



# GENERADORES TÉRMICOS DE RADIOISÓTOPOS Y SUS APLICACIONES

Revisión histórica del desarrollo de las tecnologías de generación de energía eléctrica basada en el aprovechamiento del calor de desintegración de algunos isótopos radiactivos, y de las tecnologías de conversión del calor de desintegración a energía eléctrica, y que dan lugar a los Sistemas denominados RTG (*Radioisotopes Thermal Generators*).

Se exponen las aplicaciones actuales, las que ha habido en el pasado, y las posibles aplicaciones de futuro de los sistemas RTG, como es su uso para alimentar eléctricamente a las naves y satélites espaciales, los faros y boyas marinas, los rover submarinos, etc.

Se termina exponiendo las características y normativa de seguridad internacional existente para estos sistemas.

## INTRODUCCIÓN

La utilización de los primeros Generadores Térmicos de Radioisótopos (RTG) se remonta a los años 60 en los Estados Unidos. Los primeros diseños se realizaron dentro del proyecto *Systems for Nuclear Auxiliary Power* (SNAP) promovido por la Comisión de energía atómica. Entonces se detectó que el uso de estos dispositivos estaba justificado para abastecer de energía eléctrica a equipos que se encuentran desatendidos durante su operación porque se encuentran en lugares aislados, y que tengan que funcionar durante largos periodos de tiempo, y para los que no sea viable la utilización de otra fuente energética.

Así la utilización de la energía nuclear generada por los RTG tiene como aplicación la producción de energía eléctrica para abastecer a distintos equipos que por su naturaleza deben ser autónomos, al estar apartados de la red eléctrica, como son los satélites y naves espaciales, las boyas marinas, los faros de navegación, los rover submarinos, etc.

La energía para estos equipos puede producirse por alguna de las tres fuentes siguientes: radiación solar, energía nuclear o energía electro-química. La fuente de energía nuclear puede ser de dos tipos: aprovechamiento del calor de desintegración de un radioisótopo (RTG), o el uso de un reactor nuclear de fisión.

La principal ventaja de la energía nuclear frente a la energía solar, es

que su producción es constante e independiente de la hora del día, y de su orientación respecto al Sol. Y también se encuentra menos afectada por el medioambiente lunar que los sistemas fotovoltaicos. En particular, el suministro de energía de forma continua para actividades de exploración en la Luna representa un reto de diseño importante, debido a la duración de la noche lunar. Un día lunar equivale a 28 días terrestres, de manera que la energía solar fotovoltaica tiene aquí una desventaja importante, ya que habría que dotarle de sistemas de almacenamiento de energía.

Cuando la demanda de energía es alta, y es del orden de las decenas de kWe a 1MWe deben utilizarse reactores nucleares. Los reactores nucleares ofrecen larga vida de operación y poca vulnerabilidad a las condiciones medioambientales hostiles. De manera que cuando se precisa un abastecimiento durante más de un mes, y una potencia eléctrica de más de las decenas de kWe la única energía posible son los reactores nucleares.

## HISTORIA DE LAS MISIONES ESPACIALES REALIZADAS

Las misiones con energía nuclear lanzadas por los Estados Unidos comenzaron en 1961 con los SNAP, de los que hubo una serie que fueron recibiendo la nomenclatura de un número par o impar, según llevasen un reactor nuclear a bordo o una fuente de energía de radioisótopos, respectivamente [1].



**CAROLINA AHNERT**

Catedrática de Ingeniería Nuclear, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

Es coautora del Sistema Español de Análisis de Núcleos de Agua a Presión.

## RADIOISOTOPES THERMAL GENERATORS AND ITS APPLICATIONS

An historical review of the technologies for electricity generation using the decay heat of the radioisotopes is done. The technologies to convert the heat into electricity in the RTG (*Radioisotopes Thermal Generators*) Systems are described.

The past, today's and future applications of RTG are described, to provide electricity to equipment in spatial satellites and spacecraft, lighthouse tower and sea bouys, submarine rovers, etc. At the end the safety characteristics and international regulations for RTG are mentioned.



El primer RTG lanzado al espacio por los Estados Unidos fue el SNAP-3 a bordo de la nave espacial *Tránsito 4A* de la Armada americana. A partir de ahí todos los *Apollo-12* a *-17* con misiones lunares, llevaban a bordo un SNAP con generador de radioisótopos como fuente de energía auxiliar (Figura 1). Y uno de los primeros usos terrestres fue en el 1966 en la isla deshabitada Fairway Rock, en Alaska.

De los sistemas lanzados por Estados Unidos algunos se encuentran actualmente fuera de uso y están situados en la órbita de algún planeta, y otros se encuentran todavía en uso y en órbita terrestre como son algunos satélites de navegación o de comunicaciones. Algunos de ellos han tenido algún incidente, o ha sido abortada su misión. Uno de ellos el SNAP-27 que iba a bordo del *Apollo-13*, reentró en la atmósfera y se recuperó después de su caída al Océano Pacífico.

De los sistemas lanzados por la ex-Unión Soviética se pueden destacar los satélites *Cosmos* y *Rorsat*, 6 de ellos llevaban RTG a bordo.

## SISTEMAS DE ENERGÍA NUCLEAR

Los tipos de fuente de energía disponibles para sistemas autónomos son como ya se ha dicho, energía química producida por la reacción hidrógeno-oxígeno, energía solar fotovoltaica, y energía nuclear con energía del calor de desintegración de radioisótopos (RTG), o con reactores nucleares.

Cada uno de estas fuentes de energía tiene unas determinadas prestaciones de potencia eléctrica y de duración, encontrando que la de radioisótopos es adecuada para bajas potencias eléctricas, hasta del orden de 1 kWe y para una duración de varios años, sin embargo los reactores nucleares son la única fuente de energía que puede dar una potencia eléctrica del orden de los MWe, y durante un año o más. Teniendo en cuenta además que la energía solar sólo es factible para misiones próximas al Sol, ya que se debería aumentar en exceso la superficie de los paneles receptores de radiación solar, la energía nuclear es la única factible para ciertas aplicaciones como veremos.

El sistema de conversión del calor de desintegración, o de la fisión nuclear, a energía eléctrica, puede ser de conversión estática: termoele-

trica o termoiónica, o dinámica mediante la utilización de un ciclo Rankine o Stirling.

La combinación de una fuente de calor con alguno de los conceptos de conversión de energía mencionados, es lo que nos dará una cierta tecnología. Normalmente los RTG llevan una conversión estática, y los reactores de fisión una conversión dinámica.

A partir de ahora nos vamos a centrar en este artículo en los generadores térmicos de radioisótopos.

## GENERADORES TÉRMICOS DE RADIOISÓTOPOS

El combustible apto para los generadores de radioisótopos se selecciona por sus características de radiación y sus propiedades físicas. Los requisitos precisados llevan a que de los 1.300 radioisótopos conocidos, nos quedamos con sólo nueve posibles radioisótopos que cumplen los requisitos del combustible [2].

Así para llevar a cabo la selección del radioisótopo se fijan una serie de características que los radioisótopos deben cumplir:

- Radiación de alta energía.
- Periodo de semidesintegración moderado.
- Radiación de fácil absorción.
- Alta densidad de potencia.
- Alta disponibilidad y bajo coste.

Interesan los radioisótopos con periodo de semidesintegración moderado, ya que un periodo de semidesintegración corto supone una gran

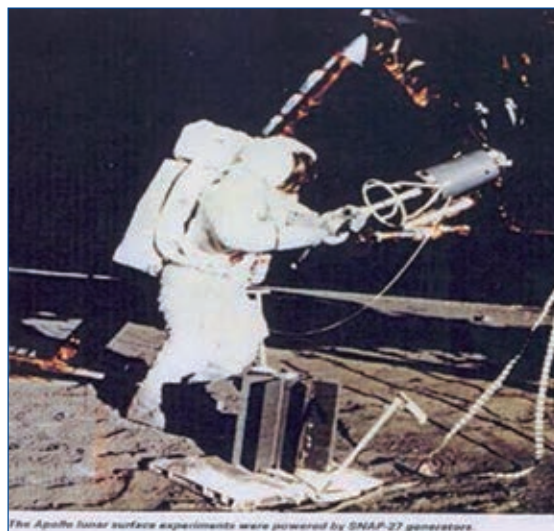


Figura 1.

cantidad de material radiactivo para suministrar la potencia requerida al cabo de unos diez años de misión, y por otro lado, un elemento con un periodo de semidesintegración muy elevado no se desintegrará al ritmo necesario por lo que también supondrá una mayor cantidad de combustible. Por otra parte hay que tener en cuenta que la potencia suministrada por el equipo decae a lo largo del tiempo, con la misma evolución que la cantidad de material radiactivo, se debe sobredimensionar al principio de su operación con una mayor cantidad de combustible que la estrictamente necesaria.

Estos requisitos limitan el número de posibles combustibles a los nueve elementos de la Tabla 1.

De ellos los más adecuados son el Polonio-210 y el Plutonio-238. El Polonio-210 es el combustible utilizado por la ex-Unión Soviética y Rusia, y el Plutonio-238 es el utilizado por los

| Isótopo      | Vida media (años) | Densidad Potencia (W/gr) | Temperatura Fusión (°C) | Radiación |
|--------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| Estroncio-90 | 29                | 0,93                     | 770                     | β         |
| Cesio-137    | 30                | 0,26                     | 28                      | β         |
| Cerio-144    | 0,78              | 25                       | 800                     | β         |
| Promecio-147 | 2,5               | 0,36                     | 1.300                   | β         |
| Polonio-210  | 0,38              | 141                      | 254                     | α         |
| Plutonio-238 | 87,7              | 0,55                     | 640                     | α         |
| Curio-242    | 0,45              | 121                      | 950                     | α         |
| Curio-244    | 18                | 2,8                      | 950                     | α         |
| Americio-241 | 462               | 0,114                    | 1.176                   | α         |

Tabla 1.

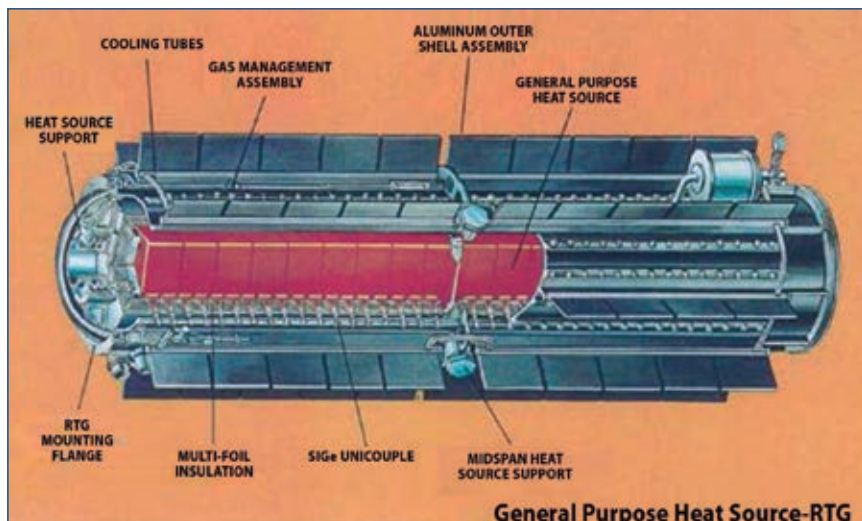


Figura 2.

Estados Unidos, en forma de metal u óxido.

El Plutonio-238 es un radioisótopo artificial y es obtenido mediante captura radiativa por el Neptunio-237 en un reactor nuclear, y su cadena de desintegración presenta varias desintegraciones alfa y beta, acabando en el Plomo-206 que es estable.

La separación del Plutonio-238 es muy compleja, y actualmente las reservas de este radioisótopo son escasas. Pero sólo precisan unos 2,5 mm de blindaje de plomo, y se ha convertido en el combustible mas ampliamente utilizado para los RTG, en forma de óxido de plutonio.

El Estroncio-90 también requiere poca protección, pero su vida media es mucho más corta. Sin embargo es un producto de la fisión nuclear y está disponible en grandes cantidades a un precio bajo.

También algunos RTG construidos en 1958 en los Estados Unidos han utilizado el Polonio-210. Este isótopo proporciona alta densidad de potencia por su alta actividad radiactiva, pero tiene un uso limitado debido a su corta vida media. Un kilogramo de Polonio-210 puro en forma de cubo tendría unos 48 mm de lado y emite cerca de 140 kW.

Los isótopos Curio-242 y -244 también han sido estudiados, pero re-

quieren mayor blindaje por su radiación gamma y por los neutrones producidos por la fisión espontánea.

El Americio-241 es un potencial candidato con una vida media más larga que el Plutonio-238, y podría hipotéticamente alimentar un dispositivo durante siglos. Sin embargo, la densidad de potencia es sólo 1/4 de la del Plutonio-238, y produce una radiación penetrante por los productos de su cadena de desintegración y necesita unos 18 mm de blindaje de plomo. Pero por la escasez actual de Plutonio-238, se está estudiando su uso.

## SISTEMAS DE CONVERSIÓN A ENERGÍA ELÉCTRICA

Los sistemas de conversión de energía estáticos usados en los RTG, están basados en termopares o en convertidores termoiónicos.

Existen varias tecnologías que permiten la conversión de la energía de la desintegración nuclear en energía eléctrica. La alternativa más usada es la conversión termoeléctrica mediante el efecto Seebeck, utilizando una matriz de termopares. Los termopares se colocan en las paredes del recipiente, con el extremo exterior de cada termopar conectado a un dissipador de calor. El decaimiento radiactivo del combustible produce calor que fluye a través de los termopares hacia el dissipador de calor, generando electricidad en el proceso. Así el convertidor termoeléctrico está formado por un termopar de germanio-silicio, plomo y telurios de antimonio, germanio y plata, que se calienta por un extremo y se refrigera por el otro, produciéndose una corriente eléctrica.

La conversión mediante termopares es una tecnología que se lleva usando durante más de 50 años con total éxito, pero presenta el inconveniente de un bajo rendimiento, de sólo alrededor del 6%.

Un ejemplo de convertidor termoeléctrico es el utilizado en los generadores térmicos de radioisótopos, donde el combustible es óxido de Plutonio-238 que está situado en el centro de un cilindro, que va rodeando por su superficie externa con toda una serie de termopares de germanio-silicio (Figura 2).

Cuando se aplica la conversión termoeléctrica para una fuente de calor de reactor nuclear, se precisa un circuito de refrigeración que

| Año       | Misión/ Nave                                   | Tipo de Nave                                        | Potencia (Wt) y cantidad | Isótopo           |
|-----------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1969      | Apollo 11                                      | Experimentos en superficie lunar                    | 15W x 2                  | <sup>238</sup> Pu |
| 1970 & 73 | Lunokhod I and II                              | Rover Lunar                                         | 800W x 1 por nave        | <sup>210</sup> Po |
| 1972 & 73 | Pioneer 10 and 11                              | Interplanetario- Jupiter, Saturno.                  | 1W x 12 por nave         | <sup>238</sup> Pu |
| 1977      | Voyager 1 and 2                                | Interplanetario – Jupiter, Saturno Uranus, Neptune. | 1W x 9 por nave          | <sup>238</sup> Pu |
| 1989      | Galileo                                        | Interplanetario- Jupiter                            | 1W x (103+17)            | <sup>238</sup> Pu |
| 1990      | Ulysses                                        | Interplanetario - Sol                               | 1W x 35                  | <sup>238</sup> Pu |
| 1996      | Mars 96 (fallo en lanzamiento)                 | Superficie Marciana                                 | 8.5W x 2 por módulo      | <sup>238</sup> Pu |
| 1997      | Cassini-Huygens                                | Interplanetario – Saturno/Titan                     | 1W x (82+35)             | <sup>238</sup> Pu |
| 1997      | Mars Pathfinder Sojourner Rover                | Rover Marciano                                      | 1W x 3                   | <sup>238</sup> Pu |
| 2003      | Mars Exploration Rovers (Spirit y Opportunity) | Rover Marciano                                      | 1W x 8 por rover         | <sup>238</sup> Pu |

Tabla 2.



transfiera el calor generado en el reactor hasta el sistema convertidor termoelectrónico.

El otro sistema de conversión de energía estático es el termoiónico, que está basado en la utilización de un par de materiales emisor-colector, el emisor es un material que es calentado por la fuente de calor y que al calentarse emite electrones que son recogidos por el colector que es refrigerado, generándose entre ambos materiales una corriente eléctrica. Como material emisor se utiliza el wolframio o el molibdeno, y como material colector el niobio o el molibdeno.

Los termopares son muy fiables y de larga duración, pero son muy ineficientes, nunca se han logrado rendimientos superiores al 10%, y la mayoría de los RTG tienen eficiencias de entre 3-7%. Un convertidor termoiónico puede lograr eficiencias entre 10-20%, pero requiere temperaturas más altas que aquellas a las que se operan los RTG estándar. Sólo algunos RTG de Polonio-210 prototipo lo han conseguido.

### APLICACIONES

Las aplicaciones conocidas de los RTG son las siguientes:

#### 1. Suministro de energía eléctrica a satélites de comunicaciones, y sondas espaciales no tripuladas

Los satélites considerados próximos a la Tierra, incluyen operaciones de tránsito de órbitas próximas a la Tierra a órbitas geosíncronas, y de órbitas ecuatoriales a polares. Los satélites en órbitas próximas a la Tierra realizan misiones de detección remota, vigilancia, e investigación; mientras los situados en órbitas geosíncronas son fundamentalmente satélites de comunicaciones, y entre unas y otras órbitas se encontrarán los satélites de navegación. Todos estos satélites típicamente utilizan paneles solares y baterías ligeras para producir la energía necesaria. Los satélites de navegación constituyen la mayor proporción de los satélites comerciales en órbita terrestre, mientras que los satélites militares comprenden la mayor parte del resto.

#### 2. Suministro de energía eléctrica a Naves espaciales

Las misiones espaciales cubren desde el desarrollo y exploración de misiones próximas a la Tierra, hasta misiones planetarias en el Sistema Solar Externo, pero el éxito de todos estos objetivos, recae en el desarrollo de

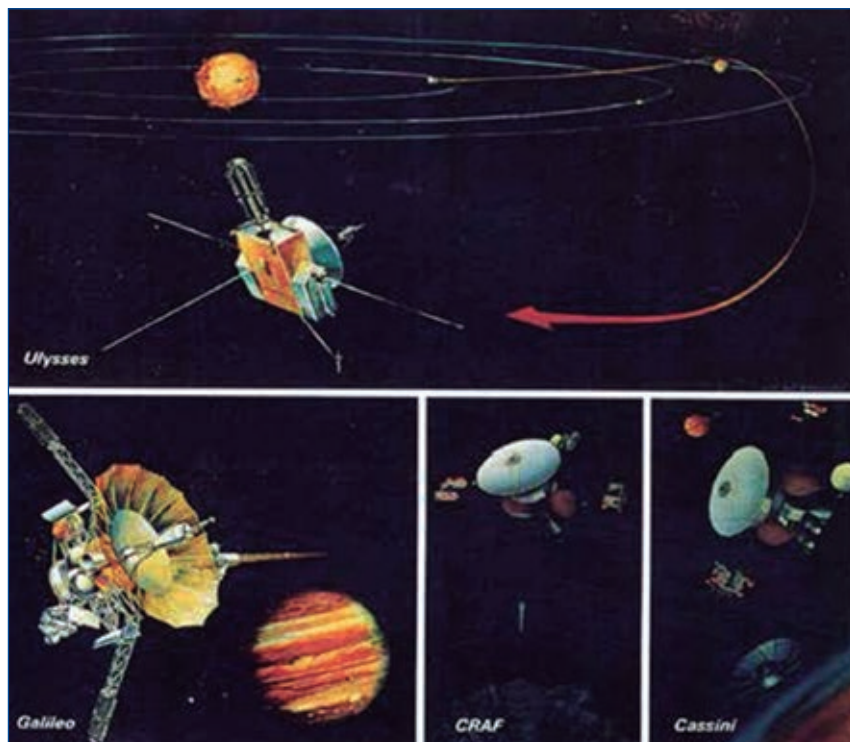


Figura 3.

sistemas que cubran lo que es su necesidad común, la disponibilidad de energía suficiente, energía que debe estar disponible cuando y donde sea necesaria.

La oficina de exploración de la NASA examina actualmente la posibilidad de poner una base humana permanente en la Luna, como paso previo a una misión tripulada a Marte. Estas bases tendrán una gran variedad de necesidades energéticas, para abastecer a la propia base, y para las actividades a realizar en lugares lejanos de la base, tales como minería o exploración. Las misiones llevan a bordo un conjunto de equipos que cubren objetivos militares y civiles.

Actualmente las misiones de la NASA próximas a la Tierra, usan satélites en órbita para coleccionar datos de las condiciones ambientales como soporte a los estudios globales del cambio climático, y el Departamento de Defensa americano emplea y planea aumentar sus satélites en órbita terrestre para cubrir funciones de vigilancia, navegación y comunicaciones, como soporte a las misiones y objetivos militares.

Las misiones robóticas planetarias son en principio precursoras de las misiones a la Luna y a Marte, y se dirigirán en primer lugar a los distintos planetas. El otro conjunto de misiones científicas robóticas tendrá un rango

más amplio de objetivos, pero ciertamente el objetivo último será explorar los planetas del Sistema Solar Externo, es decir, Júpiter, Plutón, etc.

Los escenarios de las misiones civiles se pueden agrupar en:

- Las misiones en órbitas terrestres LEO y HEO.
- Misiones al sistema solar interno que cubre desde Mercurio a Marte, y la misión a la Luna.
- Misiones al Sistema Solar Externo, que cubre desde los planetas Júpiter a Plutón.

Actualmente ya han sido realizados vuelos de reconocimiento a todos los planetas excepto Plutón, también ya se han realizado vuelos de exploración a Venus y Marte del Sistema Solar Interno, y existen vuelos de exploración que son alimentados con fuentes de energía nuclear a Júpiter y Saturno del Sistema Solar Externo (Tabla 2).

La misión *Galileo* que se lanzó en 1989, está explorando Júpiter y constituyó el primer paso en la exploración del Sistema Solar Externo, y el próximo paso han sido las misiones *CRAF* y *Cassini*. Así en 1996 se lanzó la misión *CRAF* que investiga el Sistema Solar Interno situándose en la órbita de un cuerpo primitivo, y en 1997 la misión *Cassini* que investiga el Sistema Solar Externo, en concreto el planeta Saturno, y en 1990 se lanzó la misión *Ulysses* (Figura 3 y 4).



### 3. Detectores de humo y pararrayos

Se han utilizado en el pasado estos equipos que llevaban una fuente de Americio-241, pero se emitió hace años una norma del Consejo de Seguridad Nuclear por la que debían desmantelarse, para evitar su mal uso y su desecho de forma inadecuada.

Así en España se retiraron todos ellos hace años, y se ocupó Enresa de su retirada y almacenamiento.

### 4. Suministro de energía eléctrica a boyas marinas.

La utilización de un RTG puede proporcionar por ejemplo energía eléctrica a una boya típica situada a 400 metros de profundidad y que deberá funcionar durante diez años.

La localización de la boya hace que durante parte del año las horas de sol sean escasas o nulas, por lo que la utilización de paneles fotovoltaicos para obtener energía eléctrica podría no ser suficiente para conseguir la energía eléctrica necesaria. Si además la boya está sumergida a una cierta profundidad, la energía solar no puede ser utilizada como fuente energética. Y debido a la corta vida de las baterías que se precisarían para alimentar eléctricamente a toda la instrumentación de la boya, la utilización de un generador térmico de radioisótopos supone una buena alternativa.

### 5. Suministro de energía eléctrica a faros de navegación marina

Fue especialmente la URSS quien desarrolló los RTG para su utilización en este ámbito naval, con alrededor de 1000 unidades instaladas. Sobre todo fueron usados en los faros de la zona norte de Rusia, cercana al círculo polar. Actualmente se encuentran sin mantenimiento y abandonados a su suerte, con el posible riesgo de contaminación radiactiva, por robo, manipulación, etc.

Estos dispositivos son inseguros, sobre todo tras la desaparición de la URSS, al estar situados en zonas deshabitadas durante largo periodo de tiempo, pues podrían filtrar combustible nuclear al exterior o ser objeto de robo. Algunos de ellos han sido presa de los chatarreros, que desmontan las partes metálicas externas sin tener en cuenta el riesgo de contaminación radiactiva al que se exponen.

### 6. Suministro de energía eléctrica para sumergibles o rovers submarinos

Existe esta aplicación potencial, pa-

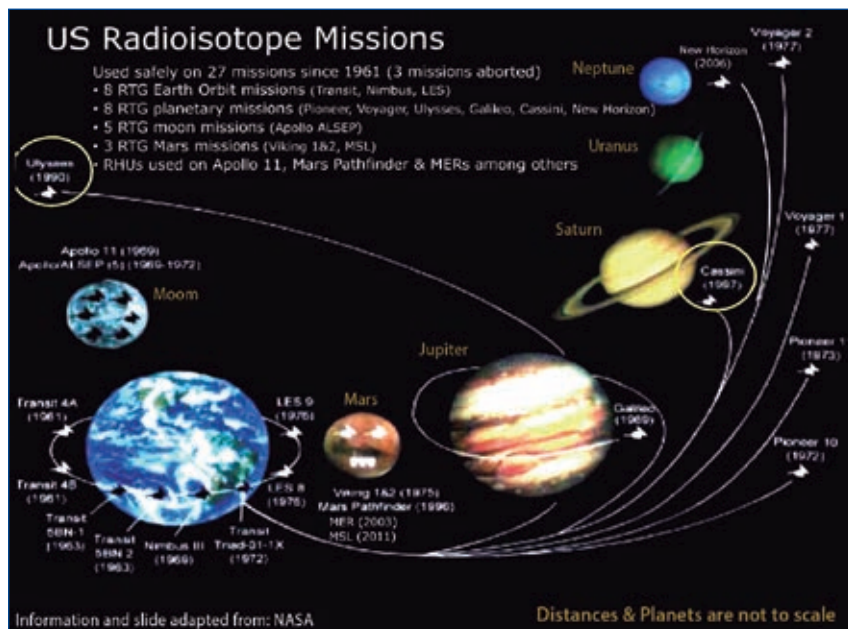


Figura 3.

ra cuando las baterías no son capaces de suministrar la energía requerida debido a la duración de la misión a realizar.

## SEGURIDAD NUCLEAR Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Después del último accidente del Cosmos en el año 1978, y tras 13 años de negociaciones se acordaron unos principios de seguridad para el uso de la energía nuclear en el espacio, que se recogen en la resolución 47/68 de la Asamblea General de Naciones Unidas emitida el 14 de diciembre de 1992 [3].

La filosofía de seguridad del programa de exploración espacial debe regirse por la reducción del riesgo a niveles tan bajos como sea razonablemente alcanzable (criterio Alara). En el sistema de seguridad se establecerá e incluirá un seguimiento y evaluación continua de las características de seguridad, se suministrará una vigilancia independiente y se establecerán unas líneas claras de autoridad, responsabilidad y comunicaciones.

Para las misiones con RTG se establece lo siguiente:

- Pueden empezar su operación incluso en el momento de salir de la tierra, o en órbita terrestre.
- Su almacenamiento a largo plazo debe realizarse en una "órbita profunda" con mínimo riesgo de choque con otras misiones.
- No debe producirse dispersión de material radiactivo en caso de impacto terrestre.

- Se deben reducir las misiones con energía nuclear a las que sean necesarias y que tengan como objetivo el beneficio común de los Estados miembros.

- Se establecen unas obligaciones en caso de accidente como son, información a los países afectados, asistencia técnica mutua y unas condiciones de responsabilidad.

La dosis al público en operación normal debe estar dentro del objetivo de dosis máxima marcado por la ICRP, y en caso de accidente la dosis debe ser menor de 1 mSv/año. Para la dosis a la tripulación, la dosis total al cuerpo máxima permitida será de 500 mSv/año, de los cuales 50 mSv/año serán procedentes de las fuentes de radiación a bordo, dejando el resto para la dosis procedente de la radiación cósmica ambiental.

Se establecen también algunos requerimientos respecto a la liberación de radiactividad de la fuente de energía a bordo, la radiación no debe dañar al equipo de la nave espacial, no debe contribuir significativamente sobre un período prolongado de tiempo al medioambiente espacial local y debe tener un efecto insignificante en la Tierra.

Más recientemente se ha aprobado el 19 de mayo de 2009, por la Subcomisión Científica y Técnica de Copuos (Comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos de la ONU), en colaboración con el Organismo Interna-



cional de Energía Atómica (OIEA), el denominado *Marco de seguridad relativo a las aplicaciones de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre* cuyas directrices son un complemento a lo dispuesto en la declaración de 1992. Y que se refiere fundamentalmente a la justificación de las aplicaciones de la energía nuclear en el espacio, la autorización del lanzamiento, la preparación y respuesta en caso de emergencia.

Los RTG representan un riesgo de contaminación radiactiva, si se producen fugas de combustible, pues el material radiactivo puede contaminar el medio ambiente. La radiación alfa emitida por cualquiera radioisótopo no penetrará en la piel, pero puede irradiar órganos internos con plutonio si se inhala o se ingiere.

Ha habido varios accidentes que han afectado a conocidas naves con RTG:

- El primero de ellos fue un error en el lanzamiento el 21 de abril de 1964, en la que el satélite de tránsito 5BN-3 de navegación de EE.UU. no logró alcanzar la órbita y se

quemó al reentrar en la atmósfera al norte de Madagascar. Como consecuencia de ello 17.000 Ci de plutonio de combustible metal en su SNAP-9A se inyectó en la atmósfera en el hemisferio sur.

- El segundo fue el B-1 satélite meteorológico *Nimbus*, cuyo vehículo de lanzamiento fue destruido deliberadamente poco después de su lanzamiento el 21 de mayo 1968, debido a su trayectoria errónea. Lanzado desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, el SNAP-19 que contenía dióxido de plutonio fue recuperado intacto desde el fondo del mar en el Canal de Santa Bárbara cinco meses después, y no se detectó contaminación en el medioambiente.

Para reducir al mínimo el riesgo de que el material radiactivo sea liberado, el combustible se almacena en unidades modulares individuales con blindaje. Y están rodeados por una capa de metal de iridio y encerrado en bloques de grafito de alta resistencia.

Muchos RTG con radioisótopos emisores beta producidos por la Unión Soviética para faros y balizas se han convertido en fuentes huérfanas de radiación. Y varias de estas unidades han sido desmanteladas ilegalmente para chatarra.

Sin embargo no existen riesgos asociados a la proliferación nuclear del Plutonio-238. Esto es debido a que tiene una alta tasa de fisión espontánea en comparación con la del Plutonio-239, y su presencia actúa como un contaminante degradando su rendimiento. ■

- [1] A. Angelo, D. Burden, "Space Nuclear Power", Orbit (1985)
- [2] Symposiums on Space Nuclear Power Systems, American Institute of Physics, varios años.
- [3] Anexos VI y VII de "Curso general sobre derecho espacial" E. González Ferreiro, R. Moro, IIDAEAC (2011)