

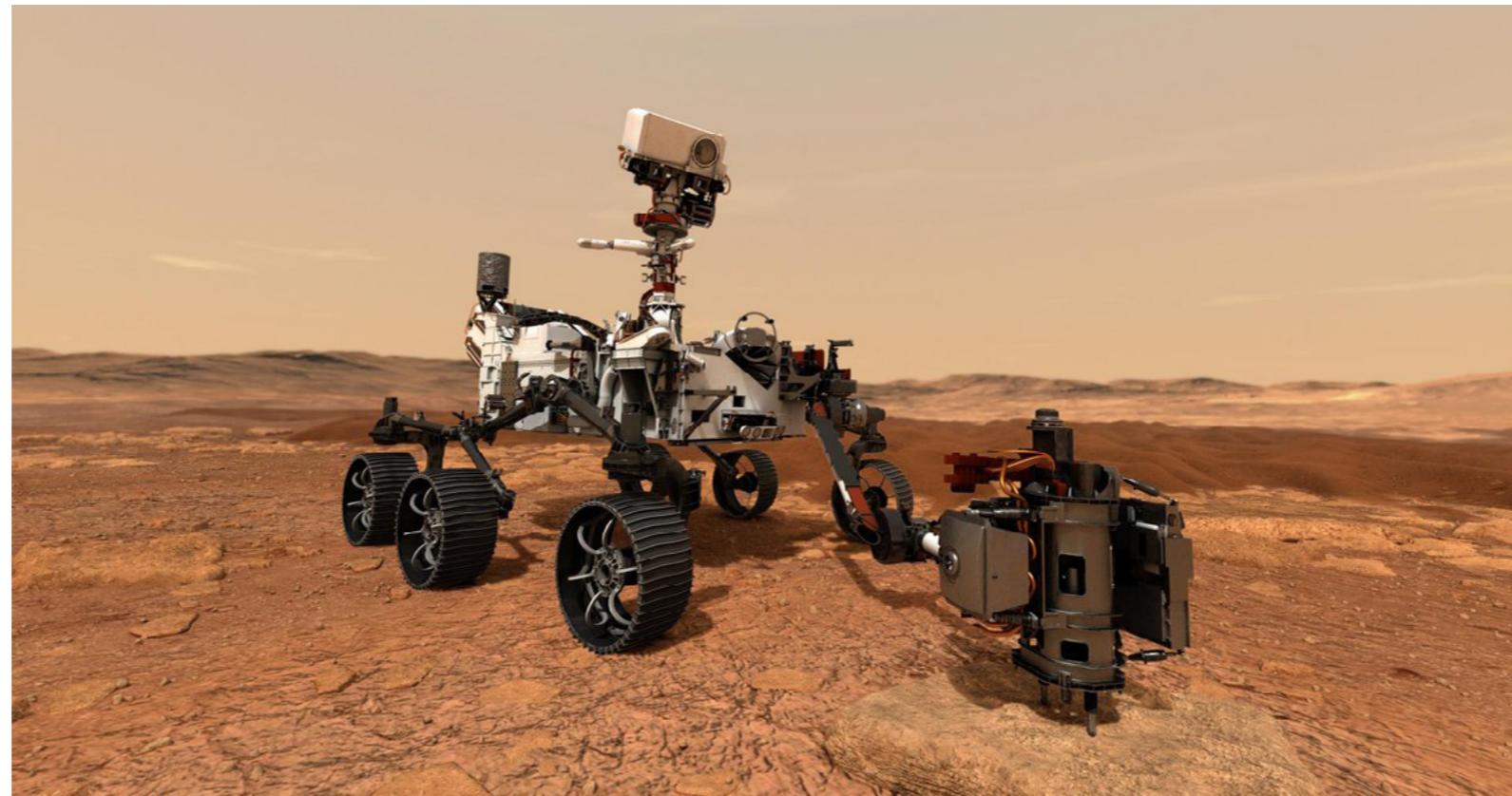
# Energía Nuclear y Exploración Espacial

El 18 de febrero de 2021 el robot *Perseverance* equipado con tecnología nuclear llegó a Marte con éxito pleno. En esta monografía se resalta la **contribución de la energía nuclear para producir electricidad y calor en las misiones espaciales** y de exploración de otros planetas.

Las misiones de exploración del espacio de la NASA (Administración Nacional de Estados Unidos para la Aeronáutica y el Espacio) requieren sistemas seguros, fiables y de larga vida que proporcionen electricidad y calor a las naves espaciales y su instrumentación científica.

Imagen del robot  
*Perseverance*.  
Fuente: NASA

La tecnología nuclear tiene destacadas aplicaciones en campos como el arte, la industria, la agricultura, la medicina y también el espacial



Una tecnología ya probada que cumple con los objetivos anteriores son los denominados Sistemas de Potencia basados en Radisótopos (RPS - *Radioisotope Power Systems*). Uno de los modelos de esta categoría es el Generador Termoeléctrico de Radisótopos (RTG - *Radioisotope Thermoelectric Generator*), un **sistema nuclear para el espacio que convierte calor en electricidad sin partes móviles.**

El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) **ha desarrollado para la NASA varias generaciones de estos sistemas que suministran electricidad y calor para un gran número de misiones de exploración espacial.** El Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples (MMRTG - *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*) fue diseñado con la flexibilidad requerida para poder funcionar tanto en planetas con atmósfera como la de Marte, como en el vacío del espacio exterior. **Es capaz de proporcionar una potencia eléctrica de 125 Watios (W) en su lanzamiento,** adecuada para la mayoría de necesidades con el alto nivel de seguridad requerido.

Los elementos principales del *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator* se pueden ver con distinto grado de detalle en las siguientes imágenes:

## Los Sistemas de Potencia basados en Radisótopos suministran electricidad y calor en múltiples misiones de exploración espacial

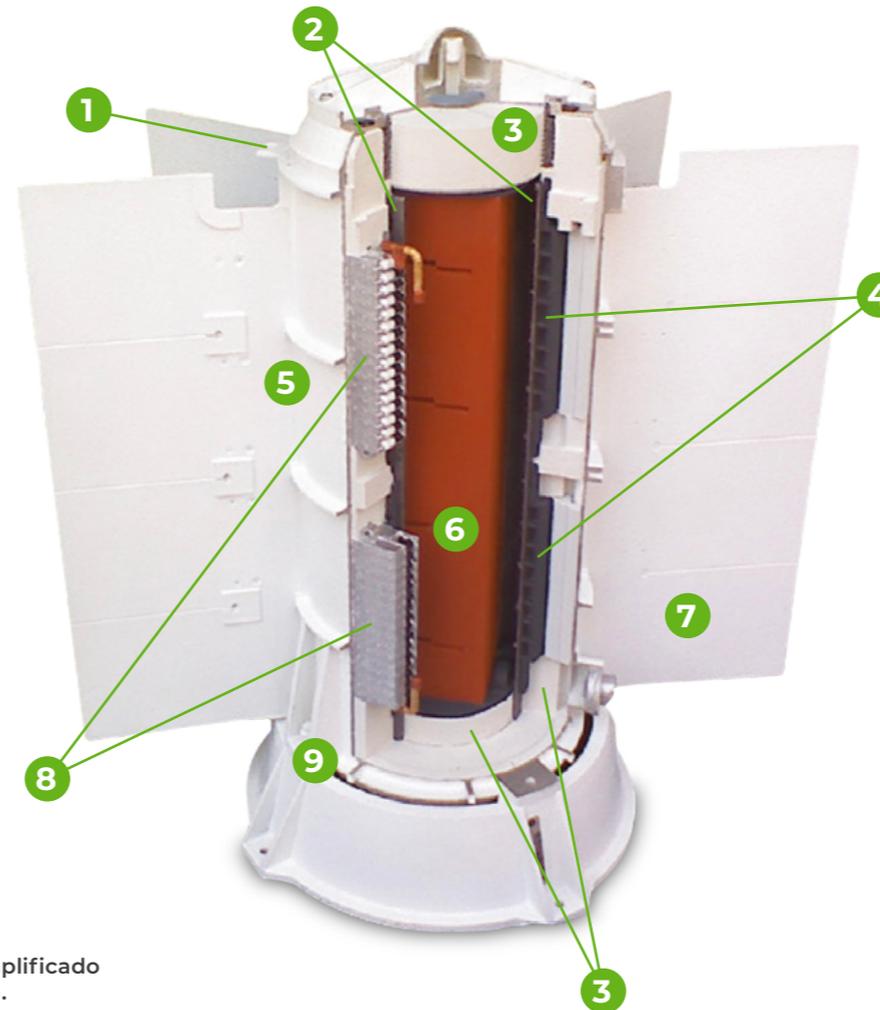


Diagrama simplificado de un MMRTG.  
Fuente: NASA

- 1 Conductos de refrigeración
- 2 Revestimiento de las fuentes de calor
- 3 Aislamiento térmico
- 4 Bloque de distribución térmico
- 5 Carcasa exterior
- 6 Módulo de 8 GPHS
- 7 Aleta de disipación de calor
- 8 Módulos termoeléctricos
- 9 Estructura de montaje

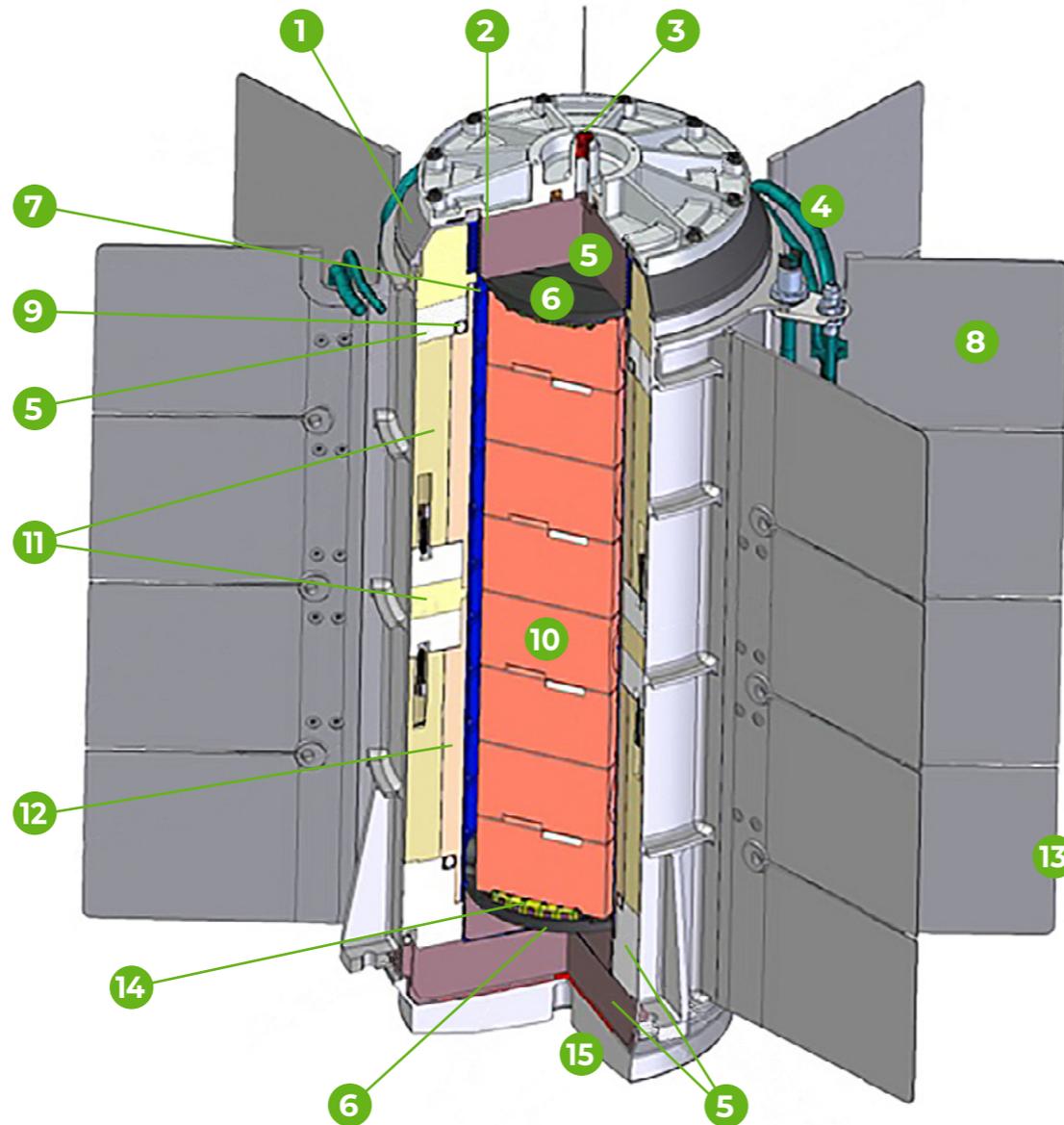


Diagrama detallado de un MMRTG.  
Fuente: NASA

- 1 Tapa terminal de abastecimiento de combustible (Al 2291, Al 1100, tántalo, placa bimetálica SS 304L)
- 2 Fuelles de amortiguación (Haynes 25)
- 3 Cubierta de carga (forja Al 2219-T852)
- 4 Conductos de refrigeración (conectores mecanizados Al 6063-T4, tubos 6061-T4, conectores bimetálicos 316L a Al 6064)
- 5 Aislamiento de material microporoso Mink (TE 1400)
- 6 Placa de interfaz de GPHS (FWPF 3-D CC)
- 7 Revestimiento de las fuentes de calor (Haynes 25)
- 8 Recubrimiento térmico blanco Aptek 2711
- 9 Acumulador termoeléctrico (Zr alojado en Pd)
- 10 Pila de 8 módulos GPHS (GFE)
- 11 Aislamiento Microtherm (Super G)
- 12 Bloque de distribución de calor (grafito Poco AXF-5Q1)
- 13 Aleta de disipación de calor (Al 6063-T6)
- 14 Acumulador de calor (Zr alojado en una tela de óxido de zirconio y retén Haynes 25 sujeto con hilo de Pt/Rb)
- 15 Cubierta terminal de montaje (forja Al 2291-T852)

## Historia de los *Radioisotope Power Systems* en misiones espaciales

Los Sistemas de Potencia basados en Radisótopos que convierten calor en electricidad de modo plenamente fiable se han utilizado en ocho misiones orbitales alrededor de la Tierra, ocho más a los planetas exteriores y

las misiones Apolo a la Luna posteriores al Apolo 11.

Las misiones exteriores al Sistema Solar son las Pioneer 10 y 11, Voyager 1 y 2, Ulysses, Galileo, Cassini y New Ho-

rizons a Plutón y aún más allá del cinturón de Kuiper. Los Generadores Termoeléctricos de Radisótopos (RTGs) a bordo de los Voyager 1 y 2 han funcionado desde 1977 y siguen enviando valiosos datos científicos tras haber

alcanzado el vacío del espacio interestelar. **En total, desde 1961 se han lanzado al espacio 26 misiones con 45 RTGs desde Estados Unidos.**

## ¿Cómo funciona un Generador Termoeléctrico de Radisótopos?

Los Generadores Termoeléctricos de Radisótopos convierten calor procedente de la desintegración natural de isótopos radiactivos en electricidad. Constan de dos elementos principales: la fuente de calor que contiene el radisótopo (principalmente plutonio-238) y los termopares de estado sólido, que convierten el calor de desintegración en electricidad.

La conversión del calor en electricidad es el principio de funcionamiento de los termopares y fue descubierta por el científico alemán **Thomas Johann Seebeck** hace dos siglos, al observar que cuando dos materiales conductores diferentes se unen en un circuito cerrado y sus uniones se mantienen a temperaturas distintas, se produce una diferencia de potencial. A diferencia de los paneles solares, estos sistemas no dependen de la radiación solar, lo que los hace idóneos para misiones al espacio más lejano, atmósferas con insuficiente radiación solar o entornos que pueden dañar a estos paneles.

- 1 Unión fría tipo "N"
- 2 Unión fría tipo "P"
- 3 TAGS
- 4 PbSnTe
- 5 Unión caliente del termopar
- 6 PbTe

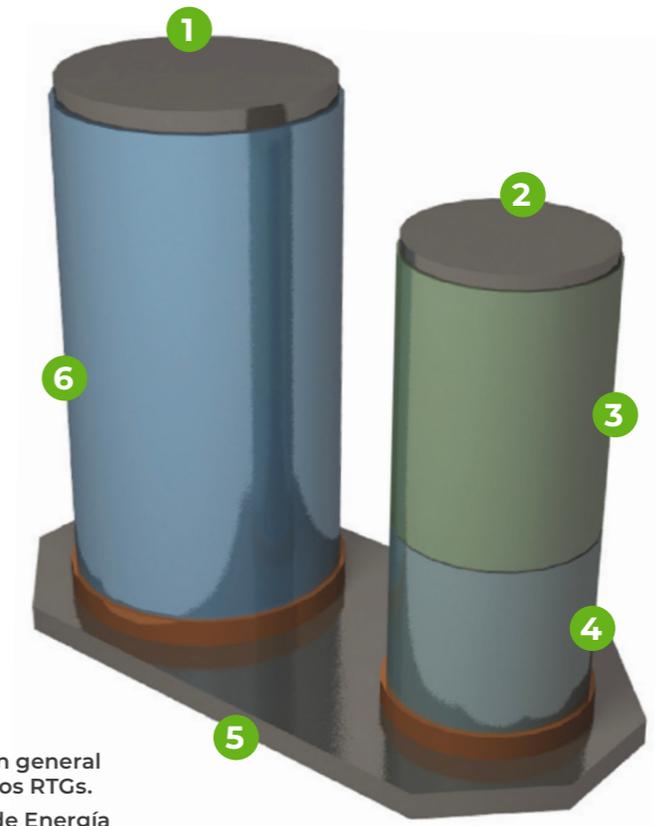


Imagen que ilustra la disposición general de un termopar similar a los de los RTGs.  
Fuente: NASA y Departamento de Energía de Estados Unidos

La potencia de salida de los termopares es función de la temperatura de cada unión y de las propiedades de los materiales que las constituyen. Los termopares usados en los Generadores Termoeléctricos de Radisótopos utilizan calor procedente de la desintegración natural de isótopos radiactivos como el plutonio-238 para calentar el lado caliente de la unión del termopar, y el frío del espacio o la atmósfera de otros planetas para el lado frío.

**El Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples (MMRTG - Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator) recibe su potencia de ocho Fuentes de**



Proceso de montaje del MMRTG de la sonda que se envió a Marte en el Mars Science Laboratory.

Fuente: NASA y Departamento de Energía de Estados Unidos

**Calor de Desintegración para Uso General (GPHS - General Purpose Heat Source)**, alimentadas con dióxido de plutonio-238. Inicialmente, estos ocho módulos producen 2 kW de potencia térmica, equivalente a 125 W de potencia eléctrica.

Los termopares o pares termoeléctricos del MMRTG están diseñados a base de unos compuestos denominados PbTe/TAGS, en los que PbTe se refiere a un compuesto de plomo y telurio que se obtiene de rocas denominadas halitas y TAGS es la abreviatura de un material que incorpora telurio (Te), plata (Ag), germanio (Ge) y antimonio (Sb).



Imagen virtual del helicóptero *Ingenuity* volando en las proximidades del robot *Perseverance*.

Fuente: NASA

El Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples está diseñado para producir 125 W de potencia eléctrica al principio de la misión, que decaen a 100 W tras 14 años de servicio. En términos relativos, el peso de 45 kg del MMRTG se traduce en una favorable relación de 2,8 W/kg al comienzo de su vida operativa. **Su diseño le permite funcionar tanto en el vacío del espacio exterior como en atmósferas de planetas como Marte.**

**El Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples del robot *Perseverance* también se ha utilizado para cargar un conjunto de baterías de ion-litio que han proporcionado suficiente densidad de energía para poner en servicio un robot helicóptero, llamado *Ingenuity*, para llevar a cabo cortos vuelos sobre la superficie de Marte, así como permitir que pueda superar la fría noche del planeta rojo con temperaturas de -90 °C sin dañar su instrumentación.**

## Seguridad y diseño

Un Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples (MMRTG) está diseñado con múltiples niveles de seguridad, con el objetivo de evitar o minimizar el riesgo de pérdida o dispersión de su material nuclear en un amplio marco de hipotéticas condiciones de accidente.

Destacan la estructura cerámica de dióxido de plutonio que lo hace extremadamente resistente, una vaina de iridio que lo recubre, manguitos de grafito que incrementan aún más la protección del combustible y el material de fibra de carbono rugoso que configura la caja exterior de contención de las ocho Fuentes de Calor GPHS situadas en el interior del MMRTG, como se ilustra en la figura.

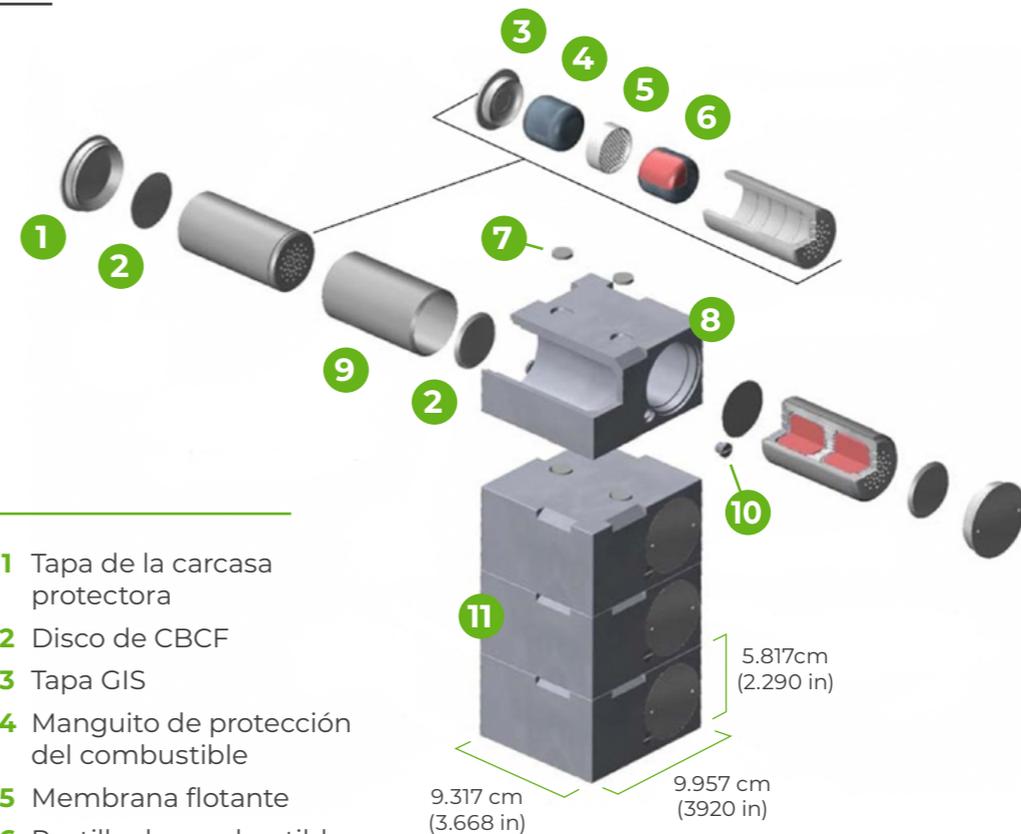
En su interior, el Generador Termoeléctrico de Radisótopos para Misiones Múltiples contiene 4,8 kg de dióxido de plutonio-238, que inicialmente proporcionan unos 2 kW de potencia térmica, equivalentes a los 125 W de potencia eléctrica antes mencionados, en condiciones ambientales del espacio exterior profundo.

Las dimensiones aproximadas del MMRTG son 64 cm de diámetro, medido entre aletas de evacuación de calor, por 66 cm de altura. Pesa aproximadamente 45 kg.

El citado módulo de las Fuentes de Calor GPHS, idéntico al que alimenta al robot *Perseverance*, proporciona protección en la eventualidad de un impacto contra el suelo y en situaciones de reentrada en la atmósfera terrestre que pudieran acabar en un accidente. Los Sistemas de Potencia basados en Radisótopos (RPS) no han ocasionado ningún accidente, pero han estado a bordo de tres misiones espaciales que fallaron por otros motivos. Hay que destacar que, en los tres casos, los RPS funcionaron como estaba previsto en su diseño. Como ejemplo, en 1968 se abortó el despegue de un satélite meteorológico y la cápsula con el radisótopo fue recuperada en tan buen estado que se pudo utilizar en una misión posterior.

Componentes de una Fuente de Calor GPHS.

Fuente: NASA y Departamento de Energía de Estados Unidos



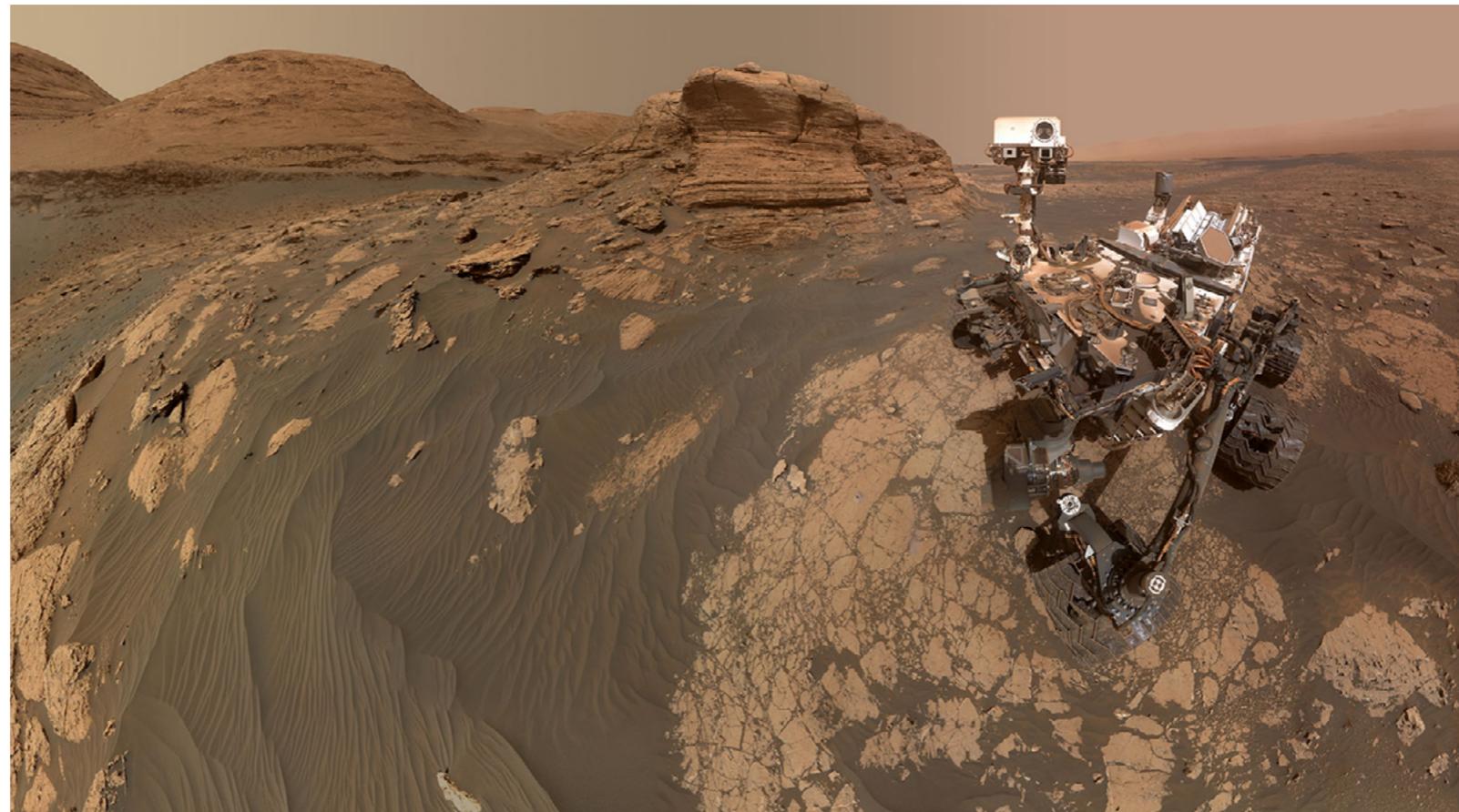
- 1 Tapa de la carcasa protectora
- 2 Disco de CBCF
- 3 Tapa GIS
- 4 Manguito de protección del combustible
- 5 Membrana flotante
- 6 Pastilla de combustible
- 7 Elemento de bloqueo
- 8 Carcasa protectora
- 9 Manguito de fibra de carbono integrada en la matriz de carbono (CBCF)
- 10 Retén roscado
- 11 Módulo individual de GPHS

## Experiencia con Generadores Termoeléctricos de Radisótopos para Misiones Múltiples

La primera misión de la NASA equipada con MMRTG fue el robot *Curiosity*, que se lanzó en noviembre de 2011, alcanzó con éxito Marte el 6 de agosto de 2012 y actualmente se encuentra en servicio, mucho después de la duración prevista. En sus más de 2.700 días de funcionamiento, se ha convertido en el robot más desarrollado que nunca se haya enviado a otro planeta y ya ha alcanzado su objetivo más importante al determinar que su lugar de amartizaje, el cráter Gale, pudo haber sostenido vida microbiana en un pasado remoto.

Mirando hacia el futuro, el MMRTG es también la unidad de potencia seleccionada para la misión *Dragonfly*, un robot aéreo diseñado para explorar la superficie y la densa atmósfera de Titán, la misteriosa luna de Saturno.

El robot *Curiosity* lanzado en 2011 fue equipado con tecnología nuclear por primera vez en la historia



El robot *Curiosity* en la actualidad.  
En la parte trasera se observa su MMRTG, un cilindro blanco con aletas para disipar el calor.

Fuente: NASA