

# CAPÍTULO I

## EL REACTOR NUCLEAR MODULAR DE HELIO CON TURBINA DE GAS

En este capítulo se presentará un resumen de los conceptos básicos de la energía nuclear y de los distintos tipos de reactores nucleares más utilizados para la producción de energía. Posteriormente se describirá el reactor nuclear modular de helio con turbina de gas (GT-MHR).

### 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ENERGÍA NUCLEAR

Para comprender mejor el concepto de un reactor nuclear es necesario saber que la energía nuclear es la energía liberada de las reacciones nucleares, las cuales son:

- a) Desintegración radioactiva
- b) Fisión nuclear
- c) Fusión nuclear.

A continuación se explica brevemente cada una de estas 3 reacciones nucleares:

La desintegración nuclear o decaimiento radioactivo es el proceso mediante el cual un núcleo atómico emite partículas espontáneamente debido a que posee una combinación de protones y neutrones que no conducen a una configuración estable. Así los núcleos liberan energía y pasan a estados más estables, es decir, hacia estados de energía menor, transmutándose espontáneamente en otros núcleos y emitiendo partículas alfa, beta y gamma.

La fisión nuclear es un fenómeno que ocurre cuando un núcleo captura un neutrón y pasa a un estado inestable donde se produce la ruptura del núcleo en dos fragmentos. En los reactores nucleares y en laboratorios se consigue al bombardear núcleos pesados, como el uranio 235 (U-235) o plutonio 239 (Pu-239) con neutrones. Si un núcleo captura uno de estos neutrones, el núcleo se vuelve inestable, fisionándose en dos núcleos más ligeros y algunos neutrones (ver Figura 1.1). La suma de las masas de los productos de la fisión es menor a la masa del núcleo original. La masa faltante se convierte en energía de acuerdo a la ecuación  $E= mc^2$ .

En el proceso de fisión del U-235 por cada núcleo fisionado se libera una cantidad de energía del orden de 200 MeV [1]. La fisión nuclear es una reacción que en la actualidad puede controlarse.

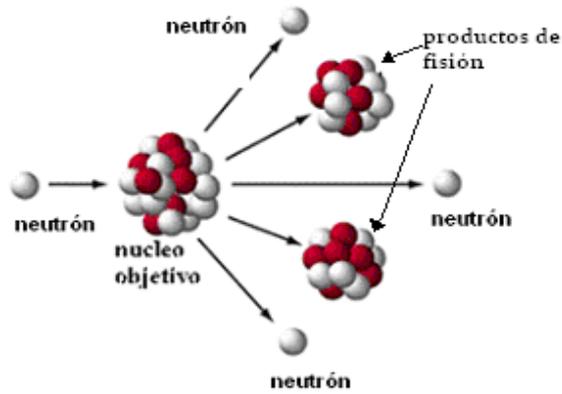


Figura 1.1. Reacción de fisión nuclear. [1]

En la reacción en cadena los neutrones liberados de la fisión pueden provocar nuevas fisiones que liberarán otros neutrones, y así sucesivamente (ver Figura 1.2). Cuando se logra mantener constante el número de fisiones se dice que la reacción está auto sostenida o controlada.

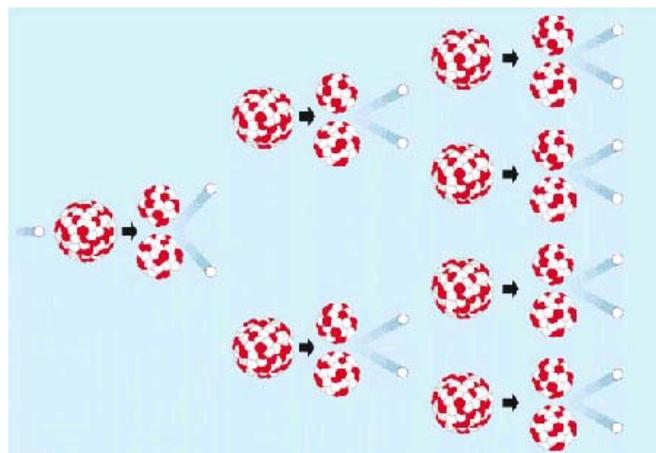


Figura 1.2. Esquema de una reacción en cadena. [1]

En cuanto a la fusión nuclear, ocurre cuando dos núcleos de átomos ligeros, generalmente hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se unen para formar otro núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía (ver Figura 1.3).

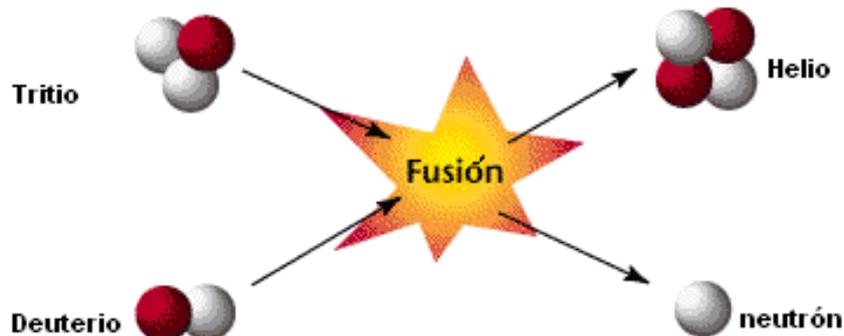


Figura 1.3. Reacción de fusión nuclear. [1]

La fusión nuclear es producida en las estrellas, aún no se ha logrado utilizar la fusión como medio rentable de obtención de energía, es decir, en la actualidad la energía aplicada al proceso es mayor que la obtenida por la fusión.

## 1.2 EL REACTOR NUCLEAR

Un reactor nuclear es una instalación física donde se produce, mantiene y controla una reacción nuclear en cadena. Actualmente sólo producen energía de forma comercial los reactores nucleares de fisión y los más comunes en el mundo son:

**Reactores de Investigación.** Utilizan los neutrones generados en la fisión para producir radioisótopos o bien para realizar diversos estudios, como por ejemplo, estudio de materiales.

**Los Reactores de Potencia.** Estos reactores utilizan el calor generado en la fisión para producir energía eléctrica, para desalinización de agua de mar, y en un futuro se espera que puedan producir hidrógeno.

### 1.2.1 Elementos de los reactores nucleares

Un reactor nuclear de fisión está compuesto principalmente por los siguientes elementos:

**Combustible.-** Suele estar en forma sólida, aunque varía, como el dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido, uranio en tubos de aleación de magnesio, plutonio-239, torio-232, o mezclas de éstos (MOX, mezcla de óxidos de uranio y plutonio), o dióxido de uranio enriquecido o natural en tubos de aleación de zirconio, todo depende del tipo del reactor.

El uranio natural contiene 0.72% de uranio 235 que se puede fisiónar y 99.28% de uranio 238, el cual no se fisiona [2]. Al uranio enriquecido, se le eleva artificialmente la concentración del uranio 235 de 3 a 5%, disminuyéndose la del uranio 238 al 97% y 95% respectivamente [2].

**Moderador.-** Disminuye la velocidad de los neutrones producidos en la fisión, de modo que aumente la probabilidad de que sean absorbidos por otro átomo fisible para producir fisión, y no se termine la reacción en cadena. Entre los moderadores más utilizados están el agua ligera, el agua pesada y el grafito.

**Refrigerante.-** Conduce el calor generado por el combustible para ser aprovechado posteriormente en una turbina, en la mayoría de las veces. El refrigerante debe ser anticorrosivo, tener una gran capacidad calorífica y no debe absorber los neutrones. Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio; líquidos como el agua ligera y el agua pesada, y metales líquidos como el sodio.

**Material de control.-** Mantienen la intensidad de la reacción en cadena que ocurre en el interior del reactor dentro de los límites deseados y de conformidad con la cantidad de energía térmica que se quiera producir. Generalmente se usan en forma de barras o bien disueltas en el refrigerante. El interior de las barras de control se encuentra lleno de una sustancia que como el cadmio o el boro, tienen la propiedad de capturar neutrones y debido a esto la función de control se establece. Si se desea disminuir la intensidad de la reacción nuclear que ocurre dentro del reactor, basta con insertar las barras de control entre los ensambles de combustible del núcleo, en la medida de la disminución deseada.

**Reflector.-** Reduce la fuga de neutrones, aumentando así la eficiencia del reactor. El medio reflector que rodea al núcleo debe tener una baja sección eficaz de captura, los reflectores más usados son: agua ligera, agua pesada, grafito, uranio natural.

**Blindaje.-** Evita la fuga de radiación gamma y neutrones rápidos. Los materiales más usados para construir este blindaje son el concreto, el agua y el plomo.

## 1.2.2 Tipos de reactores nucleares

Las diversas combinaciones de combustible, moderador y refrigerante configuran los diferentes tipos de reactores nucleares existentes. Los principales tipos de reactores nucleares que actualmente están en operación comercial en el mundo son los siguientes:

**-Reactores de Agua Ligera LWR (Light Water Reactors).** Utilizan como refrigerante y moderador el agua ligera. Como combustible uranio enriquecido. Los más utilizados son los BWR (Boiling Water Reactor o Reactores de Agua Ligera en Ebullición) y los PWR (Pressurized Water Reactor o Reactores de Agua Ligera a Presión).

**-Reactores de Agua Pesada a Presión PHWR o CANDU (Pressurized Heavy Water Reactor o Canada Deuterium Uranium).** Utilizan como moderador agua pesada (compuesta por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno) y como refrigerante agua ligera. Como combustible utilizan uranio natural, y actualmente ligeramente enriquecido.

**-Reactores Enfriados por Bióxido de Carbono y Moderados por Grafito GCR (Gas Cooled Reactor).** Estos reactores ocuparon un lugar muy importante en las primeras etapas de desarrollo de la industria nucleoelectrónica, su popularidad ha disminuido sensiblemente con el paso del tiempo debido principalmente a razones económicas. A diferencia de los anteriores, este reactor no utiliza agua ligera como refrigerante sino bióxido de carbono; emplea grafito como moderador y uranio natural en forma metálica como combustible.

**-Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny RBMK (Gran Reactor Canalizado de Alta Potencia).** Su principal función es la producción de plutonio, y como subproducto genera electricidad. Utiliza grafito como moderador y agua como refrigerante. Como

combustible utiliza uranio muy poco enriquecido. Puede recargarse en marcha. Tiene un coeficiente de reactividad positivo.

**-Reactores Rápidos Cría FBR (Fast Breeder Reactors).** Utilizan neutrones rápidos (de alta energía) en lugar de térmicos para la consecución de la fisión. Como combustible utiliza plutonio y como refrigerante sodio líquido. Este reactor no necesita moderador.

**-Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor).** Puede utilizar neutrones rápidos y neutrones térmicos. Como refrigerante utiliza helio, y como moderador grafito, en el caso de utilizar neutrones térmicos.

**-Reactores Rápidos de Cría Enfriados por Sodio LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor).** Este reactor funciona con neutrones rápidos, teniendo la particularidad de producir más combustible que el que consume en su operación. Este reactor utiliza combustible enriquecido en más del 20%, ya sea con uranio 235 o plutonio 239 y sodio líquido como refrigerante [2]. Su peculiaridad es que el núcleo se rodea con un manto de uranio natural o empobrecido, que al absorber neutrones poco moderados, se transforma en plutonio y de esta manera cría nuevo combustible.

### 1.3 REACTORES NUCLEARES AVANZADOS

Los diseños de reactores avanzados incorporan mejoras de la seguridad en cuanto a una mayor protección ante la emisión de radiación al medio ambiente y en cuanto a la seguridad pasiva, basada en fuerzas naturales como la convección y la gravedad que permite reducir la dependencia de sistemas y componentes activos, tales como bombas y válvulas.

Actualmente, se desarrollan 3 tipos básicos de diseños avanzados:

- Reactores refrigerados por agua.
- Reactores refrigerados por gas.
- Reactores rápidos. [3]

Ante la imposibilidad de estudiar todos los reactores, este trabajo de tesis se concentra en estudiar el reactor GT-MHR, el cual es un modelo basado en el reactor de muy alta temperatura refrigerado por gas VHTR (Very-High-Temperature Reactor), mismo que presenta el concepto más viable para ser implantado tecnológicamente en el corto plazo, debido a que se basa en los actuales reactores de gas de alta temperatura HTGR.

A continuación se describirá brevemente el reactor HTGR avanzado o también llamado VHTR.

## 1.4 EL REACTOR DE ALTA TEMPERATURA REFRIGERADO POR GAS (HTGR - High Temperature Gas Reactor)

Actualmente existen dos reactores HTGR de investigación: en Japón y China; y dos diseños de centrales eléctricas se están llevando a cabo como proyectos de desarrollo internacional, así como otros diseños están en estudio [4].

El nuevo interés se basa principalmente en conceptos de diseños que utilicen tecnología de seguridad inherente para asegurar la retención de los productos de fisión radiactivos por medios pasivos.

Los reactores HTGR usan gas helio como refrigerante, alcanzan altas temperaturas dentro del reactor, hasta 950 °C [5]. Estas temperaturas permiten que el reactor sea usado como una fuente de calor industrial, además de generar electricidad mediante el ciclo Brayton con una eficiencia térmica cercana al 50% [6].

El desarrollo tecnológico en la última década hace que los reactores HTGR sean más prácticos que en el pasado, aunque el ciclo directo significa que deba existir una alta integridad del combustible y los componentes del reactor [7]. En la Figura 1.4 se muestra de la estructura general del reactor HTGR.

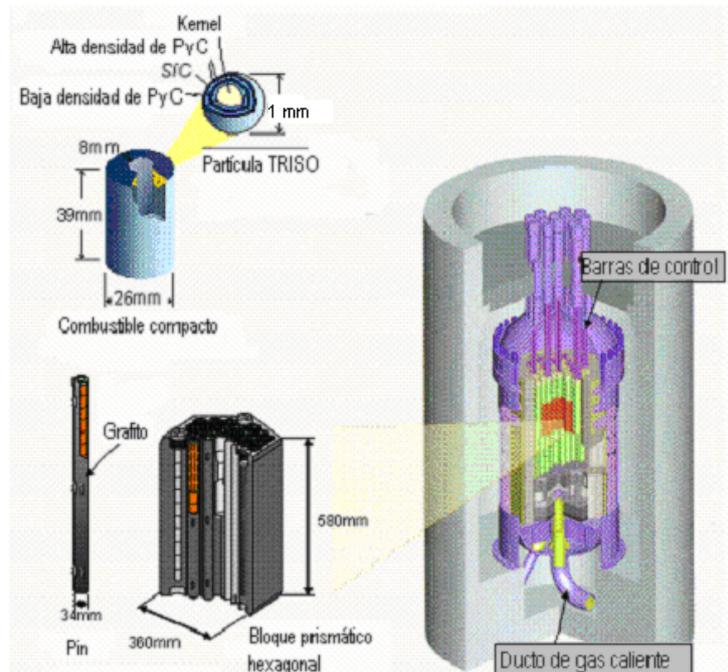


Figura 1.4. Estructura del reactor HTGR. [8]

El combustible para estos reactores se encuentra en forma de partículas esféricas llamadas TRISO (dióxido de uranio enriquecido encapsulado en esferas de grafito) con menos de un milímetro de diámetro. Cada partícula tiene un núcleo de óxido o de carburo de uranio, con uranio enriquecido hasta el 17% de U-235, aunque normalmente

menos. Este es rodeado por capas de carbono y silicio, dando una retención a los productos de fisión, los cuales se mantienen estables hasta una temperatura de 1600 [°C] o más [5] (ver Figura 1.5).

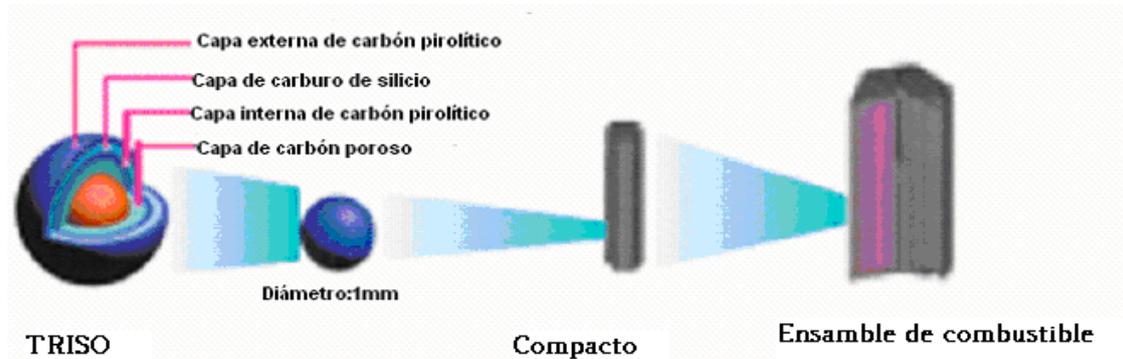


Figura 1.5. Combustible HTGR. [9]

Otros aspectos característicos de los HTGR relacionados con la modelación neutrónica son los siguientes:

- El uso de gas helio como refrigerante produce fracciones de vacío importantes en el núcleo del reactor y por lo tanto se presenta un efecto considerable de desplazamiento de los neutrones.
- Debido al uso del grafito como moderador, una gran parte del espectro neutrónico es epitérmico, por lo tanto las deficiencias de los modelos clásicos del tratamiento del efecto de autoblandaje de las resonancias, pueden ser amplificadas [10].
- Comparado con las barras tradicionales de combustible con encamisado, el combustible de micro-partículas de los HTGR puede alcanzar quemados muy altos, por lo que las incertidumbres de los cálculos de quemado del combustible deben estudiarse.
- Los reactores HTGR pueden utilizar diversos ciclos de combustible [11], por medio de diferentes parámetros físicos, tales como diferentes cargas de combustible (fracción en volumen de las partículas en el grafito), el tipo de combustible, venenos quemables, relación de partículas físi les/fértiles, etc. Las diversas configuraciones del núcleo obtenidas son con frecuencia altamente heterogéneas, con importantes variaciones del espectro neutrónico dependientes del espacio.

Además de los aspectos antes mencionados, para los reactores HTGR se están estudiando nuevas configuraciones del núcleo y nuevos tipos de combustible para los cuales hay que desarrollar nuevos modelos. Se pueden mencionar los siguientes:

- Geometría anular del núcleo.
- Tipo de combustible: quemado de plutonio y actínidos menores, estrategia de minimización de desechos [10].
- Ultra-alto quemado del combustible, hasta más de 700 GWd/t. (En los reactores actuales, segunda y tercera generación, se obtienen quemados diez veces menores).

### **1.4.1 TIPOS DE REACTORES HTGR**

Existen dos variantes del reactor HTGR, ambas refrigeradas por helio y con combustible de uranio-grafito.

- PBMR, donde las partículas son colocadas en forma de cama de esferas (Pebble Bed Modular Reactor).
- El GT-MHR, donde las partículas son colocadas en bloques prismáticos hexagonales de grafito (Gas Turbine – Modular Helium Reactor).

### **1.5 El Reactor PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)**

El PBMR es un reactor de alta temperatura HTGR, moderado por grafito y enfriado por helio. Posee un sistema de conversión de potencia de turbina de gas y ciclo cerrado. Está compuesto esencialmente por una vasija de acero que contiene como combustible las partículas TRISO anteriormente descritas. Las partículas son encerradas en grafito para formar una esfera de combustible del tamaño aproximado de una bola de billar (60 mm de diámetro), el núcleo del reactor contiene aproximadamente 360,000 de estas esferas [12].

El calor es convertido en electricidad a través de una turbina. La planta comprende en un módulo con la unidad de la vasija de presión del reactor y a la unidad de conversión de potencia.

La vasija de presión vertical de acero tiene 6.2 metros de diámetro y 27 metros de alto, rodeada de una capa gruesa de grafito que sirve como reflector externo y un medio pasivo de transferencia de calor. La capa de grafito es perforada con hoyos verticales para alojar los elementos de control. El helio es usado como el refrigerante y medio de transferencia de energía para conducir a una turbina de gas de ciclo cerrado y un sistema generador. La geometría de la región de combustible es anular y se localiza alrededor de la columna central de grafito. Esto último sirve como un reflector nuclear adicional.

El núcleo del reactor posee el combustible TRISO, el cual está localizado en el espacio entre los reflectores de grafito central y externo. Las perforaciones verticales en estos reflectores son previstas para los elementos de control de reactividad. Dos sistemas de control de reactividad son previstos para apagar el reactor. Uno de estos sistemas tiene 24 barras de control en el reflector externo, mientras que el otro consiste de pequeñas esferas de absorción que son vertidas en las 8 perforaciones del reflector central.

### 1.5.1 Operación del PBMR

El ciclo termodinámico utilizado es un ciclo Brayton con un pre-enfriador y enfriador medio refrigerado por agua (ver Figura 1.6). Para remover el calor generado por la reacción nuclear, el refrigerante de helio entra en la vasija del reactor a una temperatura de 500° C y una presión de 9 MPa. El gas descende entre las esferas de combustible caliente, saliendo por el fondo de la vasija a una temperatura de 900°C. Posteriormente el gas caliente entra en la turbina que está conectada mecánicamente a un generador a través de una caja de cambios de reducción de velocidad en un lado y a los compresores de gas por el otro lado. El líquido refrigerante sale de la turbina con alrededor de 500°C y 2.6 MPa. Un recuperador de alta eficiencia es utilizado después de la turbina de potencia. El helio, que es enfriado en el recuperador, pasa a través del pre-enfriador, el compresor de baja presión, el enfriador intermedio y el compresor de alta presión antes de ser retornado a través del recuperador y seguidamente vuelto a la vasija del reactor.

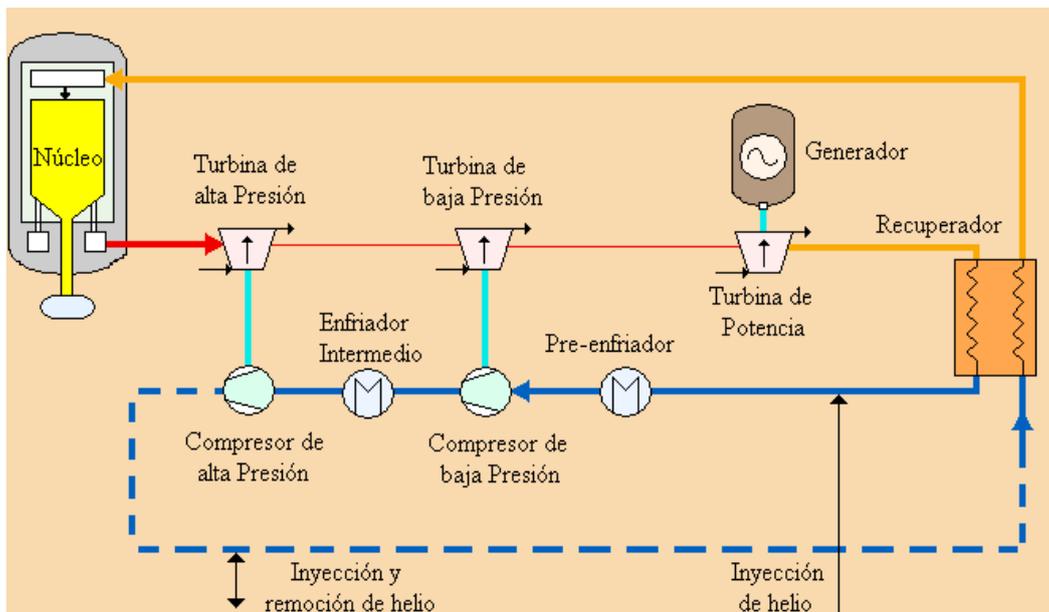
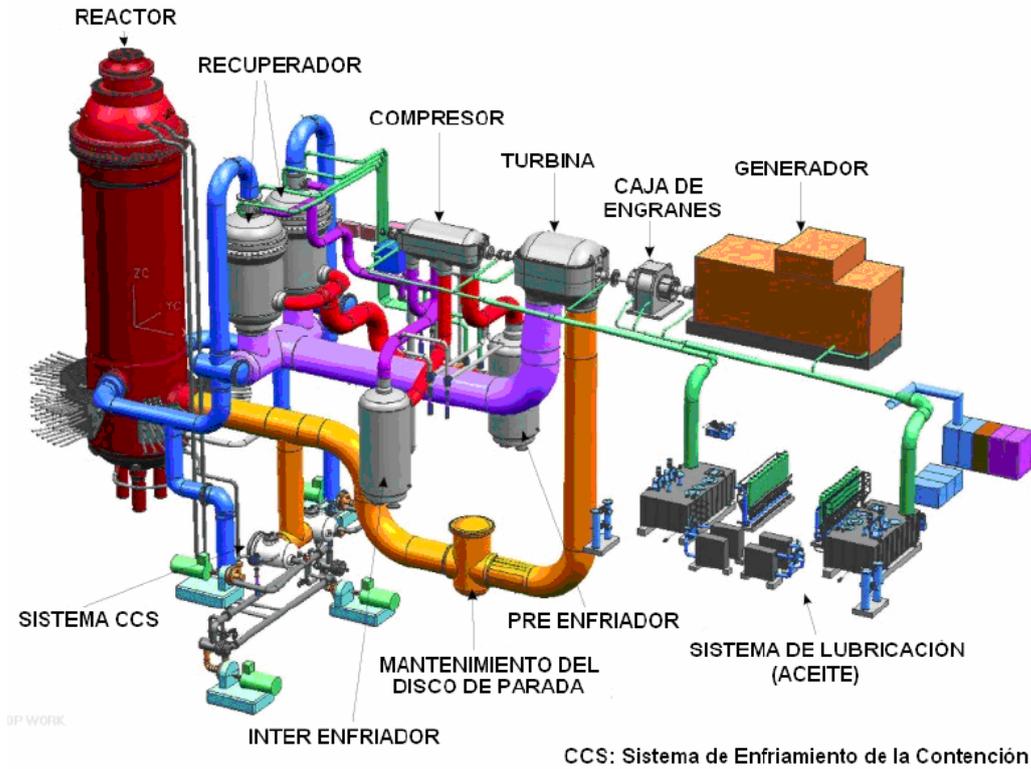


Figura 1.6. Ciclo de operación esquemático de la planta PBMR. [11]

La potencia tomada por el helio en el núcleo y la proporcionada en la turbina de potencia es proporcional al flujo de masa de helio para las mismas temperaturas en el sistema. La tasa de flujo de masa depende de la presión, así que la potencia puede ser ajustada cambiando la presión en el sistema.

La operación a alta presión y alta temperatura en el reactor proporciona una alta eficiencia térmica. Mientras un reactor típico de agua ligera tiene una eficiencia térmica (potencia eléctrica entregada / calor proporcionado) de aproximadamente 33%, en un diseño básico del PBMR la eficiencia es de 41% [12].

El apagado del reactor se realiza metiendo las barras de control, mientras que el encendido es efectuado haciendo crítico al reactor, propiciando las fisiones nucleares en el núcleo y circulando el refrigerante por medio de la motorización del equipo turbo-generador. Posteriormente el calor es removido por el pre-enfriador y el enfriador intermedio. A continuación se muestra el esquema de una planta de generación de electricidad con reactor PBMR.



**Figura 1.7. Planta de generación de electricidad con reactor PBMR.[12]**

### 1.5.2 Combustible del PBMR

Como ya se ha mencionado, el combustible consiste de partículas isotrópicas de uranio bajamente enriquecido contenidas en una esfera de grafito modulado. Una partícula recubierta consiste en un núcleo de dióxido de uranio rodeado por capas recubiertas como se muestra en la siguiente figura.



Figura 1.8. Diseño de elemento de combustible para PMBR. [12]

Para el combustible del PBMR, al igual que del GT-MHR, la primera capa depositada en los núcleos es carbón poroso. Esto es seguido de una delgada capa de carbón pirolítico, el cual es una forma muy densa de carbón, posteriormente se cubre con una capa de carburo de silicio que es un material refractario fuerte y finalmente otra capa de carbón pirolítico.

El carbón poroso acomoda cualquier deformación mecánica que el núcleo de dióxido de uranio pueda hacer durante el tiempo de vida del combustible, así como los productos de fisión gaseosos difundidos fuera del núcleo. Las capas de carbón pirolítico y carburo de silicio proveen una barrera impenetrable diseñada para contener los productos de fisión.

Estas partículas recubiertas, de aproximadamente 1 milímetro de diámetro, son después mezcladas con polvo de grafito y una resina fenólica en esferas de 50 milímetros de diámetro. Posteriormente una capa de 5 milímetros de ancho de carbono es adherido para formar una zona de “no combustible” y las esferas resultantes son filtradas y recocidas para hacerlas duras.

Finalmente, las bolas esféricas de combustibles son maquinadas a un diámetro uniforme de 60 milímetros. Cada bola de combustible contiene cerca de 9 gr. de uranio [12]. El total de uranio en una carga de combustible es de 4.1 toneladas métricas, y el total de masa de una bola de combustible es de 210 gr.

El grafito es usado por los reflectores. Una columna de reflector central está localizada en el centro del núcleo y un reflector externo afuera de él. El grafito también es usado en el núcleo del reactor por sus características estructurales y su habilidad de frenar los neutrones a la velocidad requerida para que la reacción de fisión nuclear sea llevada a cabo.

Debido a que el isótopo de uranio 235 se presenta en uranio natural en concentraciones aproximadas de 0.7%, para tener una reacción en cadena auto sostenible, el uranio es enriquecido en el combustible del PBMR en aproximadamente 10% en uranio 235, el cual es el isótopo de uranio que mayormente se fisiona.

El reabastecimiento en línea es otro de los elementos clave del PBMR. Los elementos de combustible fresco son adicionados en la parte superior del reactor, mientras que el combustible usado es removido en el fondo, mientras el reactor está en funcionamiento.

Después de cada pasada por el núcleo del reactor, las esferas de combustible son medidas para determinar la cantidad de material fisible restante. Si una esfera todavía contiene una cantidad usable de material fisible, es regresado a la parte superior del reactor para otro ciclo. Cada ciclo toma 6 meses. Cada esfera pasa a través de reactor alrededor de 6 veces y dura cerca de 3 años antes de que sea removido.

La energía por unidad de masa que se extrae al combustible (llamado “quemado”), es mucho más grande en el PBMR que en los reactores de potencia convencionales. El material fisible que puede ser extraído del combustible gastado del PBMR es extremadamente inatractivo para propósitos de proliferación nuclear u otro uso indeseable.

El combustible es transportado al contenedor de combustible gastado en el edificio del reactor a través de un sistema de manejo de combustible. El contenedor de combustible gastado consta de 10 tanques, cada uno con un diámetro de 3.2 metros y una altura de 18 metros. Un tanque puede contener 600,000 esferas. [12]

Eskom, compañía Sudafricana, está desarrollando desde 1993 el PBMR basándose en la experiencia alemana. Su objetivo es mejorar la seguridad, la economía y la resistencia a la proliferación. Planeando la construcción del primer módulo comercial para el 2013, con unidades cuya producción será de 165 MWe por unidad, pudiendo agregar hasta 10 módulos. El tiempo de construcción de un módulo PBMR es alrededor de 24 meses y cuenta con un tiempo de vida de operación de la planta de 40 años. En la siguiente tabla se muestran algunas características del reactor PBMR.

<b>Indicadores Económicos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Potencia Eléctrica	MWe	165
Potencia Térmica	MWt	260
Eficiencia	%	41
Factor de disponibilidad	%	95
Tiempo de construcción	Meses	24
Vida útil	Años	40
Enriquecimiento de U235	%	8
Quemado de combustible	GWd/ton	150

**Tabla 1.1 Indicadores para el reactor PBMR. [13]**

## **1.6 EL REACTOR GT-MHR**

El Reactor GT-MHR es un sistema de energía nuclear avanzado enfriado por gas, que ofrece alto nivel de eficiencia térmica, gran seguridad, alta resistencia a la proliferación, bajos impactos ambientales, beneficios en el manejo de desechos y costos de generación eléctrica competitivos.

Pertenece a la nueva generación de reactores nucleares, actualmente está bajo desarrollo conjunto entre Estados Unidos (General Atomics) y Rusia (MINATOM) [14] por medio de un programa que se inició en 1993. El énfasis primario del programa era desarrollar la capacidad de disponer del plutonio sobrante de las armas nucleares.

El GT-MHR requiere avances significativos en investigación y análisis del desempeño del combustible y en materiales sometidos a altas temperaturas, así como en aleaciones de alta temperatura. Además, debido a la escasez de datos experimentales requiere el desarrollo de modelos para el diseño y análisis del combustible. El GT-MHR se proyecta como un reactor económicamente competitivo por sus altas temperaturas de operación, alta eficiencia térmica de su ciclo Brayton, por su alto nivel de quemado de combustible y por sus bajos requisitos de operación y mantenimiento.

### **1.6.1 Diseño del GT-MHR**

El módulo GT-MHR, mostrado en la Figura 1.9, acopla el módulo del reactor enfriado con helio (MHR – Modular Helium Reactor), contenido en una vasija, con una turbina de gas (GT – Gas Turbine) con un ciclo Brayton de alta eficiencia, de alrededor de 48%. El sistema de conversión de potencia se encuentra en una vasija adjunta. Las vasijas del reactor y de la unidad de conversión de potencia están interconectadas con una conexión transversal.

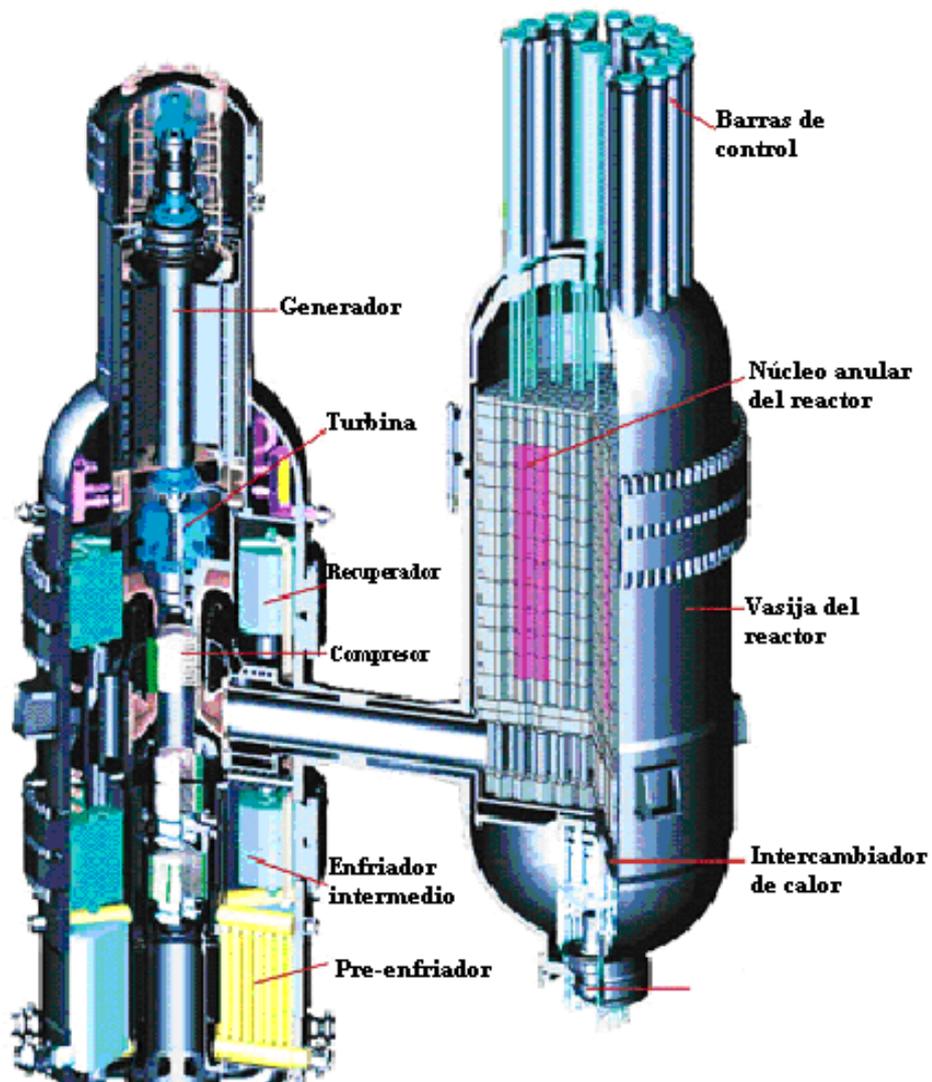


Figura 1.9. Módulo GT-MHR. [15]

El reactor utiliza moderador de grafito, como refrigerante helio, y partículas de combustible de cubiertas TRISO.

El refrigerante de helio es inerte y se mantiene en una única fase en todas las condiciones. El moderador de grafito tiene una alta resistencia y estabilidad a altas temperaturas, y las partículas de combustible recubiertas conservan los productos de fisión contenidos sin que se fuguen del combustible.

### 1.6.2 Sistemas de la Planta

Las vasijas de presión de acero del sistema de conversión de potencia y del reactor se encuentran localizadas bajo el nivel de la tierra, alojadas dentro de un edificio de concreto. Sobre el nivel del piso se encuentra la maquinaria de recarga de combustible y los sistemas de operación auxiliares (ver Figura 1.10). Esta

configuración permite reducir el riesgo de desperfectos, accidentes externos y desastres naturales.

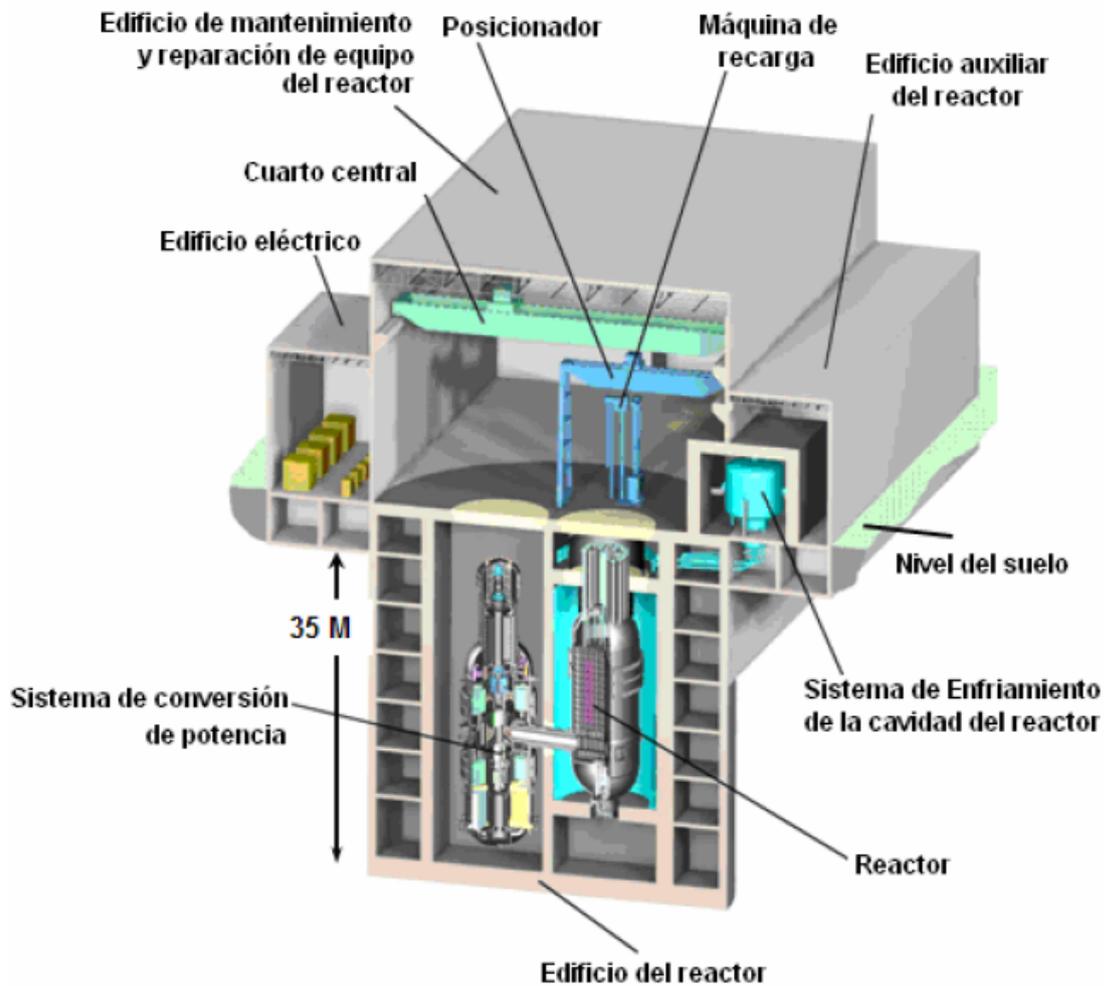


Figura 1.10. Edificio del GT-MHR. [15]

La planta de turbina de gas incluye los siguientes sistemas:

- Sistema de Reactor, el cual incluye el núcleo del reactor, soportes del núcleo, estructuras internas, ensambles de control de reactividad y el ducto caliente.

- Sistema Vasija, que comprende la vasija del reactor, la vasija de conversión de potencia, la unión de las vasijas, los soportes de las vasijas, y las restricciones laterales.

- Sistema de Conversión de Potencia (PCS, por sus siglas en inglés), incluye la turbina, recuperador, pre enfriador, inter enfriador, soportes internos y selladores. Este sistema también incluye el equipo necesario para la extracción y sustitución de componentes del PCS.

- Sistema de Enfriamiento de Apagado. Es un sistema de refrigeración por convección forzada independiente, para la eliminación del calor de decaimiento, que incluye el intercambiador de calor, el circulador y el control del enfriamiento de apagado.

- Cavity de Refrigeración del Reactor. Es un sistema de seguridad relacionados con el sistema de refrigeración pasiva de aire para el respaldo de la eliminación de calor de decaimiento, que incluye las estructuras de entrada / salida de aire atmosférico, un conjunto de paneles de refrigeración que rodea la vasija del reactor, y el conducto de frío / calor para el transporte aire.

- Sistema de manejo de combustible. Se ocupa de los elementos del combustible, reflector y transporte entre la instalación receptora y el núcleo del reactor, así como del transporte del combustible gastado del reactor para su procesamiento y almacenamiento.

-Sistema de Servicios de Helio, incluye los sistemas de purificación, almacenamiento y transferencia de helio.

- Sistema de Protección del Reactor. Realiza de manera automática las funciones de seguridad de protección de la planta.

- Control de Datos y Sistema de Instrumentación de la Planta. Supervisa los parámetros de la planta. Regula automáticamente las condiciones de la planta, proporciona información al operador, y acepta y ejecuta los comandos de control manual del operador.

A continuación se muestran esquemáticamente los principales elementos del módulo GTMHR.

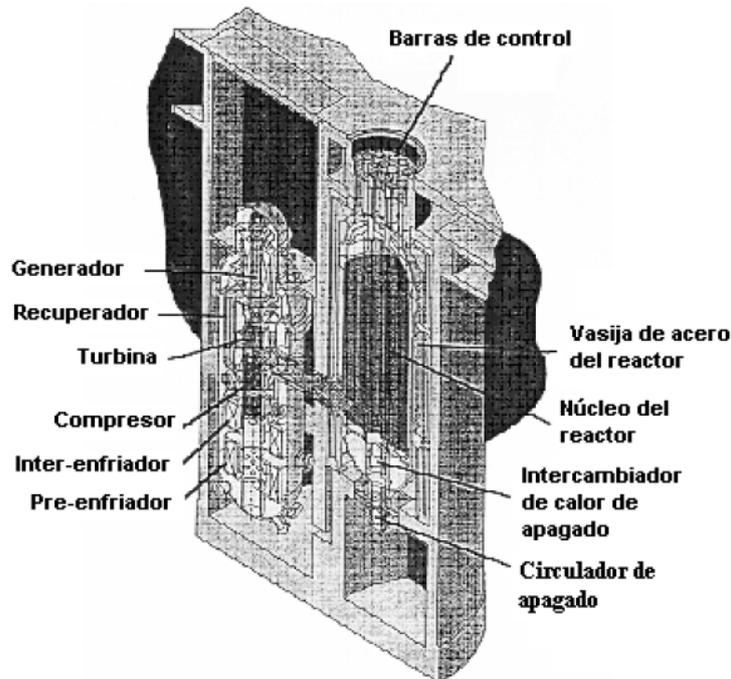


Figura 1.11. Elementos principales del GT- MHR. [16]

### 1.6.3 Combustible del GT-MHR

El reactor GT MHR utiliza combustible TRISO. Como se ha descrito para el reactor PBMR, las partículas de combustible cubiertas TRISO se componen de un núcleo esférico de materiales físisles o fértiles, contenida en múltiples capas de revestimiento. El diámetro total del TRISO revestido de partículas estándar varía de unos 650 micras a unos 850 micras. La siguiente figura muestra la vista en microscopio de esta partícula.

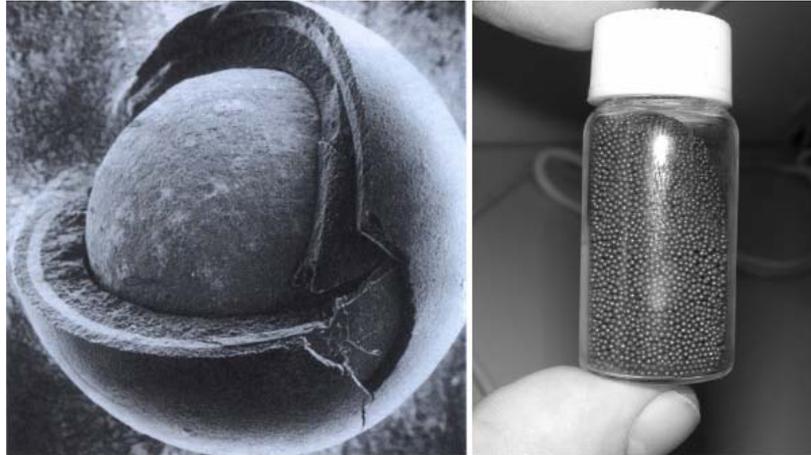


Figura 1.12. Vista en microscopio electrónico de una partícula TRISO: Núcleo kernel compuesto por UOX o MOX o UC, Capa de carbón pirolítico, Capa de Carburo de silicio impermeable, Capa de grafito puro. A lado: Botella con partículas TRISO. [16]

El TRISO revestido no comienza a degradarse térmicamente hasta llegar a temperaturas cercanas a los 2000°C, como se observa en la Figura 1.13. Las temperaturas normales de funcionamiento no son superiores a los 1250°C y en el peor de los casos de accidente las temperaturas se mantienen por debajo de los 1600°C [17]

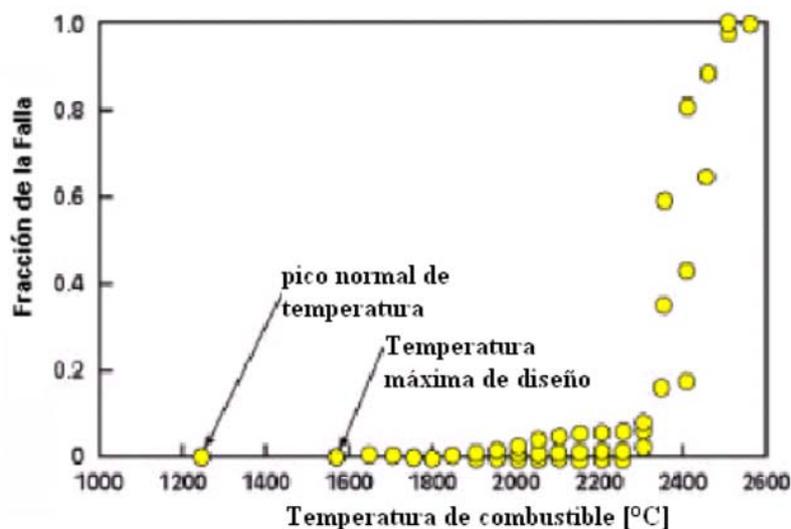


Figura 1.13. Comportamiento del combustible. [17].

En el GT-MHR, las partículas recubiertas TRISO son depositadas en una matriz de grafito y forman cilindros compactos de combustible, (aproximadamente 13 mm de diámetro y 51 mm de largo). Aproximadamente 3000 cilindros de combustible compacto son cargados dentro de una matriz hexagonal de grafito de 793 mm de largo por 360 mm a diferentes niveles (ver Figura 1.14). Ciento dos columnas de elementos de combustible hexagonales, apiladas en 10 zonas axiales forman un núcleo anular (ver figura 1.15). Los bloques de grafito reflector son acomodados dentro y fuera del núcleo activo.



**Figura 1.14. Combustible de partículas revestidas. [15]**

El sistema de recubrimiento de las partículas de combustible TRISO, proporciona la contención de los productos de fisión durante el funcionamiento del reactor. También proporciona una excelente barrera para la contención de los radionucleidos cuando el combustible sea depositado en un almacenamiento geológico profundo de combustible gastado. Los recubrimientos son ideales para un sistema de gestión de residuos de barrera múltiple. Las mediciones de tasas de corrosión de los TRISOs indican que el sistema de revestimiento debería mantener su integridad un millón de años o más en un depósito geológico profundo.

El sistema del reactor del GT-MHR contiene 727 toneladas métricas de grafito distribuidas de la siguiente manera:

-700 t de grafito en el material de los bloques.

-27 t de grafito que se mezcla con óxidos de plutonio o de uranio para construir los elementos combustibles. El grafito representa cerca del 86% del volumen de los elementos del combustible.

En la Figura 1.15, se muestra el núcleo del reactor GT-MHR y la forma de acomodo del combustible.

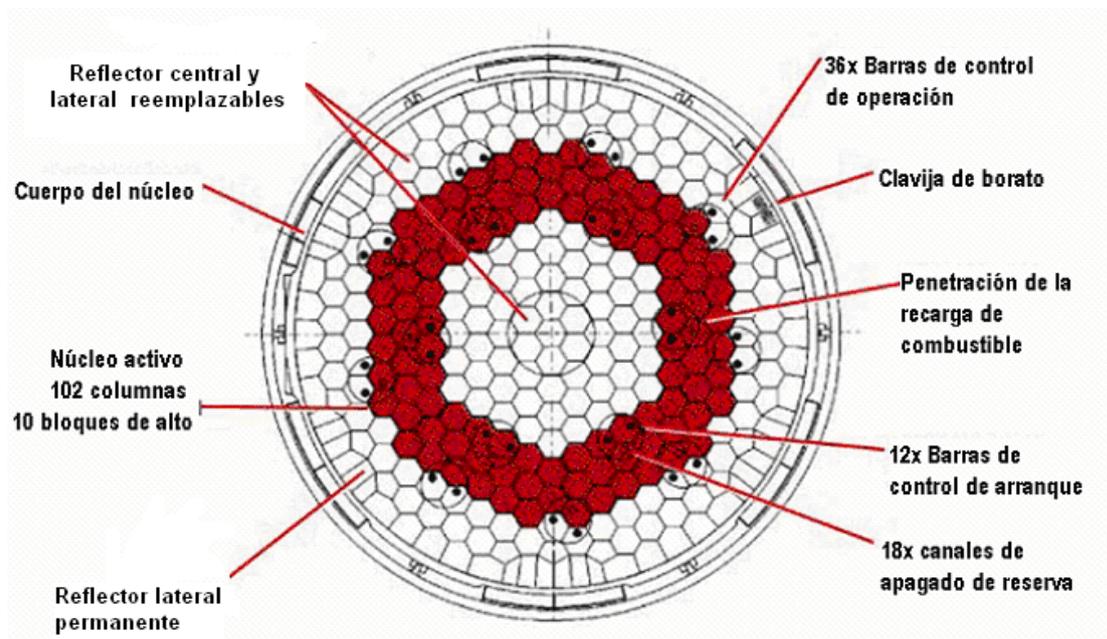


Figura 1.15. Núcleo anular GT-MHR. [16]

#### 1.6.4 Ciclo Termodinámico del Reactor

El refrigerante helio es calentado en el núcleo del reactor, que fluye hacia abajo a través de los canales de refrigeración en elementos de combustible de grafito y después pasa al sistema de conversión de potencia. El sistema de conversión de potencia contiene una turbina de gas que opera a una temperatura aproximada de 850 [°C] y una presión de 7.02 [MPa], para generar electricidad.

El helio sale de la turbina fluyendo a través del lado caliente del recuperador a 510 [°C] y 2.64 [MPa], transfiriendo el calor residual al helio en el lado frío del recuperador (el cual es regresado al reactor). Del recuperador, el helio fluye a través del pre-enfriador en donde es drásticamente enfriado a 26 [°C] y 2.57 [MPa]. Después el refrigerante de helio fluye a través del compresor de baja y alta presión respectivamente, interactuando con el inter-enfriador. A la salida del compresor de alta presión, el helio fluye a través del lado frío y de alta presión del recuperador, donde el refrigerante es recalentado a 490 [°C] y 7.07 [MPa], para regresar al núcleo del reactor (ver figura 1.16).

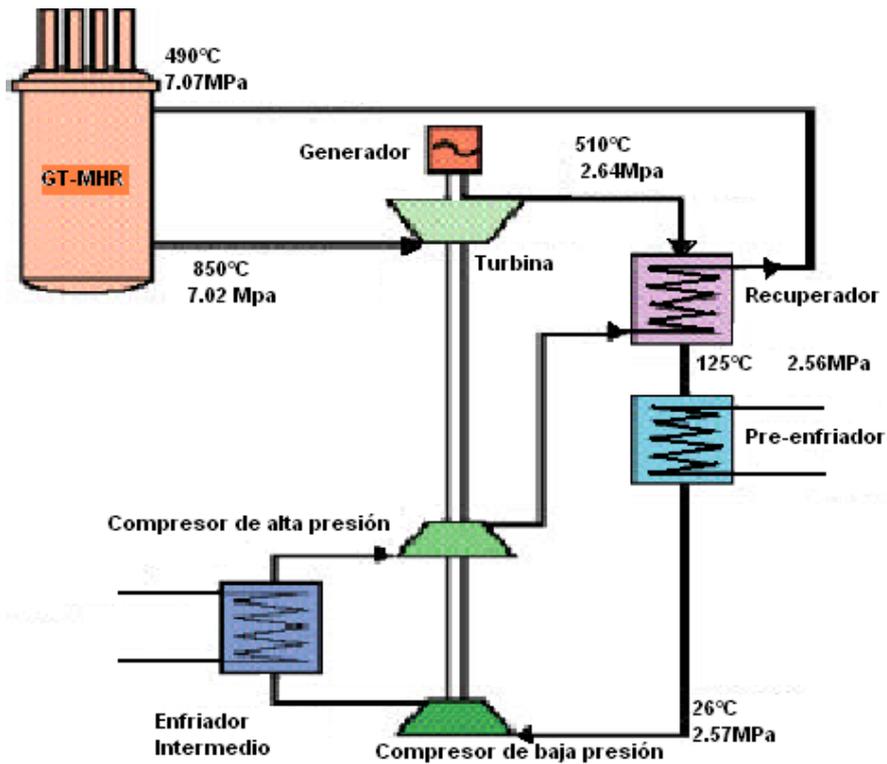


Figura 1.16. Esquema de flujo del refrigerante del GT-MHR. [14]

El uso directo del ciclo Brayton para producir electricidad tiene una eficiencia de aproximadamente 48%. Esta eficiencia es 50% más alta que en plantas nucleares actuales [16]. A continuación se muestra gráficamente la comparación de estas eficiencias.

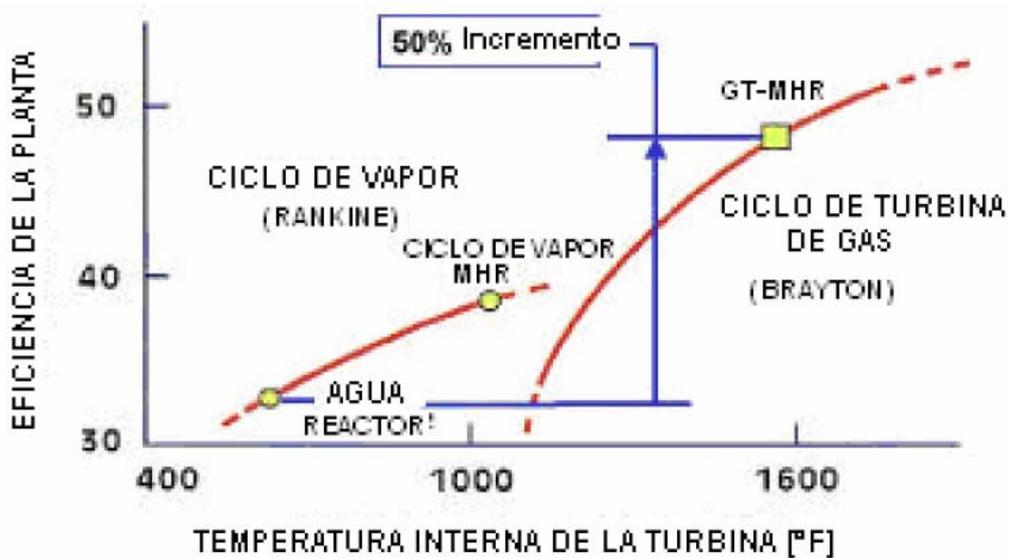


Figura 1.17. Comparación de eficiencias térmicas. [16]

En la siguiente tabla se presentan los parámetros de operación típicos del GT-MHR.

Potencia Térmica del Reactor, MWt	600
Temperaturas de entrada/salida, °C	491/850
Presiones de entrada/salida, MPa	7.07/7.02
Flujo másico de Helio, Kg/s	320
Temperaturas de entrada/salida de la turbina, °C	848/511
Presiones de entrada/salida de la turbina, MPa	7.01/2.64
Temperaturas de entrada/salida del lado caliente del recuperador, °C	511/125
Temperaturas de entrada/salida del lado frío del recuperador, °C	105/491
Potencia eléctrica, MWe	286
Eficiencia de la planta %	48

**Tabla 1.2. Parámetros de operación a potencia plena nominal del GT-MHR. [13]**

### 1.6.5 Características de seguridad del GT-MHR.

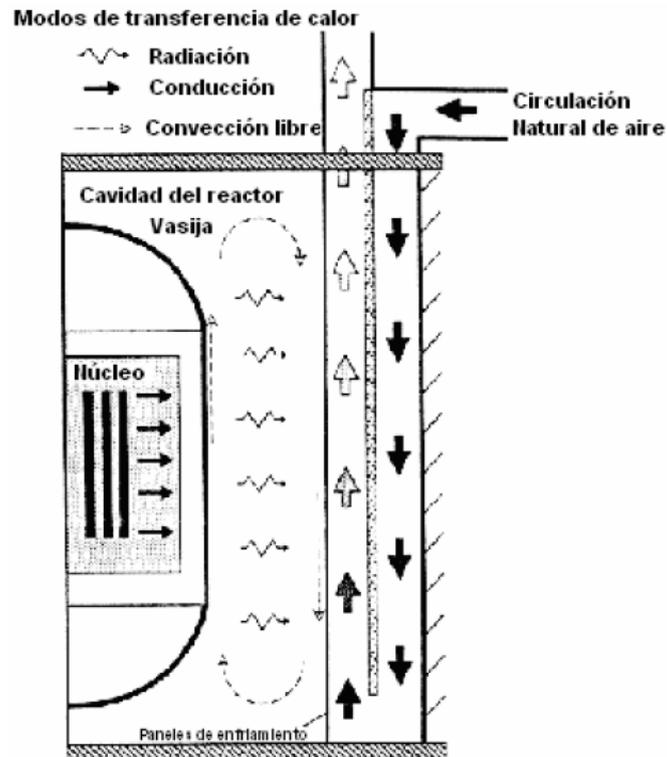
El GT-MHR es un reactor de seguridad pasiva y a prueba de fundición del núcleo. El nivel general de seguridad de la planta es único entre la tecnología de los reactores nucleares [18].

La seguridad del GT-MHR es lograda a través de una combinación de características de seguridad inherente y de diseño, como las siguientes:

- 1.- Refrigerante de Helio, es de una sola fase, inerte, y no tiene efectos reactivos.
- 2.- Bloques de grafito, que proveen una capacidad calorífica alta, respuesta térmica lenta y estabilidad estructural a temperaturas muy altas.
- 3.- Partículas revestidas de combustible que retienen los productos de fisión a temperaturas mucho más altas que las condiciones normales de operación y accidentes postulados.
- 4.- Coeficiente negativo de reactividad por temperatura del combustible.

El GT-MHR tiene diversos sistemas de eliminación de calor, posee también un sistema de conversión de energía y un sistema de refrigeración de apagado que pueden ser utilizados para la remoción del calor de decaimiento. En el caso de que ninguno de estos sistemas activos esté disponible, un medio pasivo independiente está previsto para la remoción del calor de decaimiento del núcleo; el cual es el sistema de refrigeración de la cavidad del reactor (RCCS, por sus siglas en inglés) que rodea la vasija del reactor.

La remoción del calor de decaimiento de manera pasiva, la baja densidad de potencia del núcleo y la configuración del núcleo anular se han diseñado de tal manera que el calor de decaimiento puede ser removido por conducción de calor, radiación térmica y convección natural, sin sobrepasar la temperatura límite de las partículas de combustible (ver figura 1.18). El calor de decaimiento del núcleo es conducido a la vasija de presión y transferido por radiación desde la vasija hacia el RCCS.



**Figura1.18. Radiación pasiva, convección natural y conducción del calor residual del silo de contención. [18]**

Incluso, asumiendo que el RCCS fallara, la conducción de calor del núcleo, la radiación térmica de la vasija y la conducción en las paredes del silo y la tierra que lo rodea, es suficiente para mantener el núcleo a temperaturas por debajo del límite de diseño (ver figura 1.19) Como resultado de ello, los radionucleidos se mantienen dentro de las partículas de combustible recubiertas, sin la necesidad de utilizar sistemas accionados por electricidad. Estas características de seguridad y diseño llevan a que el reactor pueda soportar la pérdida de circulación de refrigerante y mantener la temperatura del combustible por debajo de los límites dañinos (es decir, el sistema es a prueba de fusión) [17]

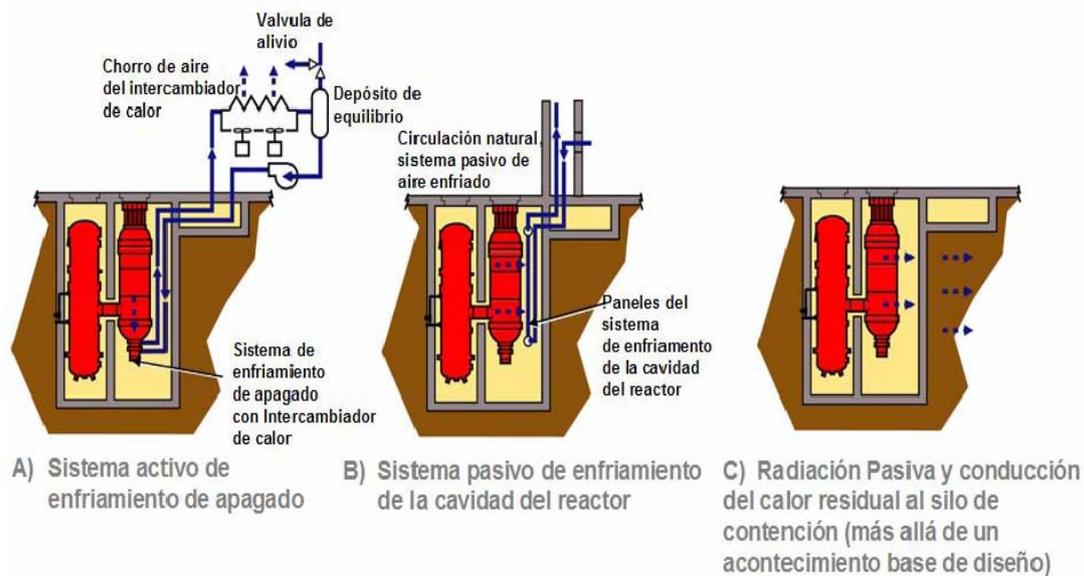


Figura 1.19. Eliminación del calor residual cuando el sistema de conversión de potencia no es accesible. [18]

La gran capacidad térmica de la estructura de grafito del núcleo es una característica inherente importante que contribuye significativamente al mantenimiento de la temperatura del combustible por debajo de los límites de operación (ver figura 1.20).

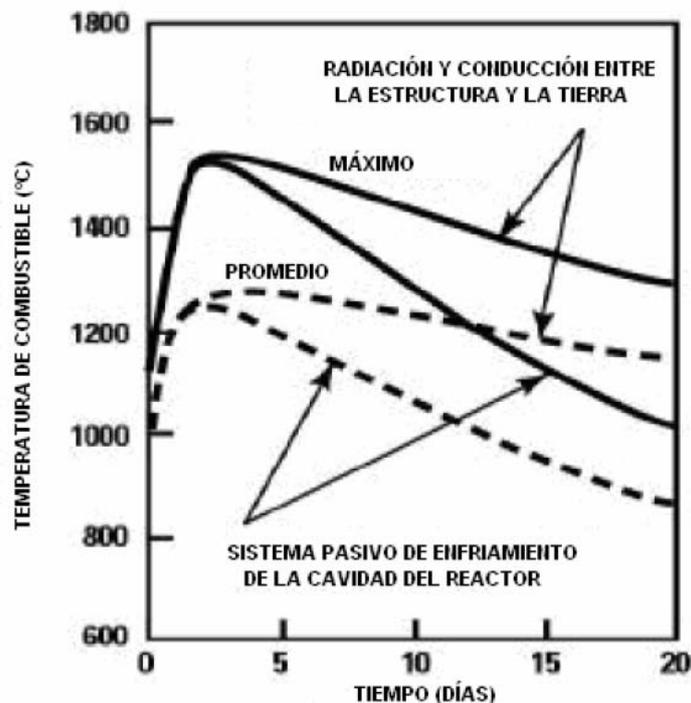


Figura 1.20. Temperaturas de calentamiento del núcleo con rechazo de calor pasivo. [18]

La reactividad del núcleo es controlada por dos sistemas: por las barras de control y por el sistema de apagado de reserva, que utiliza pequeñas esferas de boro que

circulan por los canales de apagado, dicho diseño redundante apaga al reactor ante cualquier condición anormal.

### **1.6.6 Ventajas ambientales del GT-MGR.**

La descarga térmica (desecho de calor) del GT-MHR es la mitad de la de los reactores de agua ligera, por unidad de electricidad generada, debido a que el GT-MHR tiene una eficiencia térmica 50% mayor a la de los reactores de agua ligera. Si este calor residual se descargara mediante sistemas de agua de rechazo de calor como en una planta de energía convencional, el GT-MHR requeriría la mitad de cantidad de agua de refrigeración por unidad de electricidad producida. Como alternativa, debido a su significativo menor calor residual, éste puede ser rechazado directamente a la atmósfera mediante sistemas de rechazo de calor refrigerado por aire, tal que no se necesiten recursos de refrigeración por agua.

El GT-MHR produce menos residuos de metales pesados radiactivos que otras opciones, debido a la alta eficiencia térmica de la planta y del alto quemado de combustible.

### **1.6.7 Resistencia a la Proliferación del GT-MHR.**

Tanto el combustible nuevo como el combustible gastado del GT-MHR tienen una alta resistencia a la proliferación. El combustible fresco del GT-MHR la presenta debido a que tiene una baja fracción de volumen de combustible dentro del volumen de grafito. Además, de la dificultad técnica para recuperar los materiales dentro de los revestimientos del combustible. El combustible gastado por su parte posee características de resistencia a la proliferación mejores que las de cualquier otro reactor de potencia debido a que:

1.- La cantidad de material fisible (plutonio y uranio) por elemento combustible gastado de GT-MHR es baja debido a la baja fracción de volumen de combustible.

2.-El plutonio contenido en el combustible gastado del GT-MHR, el cual es el material de mayor importancia para la proliferación, es sumamente bajo tanto en la cantidad por bloque de combustible gastado, como en calidad, debido al alto quemado de combustible. Además, la mezcla isotópica de plutonio del combustible gastado se degrada mucho más que la del reactor de agua ligera, haciéndolo especialmente poco atractivo para su uso en armas.

3.- No hay un proceso desarrollado, ni la capacidad en cualquier lugar del mundo para la separación de material residual fisible del combustible gastado del GT-MHR.

### 1.6.8 Competitividad económica del GT-MHR

Existen varias consideraciones importantes en la evaluación de la competitividad económica de la energía nuclear.

Las principales ventajas económicas de la energía nuclear son:

.- Costos de producción (mantenimiento, operación y combustible) bajos y predecibles. Los costos de producción nuclear presentan baja volatilidad sobre largo y corto plazos porque el recurso primario de energía, mineral de uranio, representa una fracción muy pequeña del costo total de producción. Por otro lado, el costo del recurso primario de energía en plantas que queman combustibles fósiles es una fracción muy grande del costo de producción.

.- Factores de capacidad altos. El funcionamiento de las centrales nucleares logran alcanzar los factores de capacidad de planta en el rango de 90%. El promedio proyectado de factores de capacidad para competir con las plantas quemadoras de gas de ciclo combinado está en el rango de 80 - 85% [18].

.-Larga vida de operación. Las nuevas plantas nucleares están siendo diseñadas para una vida de 60 años. Por otro lado, existe poca experiencia en la operación a largo plazo de las centrales a base del ciclo combinado de gas. Los tiempos de vida nominal de las plantas de ciclo combinado de gas no se espera que superen los 25 años.

Las principales desventajas económicas de la energía nuclear son:

.-Tamaño grande de planta. La mayoría de las nuevas centrales nucleares son diseñadas en el rango de tamaño de 1000 - 1350 MWe para tener beneficios de la economía de escala, y reducir los costos unitarios de capital [ $\$/\text{kWe}$ ], sin embargo, esto hace que los costos de inversión en una central nuclear sean altos.

.-Largos tiempos de construcción. El tiempo de construcción de nuevas centrales nucleares están en el rango de 4 - 5 años. El período de construcción de las plantas de ciclo combinado de gas es de aproximadamente 2 años.

.-Financiamiento de las inversiones. El alto costo de capital se traduce en una mayor inversión y los tiempos más grandes de construcción implican más altos intereses durante la construcción. Estos factores se prevé que resulten en una alta inversión de capital.

El GT-MHR tiene ventajas económicas con respecto a las nuevas plantas nucleares de reactores de agua y a plantas de gas de ciclo combinado. La competitividad económica del GT-MHR es una consecuencia del uso directo del sistema de conversión de potencia del ciclo Brayton y del diseño de seguridad pasiva. El ciclo Brayton directo ofrece una alta eficiencia de conversión térmica y elimina amplios equipos de conversión de potencia requeridos por el ciclo de conversión de potencia Rankine. La reducción de la complejidad en equipos de conversión reduce el capital y los costos de

operación y mantenimiento (O & M). En la siguiente tabla se muestran algunos indicadores del reactor GT-MHR.

<b>Indicadores Económicos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Potencia Eléctrica	MWe	286
Potencia Térmica	MWt	600
Eficiencia	%	48
Factor de disponibilidad	%	90
Tiempo de construcción	Meses	36
Vida útil	Años	60
Enriquecimiento de U235	%	20
Quemado de combustible	GWd/ton	100

**Tabla 1.3 Indicadores para el reactor GT-MHR. [13]**

El GT-MHR tomará tecnológicamente, mucho de lo que ya se conoce de los reactores de gas de alta temperatura HTGR, la llamada "parte convencional" compuesta por compresores, intercambiadores, turbinas de gas, etc., pero necesita aún investigación y desarrollo en combustibles y en materiales sometidos a altas temperaturas. Una de las características más atractivas de este reactor de alta temperatura radica en tener una alta eficiencia termodinámica y en la posibilidad de tener procesos de co-generación, como la producción de hidrógeno.