



Asamblea General

Distr. limitada
8 de diciembre de 2010
Español
Original: inglés

Comisión sobre la Utilización del Espacio

Ultraterrestre con Fines Pacíficos

Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos

48º período de sesiones

Viena, 7 a 18 de febrero de 2011

Tema 10 del programa provisional*

**Utilización de fuentes de energía nuclear
en el espacio ultraterrestre**

Curso práctico sobre la utilización de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre: el enfoque de los Estados Unidos con respecto a la evaluación de los riesgos y su papel en la ejecución de un programa de seguridad eficaz relativo a las aplicaciones de las fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre

Documento presentado por los Estados Unidos de América**

Resumen

Los Estados Unidos de América someten todo proyecto de aplicación de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre a un proceso de análisis de la seguridad y de evaluación de los riesgos con arreglo a la orientación pertinente recomendada en el Marco de seguridad relativo a las aplicaciones de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, que en 2009 publicaron en forma conjunta la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos y el Organismo Internacional de Energía Atómica. El análisis de la seguridad de las fuentes de energía nuclear que se realiza en los Estados Unidos comienza con un estudio del vehículo de lanzamiento, la nave espacial, el diseño de la misión y las normas sobre el lanzamiento. Esa información se utiliza para caracterizar diversas situaciones hipotéticas de accidente, sobre la base de las cuales se crea un entorno en el que podrían ocurrir accidentes en el

* A/AC.105/C.1/L.306.

** El presente documento se basa en el documento de sesión A/AC.105/C.1/2011/CRP.5.



lanzamiento y se calculan las probabilidades de que efectivamente ocurran accidentes de esa índole. Los ensayos de seguridad de los componentes de las fuentes de energía nuclear y el establecimiento de modelos de la mecánica de medios continuos se utilizan para comprender cómo las fuentes de energía nuclear y el combustible nuclear responderán en diversas situaciones hipotéticas de accidente. El entorno del accidente, las probabilidades de un accidente, los resultados de los ensayos de seguridad y las simulaciones informáticas se combinan en un análisis de la seguridad para caracterizar los riesgos de la misión. Posteriormente, un grupo de expertos nacionales independientes de la misión examina dicho análisis. Los resultados de ese examen y las observaciones en él contenidas se tienen en cuenta en una repetición de la seguridad, que a su vez se somete de nuevo a un examen independiente. Ese proceso de análisis y examen de la seguridad nuclear propicia el perfeccionamiento constante de la evaluación de los riesgos de la misión y facilita la determinación de posibles mejoras de seguridad en el diseño de la misión y en futuros diseños de fuentes de energía nuclear.

I. Introducción

1. El Departamento de Energía de los Estados Unidos suministra sistemas de energía nuclear espaciales a la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) para que esta los utilice en misiones espaciales civiles con necesidades especiales en lo que respecta a la energía eléctrica y térmica de la nave espacial. Esas fuentes de energía pertenecen a dos categorías generales, a saber, los sistemas energéticos radioisotópicos para producir energía eléctrica o los calefactores radioisotópicos para el calentamiento de componentes. Los sistemas energéticos radioisotópicos son compactos y ligeros, tienen una vida útil larga y son sumamente fiables. Permiten realizar misiones espaciales cuando no es práctico utilizar la energía solar. En el momento de la redacción del presente documento, el programa espacial de los Estados Unidos tenía dos tipos de sistemas energéticos radioisotópicos: el generador termoeléctrico radioisotópico y el generador avanzado radioisotópico Stirling (ASRG). En todas las misiones anteriores de los Estados Unidos realizadas con sistemas energéticos radioisotópicos se han utilizado generadores termoeléctricos radioisotópicos. El ASRG está todavía en fase de experimentación.

2. A menudo, los planetas y lunas y su superficie son distantes y están en la sombra del Sol o tienen un medio difícil. La utilización de sistemas energéticos radioisotópicos es hoy por hoy el único medio de que se dispone para realizar esas exploraciones. Sin embargo, los radioisótopos plantean un peligro. Desde el comienzo de la era espacial, cuando en enero de 1959 se mostró un SNAP-3 sobre el escritorio del Presidente Eisenhower, la seguridad ha sido y sigue siendo un aspecto esencial del programa de los Estados Unidos relativo al uso de la energía nuclear en el espacio¹. Los Estados Unidos, al realizar esas exploraciones en los últimos 50 años, han aprovechado esa energía, han evaluado los posibles peligros, han controlado los riesgos y han ampliado con éxito y en forma segura sus conocimientos sobre el sistema solar, de conformidad con el Marco de seguridad relativo a las aplicaciones de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre (A/AC.105/934). En el presente documento se analiza el modo en que el Departamento de Energía realiza sus análisis de la seguridad de los lanzamientos relacionados con fuentes de energía nuclear.

II. Aspectos de la seguridad nuclear

3. En los sistemas energéticos radioisotópicos y los calefactores radioisotópicos se utiliza combustible a base de dióxido de plutonio (PuO_2) y el calor se produce sobre todo por la desintegración alfa de plutonio-238 (Pu-238). La radioactividad del PuO_2 puede plantear peligros durante el lanzamiento y funcionamiento de las naves espaciales que utilicen esos sistemas, en caso de que se produzca un accidente en la misión. Por tal motivo, el Departamento de Energía y la NASA consideran que la seguridad es una característica intrínseca del diseño, la fabricación y la aplicación de sistemas de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, de conformidad con lo dispuesto en la sección 5.2 del Marco de seguridad. Las características del diseño

¹ Estados Unidos de América, Departamento de Energía, *Atomic Power in Space: A History* (Washington, D.C., 1987), pág. 17.

denotan la atención prestada a la cuestión de la seguridad, por ejemplo un radioisótopo de fácil aislamiento (Pu-238); una forma de combustible de radioisótopos (un óxido que es resistente, químicamente estable, insoluble y capaz de soportar altas temperaturas antes de derretirse); y barreras químicamente estables (revestimientos dúctiles de iridio y compuestos de carbono-carbono resistentes a altas temperaturas) a fin de minimizar las posibilidades de riesgo para el público. En la figura 1² se muestran las múltiples capas de protección que rodean al combustible. En los sistemas energéticos radioisotópicos de los Estados Unidos, una pastilla de combustible de PuO₂ encapsulada en iridio se conoce como vaina combustible. Se colocan dos vainas combustibles en fila dentro de un casquillo de grafito a prueba de impactos hecho de un compuesto de carbono-carbono llamado en inglés *fine weave pierced fabric* (FWPF). El casquillo de grafito protege las vainas combustibles en caso de impacto. Ese casquillo está envuelto en un material de carbono térmicamente resistente destinado a proteger el combustible del calor de la reentrada y otros peligros térmicos. Dos casquillos de grafito a prueba de impactos térmicamente aislados se colocan dentro de un módulo de fuente térmica de uso general (FTUG) hecho de FWPF. Ese módulo de FTUG impide la liberación de combustible durante la reentrada en la atmósfera y protege al combustible en caso de impacto. Un sistema energético radioisotópico puede tener apilados varios módulos de FTUG. Todas esas características de seguridad intrínsecas se complementan con ensayos de seguridad para evaluar la respuesta de los sistemas en situaciones hipotéticas de accidente.

4. La seguridad de los sistemas de energía nuclear en el espacio ultraterrestre no puede desvincularse de las características de seguridad integradas del vehículo de lanzamiento, la etapa superior, la nave espacial, los sistemas de terminación del vuelo y el perfil de la misión. La NASA cuenta con un amplio programa para asegurar la fiabilidad de los vehículos de lanzamiento y las naves espaciales. Ese enfoque integrado de la seguridad tiene otros elementos importantes que son el apoyo a la organización de la seguridad en el polígono de lanzamiento y las actividades conexas de planificación para hacer frente a imprevistos antes y durante el lanzamiento.

5. El Departamento de Energía realiza evaluaciones de las probabilidades de riesgo para determinar las posibles respuestas del equipo en caso de accidente y caracterizar cualquier posible liberación de combustible del sistema energético radioisotópico. Los modelos de transporte y dispersión atmosféricos de la liberación de combustible postulada se utilizan para calcular las posibilidades de exposición humana al combustible y las consecuencias y riesgos ulteriores en relación con toda una gama de situaciones hipotéticas de accidente.

² Véase la figura 1 en el documento A/AC.105/C.1/2011/CRP.5, disponible en www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html.

III. Ensayos de seguridad de los sistemas nucleares

6. De conformidad con la sección 5.2 c) del Marco de seguridad, la evaluación de riesgos que los Estados Unidos realizan en relación con los lanzamientos de sistemas nucleares está respaldada por más de 30 años de ensayos de seguridad, desde los realizados a nivel de componentes hasta los que abarcan las secciones de convertidores completas. Los ensayos de seguridad se han centrado en la respuesta de la vaina combustible a diversos problemas. En general, la respuesta de la vaina combustible se expresa en términos de una distorsión total del recubrimiento, las dimensiones de las grietas (si las hay) y la distribución del tamaño de las partículas de PuO_2 . Entre los ensayos de seguridad figuran los siguientes:

a) *Ensayos de sobrepresión explosiva.* Los primeros ensayos consistieron en ensayos con tubos de choque y se conocen también como ensayos de sobrepresión explosiva. Con esa serie de ensayos se evaluaron los efectos del impacto de una onda de choque en un módulo de FTUG o un generador termoelectrónico radioisotópico a consecuencia de una explosión. El módulo de ensayo se situó con una de las superficies laterales normales orientada en la dirección de la propagación de la onda de choque. Se colocaron a ambos lados, con fines de simulación, bloques de grafito para simular un conjunto de tres módulos. Las vainas combustibles en el módulo de ensayo se llenaron con un simulador de combustible de dióxido de uranio (UO_2);

b) *Ensayos con fragmentos y proyectiles.* Se realizaron ensayos con fragmentos para determinar los efectos del impacto de pequeños fragmentos y proyectiles en FTUG como consecuencia de una explosión en el vehículo de lanzamiento. Primero se realizaron ensayos con placas de FWPF para determinar la atenuación de la velocidad causada solamente por el módulo de FTUG. Después, se realizaron ensayos en los que el blanco era la mitad de un módulo, utilizando balas de aluminio. Además, en esa serie de ensayos se estudiaron los efectos del impacto de balas de titanio en vainas sin recubrimiento;

c) *Ensayos de caída.* Se realizaron ensayos de caída desde un helicóptero durante el diseño del módulo de FTUG a fin de determinar la velocidad terminal de ese módulo y estudiar cómo caería en tierra;

d) *Ensayos de incendio con propulsante sólido.* Se expusieron dos componentes de un módulo de FTUG durante un tiempo prolongado al fuego de un cubo grande de propulsante sólido. Esos componentes, una vaina combustible sin recubrimiento y un conjunto a prueba de impactos compuesto por un casquillo de grafito a prueba de impactos con dos vainas combustibles, se colocaron a ambos lados del bloque del propulsante y se expusieron directamente al fuego. En ambos componentes se utilizó un simulador de combustible UO_2 ;

e) *Ensayos de impacto en vainas sin recubrimiento.* Se realizaron ensayos de impacto en vainas sin recubrimiento para determinar la respuesta de la vaina combustible y del combustible a impactos en diferentes medios. Las condiciones de los ensayos se concibieron de manera tal que reflejaran las que podrían resultar de un accidente en la plataforma de lanzamiento o durante la primera etapa del ascenso. Se realizaron ensayos de impacto en vainas sin recubrimiento con vainas combustibles que contenían UO_2 o PuO_2 ;

f) *Ensayos de impacto en la fuente térmica de uso general.* El ensayo de impacto en un módulo de FTUG se concibió para simular la reentrada en la atmósfera y el ulterior impacto en la Tierra que experimentaría un módulo de FTUG luego de la interrupción de la operación en órbita. Se retiró una pequeña capa de grafito de todas las superficies exteriores de los módulos de FTUG utilizados en esos ensayos. La cantidad de grafito retirada equivalía al doble del espesor previsto del material que se perdería durante una reentrada accidental. Todas las vainas combustibles dentro de los módulos de FTUG se llenaron de combustible PuO_2 . Los módulos se sometieron a un calor cuyas características eran las previstas durante la reentrada antes del impacto, a la velocidad prevista de la reentrada. En esos ensayos se usaron diversos ángulos de impacto. Los módulos hicieron impacto en acero;

g) *Ensayos con fragmentos grandes.* En los ensayos con fragmentos grandes se estudia el impacto de un fragmento grande de la cubierta de un vehículo de lanzamiento en la simulación de una sección de un generador termoeléctrico radioisotópico. Se realizó una serie de ensayos con plataformas deslizantes impulsadas por cohetes para simular el impacto de un fragmento grande. Se colocó una fuente térmica simulada dentro del generador termoeléctrico radioisotópico simulado y se calentó hasta alcanzar una temperatura anterior al lanzamiento en el momento del impacto. El generador termoeléctrico radioisotópico simulado consistió en un conjunto de ocho módulos de FTUG, con dos módulos que contenían simuladores de vainas combustibles de UO_2 y seis módulos de grafito en bruto, que contenían varias barras de molibdeno sólido en lugar de las vainas combustibles;

h) *Ensayos con placas voladoras.* En los ensayos con placas voladoras se utilizó un fragmento delgado en forma de placa para que hiciera impacto frontal en una vaina combustible llena de un simulador de combustible UO_2 . La placa estaba hecha del tipo de aluminio utilizado en las naves espaciales. Las vainas combustibles utilizadas en los primeros tres ensayos eran de las que habían quedado de uno de los ensayos con tubos de choque. Antes del ensayo se calentaron las vainas combustibles para lograr que tuvieran la temperatura que alcanzan antes del lanzamiento;

i) *Ensayos de impacto lateral con placas voladoras.* En los ensayos de impacto lateral con placas voladoras se simuló el impacto de grandes fragmentos en forma de placa en módulos de FTUG con carga completa, así como en vainas combustibles sin recubrimiento. Todas las vainas contenían un simulador de combustible UO_2 . Las placas se impulsaron hacia su blanco usando una configuración de impacto lateral con una plataforma deslizante;

j) *Ensayos de impacto posterior con un generador termoeléctrico radioisotópico.* El propósito de los ensayos de impacto posterior con un generador termoeléctrico radioisotópico era obtener datos de ensayo sobre la distorsión de las vainas combustibles en comparación con la de los módulos de FTUG en posición de pila en el generador termoeléctrico radioisotópico y la variabilidad de la distorsión en cada posición. Un objetivo secundario fue obtener datos sobre la liberación fraccional del simulador de combustible en caso de ruptura de la vaina combustible. Se calentó un generador termoeléctrico radioisotópico simulado con una pila de nueve módulos simulados de FTUG cargados de vainas combustibles de UO_2 para que tuviera la temperatura que alcanza antes del lanzamiento. En el ensayo se utilizó

una plataforma deslizante accionada por un cohete para impulsar el generador termoeléctrico radioisotópico simulado en dirección de un blanco concreto;

k) *Ensayos de la ductilidad del iridio.* Las vainas combustibles usadas para encapsular el combustible PuO_2 están hechas de iridio. Para conocer mejor las propiedades del material con que se hacen las vainas, se realizaron ensayos de tensión a diversas temperaturas para caracterizar la respuesta del iridio en cuanto a la temperatura y el grado de deformación;

l) *Ensayos de caracterización del incendio de propulsores sólidos.* Se realizó una serie de ensayos para estudiar y caracterizar los entornos por debajo y cerca de diversos propulsores sólidos cuando arden en condiciones atmosféricas y para medir la respuesta de diversos materiales isotópicos o sus sucedáneos a esos entornos.

IV. Análisis de la seguridad nuclear

7. En los Estados Unidos, los sistemas de energía nuclear espaciales son objeto de varios tipos de exámenes ambientales y de seguridad durante su diseño y aplicación como los descritos en la sección 5.3 del Marco de seguridad. Esos exámenes se centran en el informe sobre el análisis de la seguridad y en otros documentos conexos que se preparan como parte del proceso de aprobación del lanzamiento. Entre los elementos de esos documentos que son importantes en los procesos de examen figuran los siguientes:

a) *Libro de datos del vehículo de lanzamiento.* La NASA prepara para cada misión un libro de datos del vehículo de lanzamiento para que el Departamento de Energía lo utilice en la realización de análisis y la preparación de los informes sobre el análisis de la seguridad en el marco del proceso de aprobación de los lanzamientos. El libro de datos contiene información de referencia detallada sobre el diseño de la misión, el vehículo de lanzamiento, la nave espacial, el polígono de lanzamiento y el cronograma y trayectoria de la misión. Además, en él se definen los distintos posibles accidentes y sus entornos (explosión por sobrepresión, bola de fuego, fragmentos, impacto y reentrada), así como las probabilidades al respecto;

b) *Informe sobre el análisis de la seguridad.* El Departamento de Energía analiza en forma oficial cada misión en que se prevé utilizar un sistema de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, a fin de evaluar la seguridad nuclear y los posibles riesgos de la misión. Los análisis de la seguridad se documentan en informes sobre el análisis de la seguridad que se repiten en tres niveles como parte del proceso de aprobación del lanzamiento. Esos informes constan de un informe preliminar sobre el análisis de la seguridad, un proyecto de informe sobre el análisis de la seguridad y un informe final sobre el análisis de la seguridad;

c) *Informe de evaluación de la seguridad.* Como parte del proceso de aprobación del lanzamiento, un grupo externo, denominado Grupo interinstitucional de examen de la seguridad nuclear, examina el libro de datos de la NASA y el informe del Departamento de Energía sobre el análisis de la seguridad y realiza una evaluación independiente de la seguridad de la misión. El Grupo documenta el examen y la evaluación independiente en el informe de evaluación de la seguridad. En ese proceso, la NASA y el Departamento de Energía suministran cualquier otra

información que pueda pedir el Grupo para resolver posibles cuestiones técnicas. Los primeros borradores del informe de evaluación de la seguridad y las observaciones del Grupo pueden incorporarse en versiones posteriores del informe sobre el análisis de la seguridad para dar más solidez a ese análisis.

V. Panorama general del aspecto informático del análisis de la seguridad

8. En el análisis de la seguridad del lanzamiento se utiliza una serie de códigos informáticos para elaborar modelos de diversas etapas y fenómenos de la secuencia de accidentes, la liberación de radioisótopos (“término fuente”), el transporte de radioisótopos y las consecuencias³. La NASA prepara el libro de datos sobre el vehículo de lanzamiento, las probabilidades de accidente y los entornos en que estos pueden ocurrir. Este aporta datos para el cálculo. Los códigos fenomenológicos determinan la respuesta del equipo del sistema energético radioisotópico a una explosión, un impacto, un incendio y la reentrada. Con los códigos se obtiene un conjunto de cuadros de consulta, que se utilizan como información para determinar el término fuente de una determinada situación hipotética de accidente. En general, las características de seguridad del sistema energético radioisotópico impiden la liberación de material. De ocurrir esta, el término fuente se transfiere a una serie de códigos sobre las consecuencias para determinar hasta dónde podría ser transportado el material liberado y sus posibles efectos sanitarios o ambientales. El producto final de la evaluación de los riesgos consiste en una distribución de las probabilidades de accidente y de liberación, las posibles consecuencias, los valores medios y una estimación de los riesgos.

A. Explosión e impacto

9. Las posibilidades hipotéticas de un accidente son más amplias de lo que se puede ensayar. Por eso, el análisis de la seguridad se basa en la elaboración de modelos numéricos para aumentar la base de datos existente de los ensayos de seguridad. Los entornos que podrían dar lugar a daños y que se deben tener en cuenta en los modelos son la explosión debida a un fenómeno que frustra el lanzamiento, el impacto en tierra del equipo del sistema energético radioisotópico y el impacto de desechos y fragmentos del propulsante sólido en el equipo del sistema energético radioisotópico. Se utilizan códigos de la mecánica de medios continuos para elaborar modelos explícitos de los entornos de accidente definidos en el libro de datos. Los programas incluyen modelos constitutivos no lineales y con ellos se analizan con precisión grandes deformaciones que podrían provocar no linealidades geométricas. Esas simulaciones numéricas de los daños mecánicos debidos a las explosiones y las condiciones del impacto permiten estimar los daños en la fuente de energía (y sus componentes), en particular los daños en las vainas combustibles dentro de la fuente de energía. Las estimaciones de la exposición, rotura y deformación de las vainas combustibles se determinan por las simulaciones

³ El flujo de los códigos informáticos utilizados en el análisis de la seguridad del lanzamiento se muestra en la figura 2 del documento A/AC.105/C.1/2011/CRP.5, disponible en la dirección www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html.

numéricas. La evaluación se realiza vaina por vaina según cada caso de accidente, y los resultados se incluyen en un modelo de la liberación incorporado al código de análisis del término fuente. El modelo de la liberación determina la cantidad y distribución del tamaño de las partículas del PuO_2 de cualquier material liberado, en base a la información sobre los daños en la vaina que se haya obtenido de las simulaciones numéricas.

10. Con esas simulaciones numéricas se examinan las condiciones de la carga mecánica, como explosiones, impactos en tierra, impactos de fragmentos de naves espaciales y, en el caso de algunas misiones, desechos de naves espaciales intactas. En la mayoría de los casos, los daños mecánicos se deben a una compleja cadena de acontecimientos. En las simulaciones numéricas se escinde esa compleja cadena de fenómenos y se agrega la información sobre el código de análisis del término fuente acerca de diversos fenómenos, que puede utilizarse después para explicar la cadena progresiva de fenómenos. El código de análisis del término fuente aporta detalles sobre la exposición, deformación y rotura de las vainas combustibles en las matrices de los fenómenos de impacto en tierra, los impactos de fragmentos, los impactos de desechos de naves espaciales y las explosiones. Esos diversos resultados pueden combinarse posteriormente para obtener una estimación de la liberación debida a la carga mecánica.

B. Análisis térmico y de incendios

11. Un accidente durante el lanzamiento puede causar el incendio de los propulsores, tanto líquidos como sólidos. Los Estados Unidos han agregado varias capas de protección a su equipo para prevenir la liberación del combustible del sistema energético radioisotópico en caso de accidente en la zona de lanzamiento. Por ejemplo, no se prevé que el incendio del propulsante líquido produzca tanto calor como para derretir la vaina de iridio que contiene el combustible del sistema energético radioisotópico. Se utilizan varios códigos para elaborar modelos del incendio de los propulsores líquidos, el incendio de los propulsores sólidos, los impactos térmico-mecánicos y los efectos de la vaporización en el equipo y el combustible del sistema energético radioisotópico.

12. La información que se agrega al código caracteriza el incendio del propulsante sólido en tierra, la nube flotante y la distribución de cualquier masa liberada de PuO_2 en conjuntos de partículas de diversos tamaños debido a un impacto coincidente o casi coincidente. Desde ese punto de partida, con la serie de códigos se predice la composición y distribución del tamaño de las partículas de los aerosoles que contienen PuO_2 en la nube flotante. En la práctica, el código transforma el término fuente (masa por tamaño) de las partículas de PuO_2 liberadas por un problema mecánico en otro que incluye los efectos de la vaporización, la condensación y la aglomeración de partículas.

C. Análisis de la reentrada en la atmósfera

13. Una nave espacial provista de un sistema energético radioisotópico puede reentrar en la atmósfera por error. El módulo de FTUG está diseñado para sobrevivir a las condiciones de la reentrada y se utiliza una serie de códigos para evaluar y confirmar el diseño del módulo. Se utilizan en forma conjunta varios códigos para dar una solución integrada a los problemas de física secuencial que puedan producirse durante la reentrada en relación con el movimiento, el calentamiento, la respuesta térmica, la química y los campos de flujos no viscosos. La evaluación del espacio de reentrada paramétrico requiere miles de soluciones con respecto a la dinámica de vuelo de la reentrada, el calentamiento de la superficie aerodinámica y la ablación y respuesta térmica del módulo de FTUG. Ese análisis se realiza respecto de cada misión, dado que las características orbitales de cada una son únicas. Los resultados térmicos, físicos y de velocidad de ese análisis se transmiten al análisis del término fuente.

D. Análisis del término fuente

14. El término fuente se refiere a la cantidad y la forma del combustible que puede liberarse del sistema energético radioisotópico, si existe este. Dado que el equipo está diseñado de tal manera que contenga el combustible, el valor del término fuente puede equivaler a cero. El término fuente para el análisis de la seguridad del lanzamiento se genera con un código Monte Carlo que ofrece millones de posibles resultados en el análisis de una sola misión. Con él se trata de caracterizar todos los elementos que representen una amenaza de accidente en el momento del lanzamiento.

15. Cada simulación empieza con la determinación del lugar del accidente por muestreo aleatorio de una función de distribución de probabilidades desde el vehículo de lanzamiento. El código del término fuente pasa después por todos los problemas que ocasionaría el accidente, como por ejemplo, la explosión inicial, los impactos de fragmentos en el aire, el impacto en tierra del sistema energético radioisotópico, el impacto del propulsante sólido u otros fragmentos grandes en el sistema energético radioisotópico, la lluvia de desechos y el incendio de los propulsores líquidos y sólidos. Se reúnen muestras de diversas distribuciones en toda la simulación, como resultado de lo cual se obtienen millones de soluciones singulares.

16. El resultado final del análisis del término fuente es una distribución de las posibles liberaciones del combustible PuO_2 para su posterior muestreo en el análisis de las consecuencias. Los detalles que se obtienen sobre la liberación final son la masa liberada, la distribución del tamaño de las partículas, el lugar de la liberación y los parámetros del entorno de incendio. En los resultados se definen también las probabilidades de una liberación en caso de accidente, las cuales, combinadas con las probabilidades de accidente, representan el total de las probabilidades de la hipótesis.

E. Análisis de las consecuencias

17. La serie relativa a las consecuencias consiste en un conjunto de códigos con el que se calculan el transporte atmosférico del combustible liberado del sistema energético radioisotópico y sus consecuencias en cuanto a efectos sanitarios, dosis y contaminación de la tierra. Los efectos sanitarios se caracterizan como el número de muertes latentes por cáncer en los 50 años posteriores. El modelo lineal sin umbral de las dosis se utiliza junto con una opción relativa a un valor *de minimis* (umbral). La serie de códigos se aplica en forma estocástica con numerosas hipótesis, llamadas “observaciones”. El término fuente concreto, las condiciones climáticas y la hora del lanzamiento se seleccionan al azar en cada observación. Se recurre al muestreo por importancia para asegurar que se tengan en cuenta en el análisis las combinaciones de variables cuyo resultado son fenómenos poco probables, pero de graves consecuencias.

18. El transporte atmosférico se logra mediante un modelo gaussiano de dispersión con trayectoria lagrangiana, capaz de tener en cuenta múltiples términos fuente relativos al tamaño de las partículas. El transporte y la difusión del material en una nube se rigen por condiciones meteorológicas que pueden variar en el espacio y el tiempo. Entre esas condiciones figuran los componentes eólicos en puntos de cuadrícula, la clase de estabilidad, la altura de la capa en que se produce la mezcla y la rugosidad de la superficie subyacente. Cada nube fuente, definida a partir de características como el tamaño de las partículas, las dimensiones iniciales de la nube y las coordenadas iniciales, se rastrea a lo largo del tiempo en un campo eólico de cuatro dimensiones (tres dimensiones espaciales, más la temporal).

19. Cuando hay interacción entre la nube y el suelo, se inicia el cálculo de la concentración de aire y tierra en los puntos determinados. Luego del cálculo del transporte y la concentración, se evalúan las posibles dosis y efectos sanitarios en la población expuesta. Con un módulo separado se calculan posibles dosis basadas en factores de conversión de dosis para las diferentes rutas de las dosis. Como los términos fuente pueden suponer diversos tamaños de partículas y la resolución puede cambiar de una aplicación a otra, ese módulo incorporado no limita los valores de los factores de conversión de las dosis a una lista fija de tamaños de partículas. El cálculo de las dosis y los efectos sanitarios abarca también otros datos relacionados con áreas potencialmente contaminadas, como los relativos a la densidad demográfica, el uso de las tierras y la producción y el consumo de alimentos.

20. Los resultados de la serie relativa a las consecuencias se combinan en cuadros de consecuencias medias, diversas consecuencias a nivel de percentiles y riesgo (las consecuencias medias multiplicadas por las probabilidades de liberación). Se crean también gráficos complementarios de la función de distribución acumulada. Esos gráficos muestran las probabilidades de que puedan producirse consecuencias a un determinado nivel o a otro mayor. Esos resultados brindan una base técnica para que los encargados de adoptar decisiones evalúen los riesgos que se corren al utilizar una aplicación con un sistema energético radioisotópico en el espacio ultraterrestre.

VI. Conclusión

21. Los sistemas energéticos radioisotópicos han permitido explorar las profundidades del sistema solar desde el Sol hasta Plutón, girar en órbita alrededor de los planetas externos y observar sus lunas, cada una más extraña que la otra, y viajar a los confines del sistema solar y más lejos aún. Si bien las aplicaciones dotadas de sistemas energéticos radioisotópicos suelen requerir cantidades significativas de material radioisotópico, los Estados Unidos han establecido un amplio programa de seguridad, respaldado por un riguroso proceso de evaluación de riesgos, a fin de estudiar los posibles riesgos de las misiones y asegurar que estas se realicen en condiciones de seguridad. De conformidad con el Marco de seguridad, la aplicación que los Estados Unidos utiliza en la evaluación de riesgos cumple una función esencial en el proceso de diseño y desarrollo de los sistemas energéticos radioisotópicos y todas las fases de desarrollo de las aplicaciones con sistemas energéticos radioisotópicos, apoya el proceso de justificación de las aplicaciones con sistemas energéticos radioisotópicos, y sirve de base técnica al proceso de autorización de los lanzamientos desde el punto de vista de la seguridad nuclear.
