificación de los diferentes tipos de MSR puede ser compleja. Sin embargo, existen tres categorías principales basadas en el papel de las sales fundidas en el reactor:

- Combustible de sales fundidas — circulación por bombeo
- Combustible de sales fundidas — circulación natural
- Sales fundidas únicamente como refrigerante

Dependiendo de su diseño, los MSRs pueden operar con espectros de neutrones rápidos, térmicos o epitérmicos.



**Molten Salt Reactor**

*Figura 4. Reactor de Sales Fundidas (MSR).  
Fuente: GIF.*

El interés moderno en los MSRs incluye conceptos de reactores alimentados con sales líquidas tanto térmicas como rápidas, como una alternativa a largo plazo para proporcionar energía primaria a gran escala. Los reactores con combustible sólido y refrigerados por sales fundidas también han estado en desarrollo durante las últimas décadas. Actualmente, varios proveedores están desarrollando MSRs tanto de espectro térmico como rápido, con reactores de prueba y comerciales de espectro térmico que se espera sean desplegados en esta década, y el primer reactor de prueba de espectro rápido también anticipado para el mismo periodo.

Algunos diseños cuentan con procesamiento de sal combustible acoplado y localizado en el sitio. Este procesamiento podría permitir la producción de material fisible adicional a partir de componentes fértiles de la sal combustible. La investigación y el desarrollo avanzan hacia la resolución de problemas de viabilidad y la evaluación de la seguridad y el rendimiento de los conceptos de diseño. Los principales desafíos de viabilidad se centran en desarrollar un enfoque de seguridad adaptado y en la creación de materiales estructurales y moderadores de larga duración. Aún queda mucho trabajo por hacer en el procesamiento de sal combustible in situ y, en general, en la tecnología de sales fundidas y el equipo relacionado.

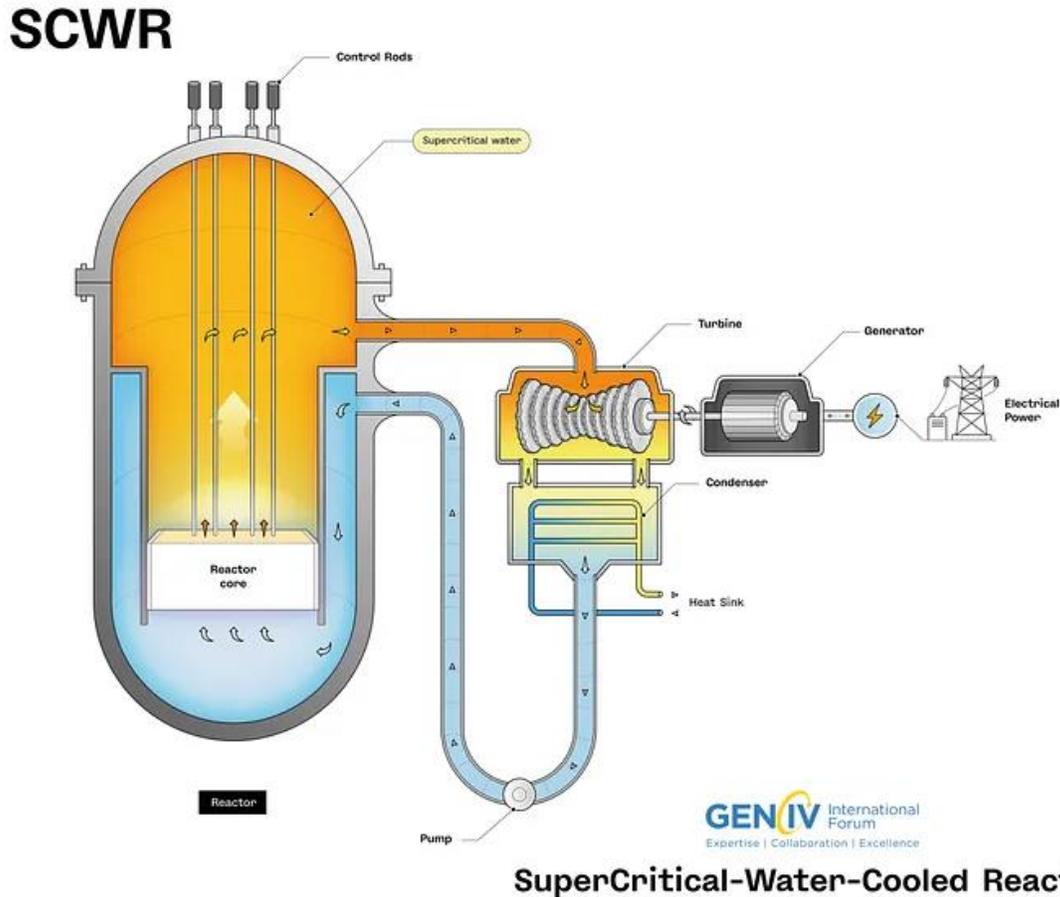
**Reactores Refrigerados por Agua Supercrítica (SCWR)**

Figura 5. Reactor Refrigerado por Agua Super Crítica (SCWR).

Fuente: GIF.

Los reactores enfriados por agua supercrítica (SCWR) son reactores nucleares avanzados que operan a temperaturas y presiones superiores al punto crítico del agua (374°C, 22.1 MPa). Los SCWR pueden presentar espectros neutrónicos térmicos, rápidos o mixtos y están diseñados en dos configuraciones: vasija de presión (similar a los reactores de agua en ebullición [BWR] y reactores de agua a presión [PWR]) y tubos de presión (como los reactores CANDU).

Combinando principios de diseño de reactores enfriados por agua existentes con tecnologías de plantas de combustibles fósiles supercríticas, los SCWR logran eficiencias térmicas superiores, en el rango del 44-48%, representando una mejora significativa en comparación con el 34-36% de los sistemas actuales. Estos reactores ofrecen beneficios económicos debido a su mayor eficiencia y diseños simplificados. Como una evolución de las tecnologías existentes, los SCWR aún no han sido construidos ni puestos en operación.

Los diferentes conceptos de reactores enfriados por agua supercrítica (SCWR) se basan en tecnologías de diseño probadas y en la experiencia operativa acumulada a través del funcionamiento de cientos de reactores enfriados por agua, así como en la experiencia de plantas de combustibles fósiles supercríticas. Los fluidos supercríticos son comunes en la industria energética y han sido utilizados durante más de siete décadas en este sector. La primera caldera supercrítica fue construida en 1960.

La razón para emplear fluidos supercríticos en el sector energético radica en la mejora de la eficiencia termodinámica del sistema, lo que implica producir la misma cantidad de energía con un menor consumo de combustible.

Además, los fluidos supercríticos poseen una característica única: se comportan como un fluido monofásico, lo que permite diseños más simples, como el ciclo termodinámico directo. Varios conceptos de SCWR han optado por este tipo de ciclo.

La selección de un ciclo directo reduce el número de componentes en la planta, lo que a su vez disminuye los costos iniciales de la instalación y potencialmente aumenta la fiabilidad de la planta, ya que no se requieren generadores de vapor ni componentes asociados.

Algunas ventajas clave de esta tecnología incluyen:

- **Practicidad:** El uso de agua supercrítica como refrigerante es un campo maduro en múltiples industrias, especialmente en el sector energético.
- **Base de experiencia:** Los SCWR se benefician de décadas de experiencia acumulada con los reactores enfriados por agua.
- **Mejor economía:** Es posible gracias a diseños más simples, como el ciclo directo.
- **Mayor eficiencia termodinámica:** Los SCWR alcanzan una eficiencia superior en comparación con los reactores nucleares enfriados por agua actuales.

El SCWR es el único reactor enfriado por agua seleccionado por el Generation IV International Forum (GIF). Esta tecnología aprovecha verdaderamente la experiencia de sus predecesores de Generación I, II y III(+), la gran mayoría de los cuales son reactores enfriados por agua. En esencia, el SCWR representa la evolución natural de los reactores enfriados por agua.

### ***Reactores Rápidos Refrigerados por Sodio (SFR)***

El Reactor Rápido Enfriado por Sodio (SFR, por sus siglas en inglés) utiliza sodio líquido como refrigerante y opera dentro del espectro de neutrones rápidos, lo que permite alcanzar una alta densidad de potencia y la ventaja de una operación a baja presión. A pesar de los desafíos continuos en su desarrollo, los SFRs se benefician de la experiencia de más de 20 reactores en todo el mundo, que suman más de 400 años de operación acumulada.

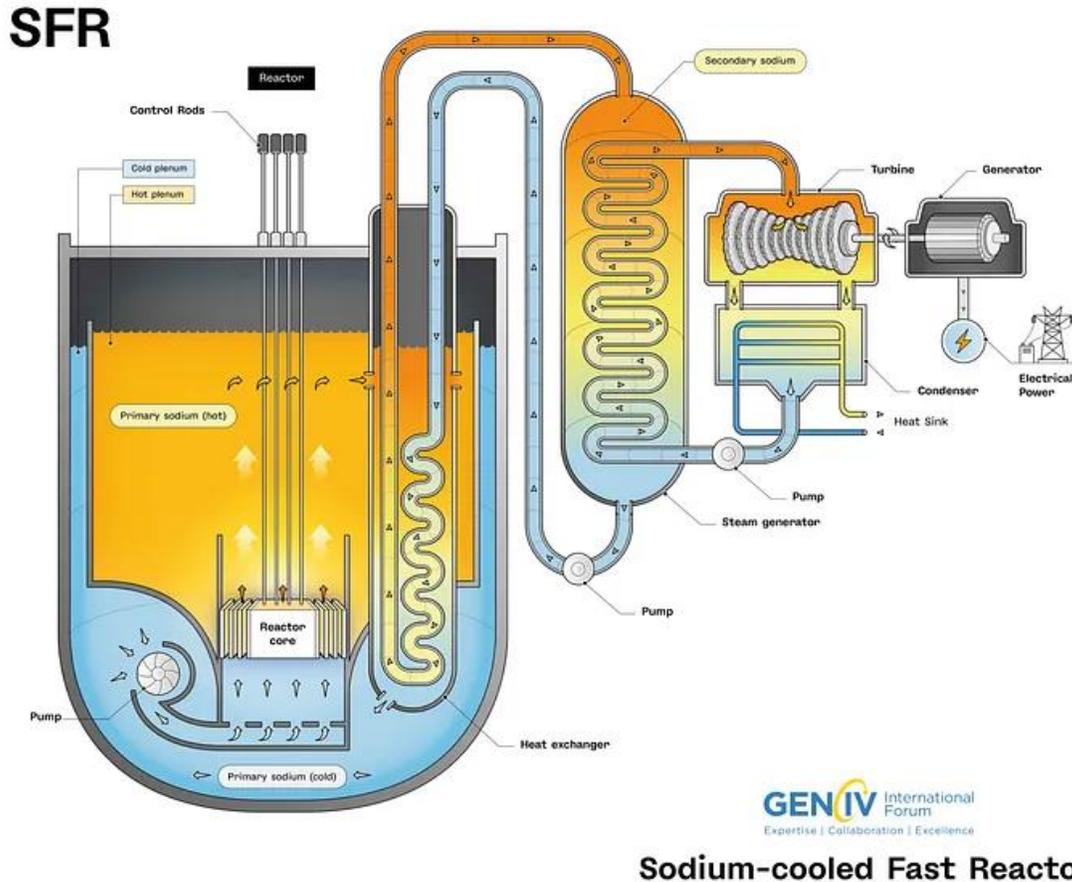


Figura 6. Reactor Rápido Refrigerado por Sodio (SFR).

Fuente: GIF.

Esta amplia experiencia ha mejorado progresivamente la seguridad y confiabilidad de estos reactores. Entre los sistemas de Generación IV, el SFR cuenta con el mayor número de reactores construidos y el historial operativo más completo. Al emplear combustible de óxido mixto de uranio y plutonio (MOX), los SFRs ofrecen la posibilidad de cerrar el ciclo del combustible y quemar actínidos transuránicos, mejorando así la eficiencia en el uso del combustible y reduciendo los residuos radiactivos. Algunos diseños alcanzan razones de reproducción superiores a uno, lo que favorece la sostenibilidad del concepto del reactor. Con temperaturas operativas que oscilan entre 500 y 550°C, los SFRs poseen una mayor eficiencia térmica en comparación con los reactores de agua ligera actuales (LWRs).

El SFR es una fuente de energía atractiva para las naciones que desean maximizar el uso de recursos limitados de combustible nuclear y gestionar los residuos nucleares mediante el cierre del ciclo del combustible.

Además de las ventajas mencionadas anteriormente, el SFR presenta varias ventajas adicionales, tales como:

- Flexibilidad en sus modos de operación (“transmutador”, “convertidor” y “reproductor”).
- Diseños de núcleo compacto debido a su alta densidad de potencia.
- Diseños con circulación natural, capaces de eliminar el calor de decaimiento del núcleo sin depender de equipos dinámicos como bombas, especialmente en caso de un evento de pérdida total de suministro eléctrico (station blackout).
- Un entorno libre de oxígeno que previene la corrosión.

Aunque aspectos importantes de estas ventajas ya han sido explorados y mejorados a través de los reactores SFR que han estado operando durante largos períodos, el SFR enfrenta varios desafíos, tales como:

- Establecimiento de tecnologías para el manejo del sodio, el cual es químicamente reactivo con el aire y el agua, y no es transparente.
- Desarrollo adicional de enfoques de seguridad pasiva.
- Desarrollo de combustibles de alto rendimiento y sus tecnologías de reciclaje.
- Mejora del costo unitario de generación de energía.

En el marco del Foro Internacional de Generación IV (GIF, por sus siglas en inglés), se han organizado y llevado a cabo proyectos internacionales de I+D relacionados con los SFR, denominados “Combustible Avanzado (AF)”, “Integración y Evaluación del Sistema (SIA)”, “Diseño de Componentes y Balance de Planta (CD&BOP)” y “Seguridad y Operación (SO)”, con el fin de cumplir de manera efectiva los objetivos de los sistemas de Generación IV.

### ***Reactores de Muy Alta Temperatura (VHTR)***

El Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR, por sus siglas en inglés), está diseñado para la cogeneración de electricidad y calor. Su alta temperatura de salida lo hace ideal para la producción de hidrógeno y su aplicación en las industrias química, petrolera y siderúrgica. Basado en la experiencia operativa de reactores refrigerados por gas, ya sea en operación o pasados, en cinco países, el VHTR incorpora combustible TRI-structural ISOtropic (TRISO), refrigerante de helio y una baja densidad de potencia, lo que facilita la remoción pasiva del calor de desintegración.

Si bien el enfoque original del VHTR se centraba en alcanzar temperaturas de salida muy altas para la producción de hidrógeno, investigaciones y evaluaciones de mercado indican que temperaturas de salida moderadas (700–850°C) son suficientes y permiten reducir los desafíos técnicos asociados con su implementación. Además, el VHTR ofrece seguridad inherente, alta eficiencia térmica, capacidad de suministro de calor de proceso, bajos costos operativos y construcción modular.

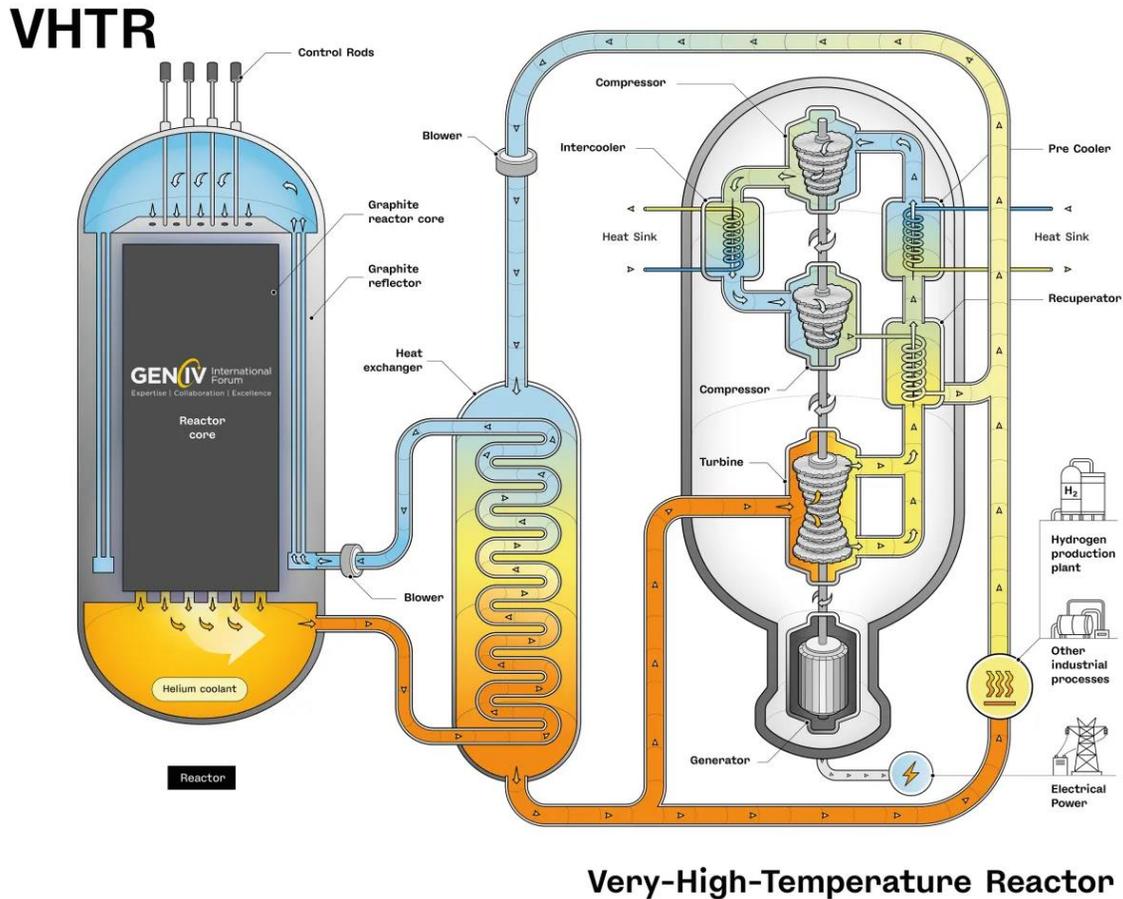


Figura 7. Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR).  
Fuente: GIF.

La tecnología VHTR se beneficia de la experiencia operativa acumulada en 40 reactores refrigerados por gas (GCRs, muchos de ellos enfriados por CO<sub>2</sub>) y 7 reactores de gas de alta temperatura (HTGRs, enfriados por He) en cinco países.

Se trata de reactores moderados por grafito, refrigerados por helio y con un espectro de neutrones térmicos. Pueden suministrar calor nuclear y electricidad en un rango de temperaturas de salida del núcleo de entre 700 y 950°C, con la posibilidad de superar los 1,000°C en el futuro.

Los elementos base del combustible del VHTR son las partículas TRISO, cada una con un diámetro inferior a un milímetro. Estas partículas contienen un núcleo de material fisible rodeado por capas de carbono y carburo de silicio, lo que proporciona un confinamiento estable de los productos de fisión a temperaturas de 1600°C o superiores. Estas partículas pueden integrarse en cilindros compactos dentro de bloques hexagonales de grafito (núcleo tipo prismatic-block) o encapsularse en carburo de silicio dentro de esferas de grafito de aproximadamente 60 mm de diámetro (núcleo tipo pebble-bed).

Aunque las formas de los compuestos de combustible en estas dos configuraciones son diferentes, ambas comparten la misma base técnica: partículas de combustible TRISO recubiertas en una matriz de grafito, una estructura del núcleo completamente cerámica (grafito), refrigerante de helio y baja densidad de potencia. Estas características permiten alcanzar altas temperaturas de salida y garantizar la retención de los productos de fisión dentro de la partícula recubierta tanto en condiciones normales de operación como en situaciones accidentales.

Como se mencionó anteriormente, para permitir la eliminación pasiva del calor de desintegración, cada opción de núcleo debe mantenerse por debajo de los siguientes límites de potencia:

- Inferior a 625 MWt para el núcleo tipo prismatic-block
- Inferior a 250 MWt para el núcleo tipo pebble-bed
- Un VHTR puede diseñarse para utilizar ciclos de combustible alternativos y simbióticos, como U-Pu, MOX o Th-U.

Para la generación de electricidad, se puede emplear un ciclo directo con una turbina de gas de helio ubicada directamente en el circuito primario de refrigerante o, en el extremo inferior del rango de temperatura de salida, un ciclo indirecto con un generador de vapor y un ciclo Rankine convencional. En la actualidad, el ciclo de conversión de energía Brayton directo está siendo menos priorizado en favor del ciclo Rankine indirecto, debido a su menor riesgo tecnológico y a su mayor flexibilidad en términos de fluido de trabajo y aplicaciones del reactor (electricidad, calor de proceso y cogeneración).

Para cogeneración nuclear, como el suministro de calor de proceso para refinerías, petroquímica, metalurgia y producción de hidrógeno, el proceso de aplicación del calor se acopla generalmente al reactor a través de un intercambiador de calor intermedio (IHX, por sus siglas en inglés), en lo que comúnmente se denomina un ciclo indirecto.

## CONCLUSIONES

Uno de los aportes más importantes de la nueva generación de reactores es su potencial para descarbonizar sectores industriales que actualmente dependen de combustibles fósiles para obtener calor. Industrias como la petroquímica, la metalurgia, la producción de fertilizantes (amoníaco) o la fabricación de hidrógeno requieren temperaturas elevadas y un suministro energético constante.

Los reactores nucleares tradicionales (Generación II/III) ya han demostrado que pueden destinar parte de su calor a usos no eléctricos, como los llamados distritos de calefacción industrial o la desalinización de agua, dado que operan en un rango de temperatura (~300 °C) suficiente para cubrir necesidades típicas de ~150 °C en esos procesos. De hecho, la cogeneración nuclear no es un concepto nuevo: desde finales del siglo XX se han implementado esquemas de este tipo en algunas plantas, por ejemplo, aprovechando el calor residual de reactores convencionales para calefacción urbana.

La IV generación de reactores nucleares lleva este potencial de cogeneración mucho más lejos. Al operar a temperaturas significativamente mayores (en algunos diseños 500 - 1,000 °C), los nuevos reactores pueden suministrar calor de alta entalpía adecuado para procesos industriales pesados que hoy son difíciles de electrificar. Los diseños Gen IV, como los reactores rápidos enfriados por metales líquidos, los reactores de gas de alta temperatura o los reactores enfriados por agua supercrítica, alcanzan temperaturas entre 500 y 800 °C, ideales para generar vapor industrial y calor de proceso en refinerías, plantas petroquímicas, fabricación de acero, producción de etileno, cemento, celulosa, entre otros. A su vez, ciertos diseños pueden operar en el extremo superior de temperatura: por ejemplo, los reactores SCWR (~625 °C), GFR (~850 °C) o MSR (750-1,000 °C) permiten abordar aplicaciones exigentes como la producción masiva de hidrógeno, generación de syngas, procesos termoquímicos avanzados y producción eficiente de amoníaco sin emisiones.

El impacto en la descarbonización sería significativo. Estas fuentes nucleares de alta temperatura podrían reemplazar calderas de gas o carbón en fábricas y plantas químicas, eliminando emisiones directas de CO<sub>2</sub>. Además, al integrar la producción de hidrógeno rosa o nuclear en la ecuación, se posibilita descarbonizar sectores como el transporte (por medio de combustibles sintéticos o celdas de combustible) y la industria pesada, donde el hidrógeno se perfila como insumo clave para alcanzar emisiones netas cero.

Otro beneficio por destacar es la mejora en eficiencia energética. En una planta nuclear dedicada solo a producir electricidad, aproximadamente dos tercios del calor generado se desechan (principalmente a través de torres de enfriamiento) debido a las limitaciones termodinámicas de las turbinas convencionales. Si ese calor sobrante se aprovecha en procesos industriales, la eficiencia global de la planta se dispara. Estudios auspiciados por el OIEA concluyen que, configurando las centrales en modo cogeneración, la eficiencia térmica total del sistema podría incrementarse hasta ~80% – muy por encima del ~33% típico de solo generar electricidad.

Los reactores nucleares de IV Generación, junto con la cogeneración nuclear, se perfilan como aliados cruciales en la lucha contra el cambio climático. Su capacidad para proveer energía confiable y libre de carbono, tanto en forma de electricidad como de calor de proceso, los convierte en piezas fundamentales para descarbonizar sectores difíciles de electrificar.

Aún existen retos por superar: certificación de nuevos combustibles, validación de materiales, pruebas de seguridad pasiva y despliegue económico. Sin embargo, los avances actuales muestran que esta visión es tangible y realizable.

En un futuro energético equilibrado, es probable que las fuentes renovables convivan con reactores modulares avanzados, permitiendo el despliegue de fuentes de energía bajas en emisiones, flexibles y continuas. Con electricidad 24/7, fuentes de calor de alta temperatura y un ciclo de combustible cerrado, los reactores de IV Generación pueden hacer realidad una industria sin emisiones y una verdadera transición energética sostenible.

## REFERENCIAS

- [1]. ECC-SMART. (2025). *Development of Small Modular Reactor Technology*. <https://ecc-smart.eu/about/>

- [2]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/gas-cooled-fast-reactor-gfr>
- [3]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Lead Fast Reactors (LFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/lead-fast-reactors-lfr>
- [4]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Molten Salt Reactors (MSR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr>
- [5]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Sodium Fast Reactor (SFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/sodium-fast-reactor-sfr>
- [6]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Super-Critical Water Reactors (SCWR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/super-critical-water-reactors-scwr>
- [7]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Very High Temperature Reactor (VHTR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/very-high-temperature-reactor-vhtr>
- [8]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *What is Generation IV?*. <https://www.gen-4.org/>
- [9]. IEA – International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [10]. Jóvenes Nucleares. (2022). *Seminario de Reactores Avanzados [Lista de reproducción]*. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLXOkRmTvdrUCxYTTemM1DQkZRKBKfTyt0>
- [11]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Aplicaciones industriales y cogeneración nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/industrial-applications-and-nuclear-cogeneration>
- [12]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Desalinización nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-desalination>
- [13]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Hidrógeno nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-hydrogen-production>
- [14]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *¿Qué son los pequeños reactores modulares (SMR)?* <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- [15]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Pequeños reactores modulares (SMR)*. <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-modulares-pequenos>
- [16]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Reactores refrigerados por gas*. <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-refrigerados-por-gas>
- [17]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications>