



Asamblea General

Distr.: General
20 de diciembre de 1999
ESPAÑOL
Original: Inglés

Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos

Investigaciones nacionales sobre la cuestión de los desechos espaciales, seguridad de los satélites nucleares y problemas de la colisión de las fuentes de energía nuclear con los desechos espaciales

Nota de la Secretaría

Índice

	<i>Página</i>
I. Introducción	2
II. Respuestas recibidas de los Estados Miembros	2
Chipre	2
Irlanda	2
Israel	2
República de Corea	3
Países Bajos	3
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	3

I. INTRODUCCIÓN

1. La Asamblea General, en el párrafo 31 de su resolución 53/45 de 3 de diciembre de 1998, consideró esencial que los Estados Miembros prestaran más atención al problema de las colisiones de objetos espaciales, incluidas las fuentes de energía nuclear, con desechos espaciales, y a otros aspectos de esos desechos, y pidió que continuaran las investigaciones nacionales sobre esa cuestión, que se mejorase la tecnología para la vigilancia de los desechos espaciales y que se recopilase y difundiese información sobre desechos espaciales. La Asamblea consideró que en la medida de lo posible la información al respecto debía comunicarse a la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos.

2. El Secretario General dirigió una nota verbal, con fecha 30 de agosto de 1999, a todos los Estados Miembros, invitándolos a comunicar a la Secretaría la información solicitada, a más tardar el 31 de octubre de 1999, para que la Secretaría pudiera preparar un informe al respecto para presentarlo a la Subcomisión en su 37º período de sesiones.

3. El presente documento ha sido preparado por la Secretaría sobre la base de la información recibida de los Estados Miembros y las organizaciones internacionales hasta el 10 de diciembre de 1999. La información que se reciba después de esa fecha se incluirá en adiciones al presente documento.

II. Respuestas recibidas de los Estados Miembros

Chipre

[Original: inglés]

Respecto al tema de los desechos espaciales y a la cuestión del uso de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, el Gobierno de Chipre tiene el honor de informar al Secretario General que no tiene comentario alguno que formular.

Irlanda

[Original: inglés]

Irlanda reconoce el problema creciente de los desechos espaciales y el correspondiente riesgo de colisiones, y apoyaría medidas para investigar y promover normas apropiadas para el control y la eliminación de los materiales situados en el espacio.

Fuentes de energía nuclear termoeléctrica son utilizadas ocasionalmente por varios organismos, por ejemplo misiones en el espacio interplanetario cuando la energía fotoeléctrica solar es insuficiente, e Irlanda apoyaría medidas para investigar y promover normas estrictas y seguridades respecto a tales fuentes de energía.

Israel

[Original: inglés]

Israel no desarrolla actividad alguna que utilice fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre.

República de Corea

[Original: inglés]

En cuanto a la cuestión de los desechos espaciales, la República de Corea ha propuesto un principio de “quien lanza paga”, según el cual los países adelantados que producen desechos espaciales deben hacerse responsables de tales desechos en el espacio ultraterrestre. Este principio está en sintonía con la tendencia actual de la política medioambiental en la tierra. Los países que han puesto desechos espaciales en el espacio ultraterrestre como Francia, la Federación de Rusia y los Estados Unidos de América deberían ponerse en vanguardia en cuanto a la eliminación de los desechos, el establecimiento de normas y la búsqueda de medidas paliativas. Es preciso también que ayuden a los países en desarrollo a reducir los desechos espaciales en el futuro estableciendo un fondo internacional para apoyar estas actividades.

El uso de fuentes de energía nuclear debería limitarse estrictamente a misiones especiales como las realizadas en el espacio interplanetario. En estos casos inevitables es preciso establecer un diseño y unas normas de seguridad. Estas tecnologías deben compartirse entre países desarrollados y en desarrollo para mantener seguros y limpios nuestra Tierra y el espacio ultraterrestre.

Países Bajos

[Original: inglés]

En cuanto a la identificación de procesos terrestres y normas técnicas que puedan tener relación con fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, los Países Bajos no desarrollan actividad alguna en este campo. Los Países Bajos no pueden pues seguir reflexionando sobre los factores que puedan distinguir entre las fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre y las aplicaciones terrestres de la energía nuclear.

Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte

[Original: inglés]

A. Introducción

El Reino Unido sigue cumpliendo una función clave en la consideración del problema de los desechos espaciales. En ello se trabaja a nivel nacional en el Grupo de Coordinación

del Reino Unido sobre Desechos Espaciales y a nivel internacional por medio del Comité Interinstitucional de Coordinación en materia de Desechos Espaciales (IADC) y la Comisión de las Naciones Unidas sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. El Centro Nacional Británico del Espacio sigue coordinando la participación del Reino Unido en estos foros.

La reunión más reciente del Grupo de Coordinación del Reino Unido tuvo lugar en abril de 1999 en la Agencia de Investigación y Evaluación de Defensa (Defence Evaluation and Research Agency, DERA). Estuvieron representados todos los principales grupos industriales y académicos del Reino Unido interesados en la investigación sobre desechos, a saber: Century Dynamics, Defence Evaluation and Research Agency, Fluid Gravity Engineering, Ministerio de Defensa, Matra Marconi Space (MMS) y las Universidades de Kent, Londres y Southampton. Se presentaron comunicaciones sobre diversos temas, entre ellos: actividades en la anterior reunión del IADC en Toulouse; progresos en la construcción de equipo de rastreo de desechos; adelantos y resultados de nuevos modelos sobre desechos y meteoroides; y actividades de investigación sobre blindajes contra desechos.

En el plano internacional, el Reino Unido participó en una reunión del pleno del IADC en Toulouse en noviembre de 1998 y en una reunión de su Grupo de Dirección en Viena en julio de 1999.

En el último año, el Reino Unido ha llevado a cabo las siguientes actividades de investigación y desarrollo con referencia a los desechos espaciales.

B. Medida del número de desechos

1. Detectores de desechos

La detección en el espacio en tiempo real proporciona una valiosa visión del medio ambiente de desechos espaciales y meteoroides. El método de detección suele utilizar la energía de una partícula impactante para accionar una medida y, en consecuencia, destruir la entidad física de la partícula. La Unidad de Ciencias del Espacio y Astrofísica de la Universidad de Kent, Canterbury, ha seguido trabajando sobre tres oportunidades de vuelo de un detector de desechos espaciales llamado DEBIE. Un consorcio finlandés está contribuyendo a la primera de estas oportunidades facilitando elementos manufacturados listos para el vuelo en la nave espacial PROBA de la Agencia Espacial Europea (ESA) cuyo lanzamiento está previsto para mediados de 2000. Los sensores del vuelo se esperan en Kent para su calibración en noviembre de 1999. Para la segunda oportunidad de vuelo, el Vehículo de Investigación de Tecnología Espacial de la DERA (satélite STRV 1C), Kent ha calibrado los sensores de vuelo y ha entregado todo el material de vuelo en agosto y septiembre de 1999. Todas las unidades han sido integradas en la nave espacial y el lanzamiento se prevé para el primer trimestre de 2000. La última oportunidad de vuelo es en la Estación Espacial Internacional (ISS). La Technology Exposure Facility de la ESA se lanzará en junio de 2002, con una duración de vuelo de tres años y regreso ulterior a la Tierra. Habrá por consiguiente oportunidad para la inspección de las superficies recuperadas después del vuelo.

Kent ha explorado también el uso de una nueva técnica de detección llamada Sensor Aerogel de Impacto de Posición Sensitivo (*Aerogel Position Sensitive Impact Sensor*,

APSYS), que combinará la detección en tiempo real con el análisis de muestras recuperadas.¹ Midiendo la posición y el tiempo del impacto en un colector recuperable, la exploración después del vuelo y el análisis residual pueden proporcionar datos químicos y físicos del causante del impacto. Además, si se combina con el vector de velocidad de la nave espacial en el instante de la detección, puede revelar la trayectoria en el marco de referencia orbital apropiado. Los resultados del análisis de las necesidades del sistema aconsejan el despliegue del APSIS como detector de una amplia zona, lo que hace de él un candidato ideal para la ISS.

2. Análisis de superficies recuperadas

Igual que los detectores *in situ*, el análisis de las superficies recuperadas del espacio proporciona datos valiosos sobre el medio ambiente espacial. Muy recientemente, Kent ha analizado las células solares de uno de los paneles solares del Telescopio Espacial Hubble, recuperado después de 3 años y 62 días en el espacio. Utilizando un microscopio electrónico para el examen analítico se consiguió identificar el origen de 23 de los 29 cráteres de impacto en las células seleccionadas. La clasificación química observada de los residuos de impactos, de meteoroides a desechos, correspondió bien a las predicciones de modelo de flujo. Además, los resultados de los residuos se han evaluado también críticamente comparándolos con pruebas de impacto en tierra sobre células solares utilizando el proyector ligero de gas (*light gas gun*, LGG) de Kent. Se ha confirmado así que en los cráteres se producen texturas y efectos químicos similares, lo que da confianza en los resultados del análisis microscópico. Varias comunicaciones sobre estos trabajos se han presentado en conferencias y en revistas prestigiosas.^{2,3}

C. Construcción de modelos de medio ambiente con desechos

La construcción de modelos de medio ambiente con desechos, su evolución a largo plazo y los peligros potenciales de ese medio ambiente para posibles sistemas espaciales futuros sigue siendo una actividad importante de los investigadores del Reino Unido respecto a los desechos. El efecto de la constante introducción de nuevos elementos en el espacio cercano a la Tierra, y por consiguiente las consecuencias para el medio ambiente formado por los desechos, es también un sector fundamental de la investigación.

1. Modelos de las fuentes de desechos

Uno de los aspectos más difíciles de la construcción de modelos del medio ambiente cargado de desechos es el cálculo del número de desechos pequeños (< 1 mm). Los actuales modelos subestiman notablemente los conjuntos de desechos de esos tamaños. Una de las principales razones es que los modelos no incluyen todas las fuentes de desechos. Por ejemplo, todavía no se ha considerado la generación de escamas de pintura de las superficies de aeronaves en órbita. Sin embargo, la investigación en el Queen Mary and Westfield College de la Universidad de Londres, financiada y guiada por la DERA, ha posibilitado la producción de mecanismos para investigar los microdesechos. Se está construyendo un modelo de generación de microdesechos teniendo en cuenta los efectos del oxígeno atómico, el ciclo térmico y las radiaciones ultravioletas. Se han realizado mediciones experimentalmente para concretar el papel de cada uno de estos fenómenos físicos, y el tema de la preparación inicial de la superficie y sus defectos se ha utilizado para generar distribuciones estadísticas del tamaño de los

microdesechos potenciales. Se pretende en último término incorporar el modelo obtenido en modelos de medio ambiente y evolución de desechos, como el “conjunto integrado de evolución de desechos” (*Integrated Debris Evolution Suite*, IDES) de DERA, eliminando así una de las causas principales de predicción insuficiente.

2. Modelo de medio ambiente actual de desechos en órbita terrestre geosincrónica

Mientras que los modelos de medio ambiente actual de desechos en órbita terrestre baja (LEO) están haciéndose muy completos, en altitudes geoestacionarias (es decir en órbita terrestre geosincrónica, GEO) la incertidumbre es mucho mayor. La ESA ha adjudicado un contrato a un consorcio integrado por Kent, DERA, la Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeroespaciales (ONERA, Toulouse), el Instituto Max Planck (Heidelberg) y la Universidad de Maryland para extender de LEO a GEO los modelos relativos a desechos espaciales y otros factores medioambientales. El trabajo está en marcha y se informará sobre el mismo el próximo año.

3. Evolución a largo plazo del medio ambiente con desechos

El modelo de desechos DERA IDES ha sido promovido y revalidado recientemente, al disponerse de datos de medidas sobre nuevas fuentes de desechos y nuevos ambientes de desechos. La época de referencia del modelo se ha actualizado al 31 de marzo de 1998 por haberse integrado una nueva base histórica de datos de objetos relacionados con lanzamientos que abarca desde 1957 hasta mediados de 1998 y la simulación adicional de sucesos de fragmentación ocurridos desde la época previa de referencia del modelo de 1 de enero de 1996. IDES incluye ahora un modelo de reciente creación de fuente de enfriamiento por goteo de líquido de sodio-potasio que ha mejorado radicalmente la exactitud de las predicciones del modelo para un medio ambiente de desechos medidos en centímetros. El modelo IDES mejorado para los desechos se ha utilizado ampliamente para estudiar la evolución a largo plazo del medio ambiente de desechos de LEO en detalle, incluyendo la influencia de constelaciones de satélites de LEO y las medidas para paliar los desechos. Recibidos últimamente algunos datos de pruebas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América (NASA), el modelo IDES ha proporcionado al Centro Espacial Nacional Británico (BNSC) elementos para un estudio internacional a largo plazo de comparación del modelo de LEO, que se está realizando en el marco del IADC. La terminación de este estudio básico de comparación allanará el camino para comparaciones más complejas, basadas en un marco similar y datos comunes de alimentación del modelo. Estos estudios más avanzados del IADC pueden llevar a un consenso internacional sobre cuestiones importantes como la efectividad de diversas medidas de reducción de desechos aplicadas por los satélites en general y por los sistemas de constelaciones de satélites comerciales.

El éxito del modelo DERA IDES ha llevado a la ESA y al Centro Europeo de Operaciones Espaciales (ESOC) a establecer un contrato para desarrollar una versión del IDES para sus usos. El nuevo modelo, que ha de facilitarse a la ESA a principios del 2000, se denomina *Debris Environment Long Term Analysis* (DELTA). El DELTA se apoyará en un conjunto inicial de desechos derivado del modelo de ESA *Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference* (MASTER), recientemente actualizado por la

Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania. El DELTA ofrecerá proyecciones a largo plazo del medio ambiente de desechos de LEO > 1 mm y los correspondientes riesgos de colisión de misiones en los próximos 100 años. Se han hecho importantes adelantos dentro del DELTA en la velocidad y la exactitud de propagación orbital a largo plazo; la alta resolución del futuro modelo de tráfico de lanzamientos; el desglose de las predicciones del modelo por diferentes componentes de fuentes de los desechos; y la predicción directa de los procesos de colisión en cascada. En conjunto, el modelo ESA DELTA es la última palabra y ofrece capacidades más avanzadas que otros modelos.

En el Queen Mary and Westfield College, Universidad de Londres, los investigadores han seguido desarrollando su modelo de desechos innovador *Direct Simulation Monte Carlo* (DSMC), con capacidad de análisis estadístico para predecir la evolución a largo plazo del medio ambiente de desechos orbitales para mejorar el cálculo de riesgos para vehículos espaciales. El objetivo se alcanza suponiendo que pueden crearse modelos de desechos empleando partículas muestra que representen el conjunto real de los desechos. Sobre la base de la teoría cinética de partículas estándar, se evalúa rigurosamente la probabilidad de colisión. La combinación de un modelo de desintegración de nave espacial, un modelo de probabilidad de colisión y un modelo de estela aerodinámica fuera de órbita de partículas de desechos permite predecir el crecimiento del conjunto de desechos. El modelo DSMC ha sido validado comparando las predicciones con los resultados de los experimentos de impacto de satélite llamados *Long Duration Exposure Facility* (LDEF). Se ha recurrido también a simulaciones a partir del modelo para predecir el número de ventanas de transbordador espacial que tendrán que ser sustituidas, y las predicciones se comparan con datos reales. Recientemente se ha empezado a ampliar el modelo medioambiental con la inclusión de micrometeoritos naturales. La investigación sobre desechos con el DSMC se ha publicado en una importante revista espacial.⁴

La investigación del Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Glasgow se ha orientado al estudio de la evolución a largo plazo de una gran constelación de nanosatélites en órbita terrestre utilizando métodos analíticos de forma cerrada. El trabajo tiene un interés creciente ya que los nanosatélites se consideran como medios baratos que permiten diversas aplicaciones de misiones innovadoras. Los futuros sistemas de nanosatélites pueden comprender muchos miles de satélites, cada uno de ellos con una masa entre 0,001 kg y 1 kg. Es probable que estos satélites escapen a todo control activo, de manera que efectos medioambientales como la resistencia del aire condicionen la evolución de la constelación. El trabajo de Glasgow con modelos aspira a determinar la densidad espacial media de una constelación típica bajo la acción de la resistencia del aire, considerando al mismo tiempo los satélites en órbita malogrados y la deposición de nuevos satélites para reponer la constelación. Uno de los hallazgos más interesantes revela que, en ciertas circunstancias, la densidad numérica de nanosatélites descenderá con el tiempo, pero su cumbre derivará hacia altitudes mayores. También pueden deducirse, utilizando esta técnica, estimaciones de la tasa de deposición requerida de nuevos satélites para mantener la constelación. La investigación deberá publicarse en una prestigiosa revista.⁵

4. Riesgos a corto plazo de los desechos para los bienes espaciales

La Universidad de Southampton realiza evaluaciones a corto plazo de los riesgos derivados de los desechos de los principales objetos espaciales. Recientemente se han analizado las probabilidades de colisión de una constelación de 800 satélites (sobre la base de la configuración Teledesic original) y de la nueva ISS. Ambas evaluaciones se sirvieron

del programa modelo de simulación de desechos espaciales (SDS), desarrollado en Southampton por contrato con DERA. Para evaluar el riesgo de la constelación se consideraron dos escenarios potencialmente peligrosos: a) fragmentación de uno de los satélites de la constelación; y b) desintegración de un vehículo de lanzamiento de la constelación. Se concluyó que el riesgo de colisión para la constelación es bajo a corto plazo. Entre los escenarios examinados, la mayor amenaza para el sistema era la desintegración de un satélite de la constelación a raíz de una colisión. En cuanto a la evaluación del riesgo para la ISS, se consideró la amenaza de una fragmentación de un piso superior o una nave espacial en una órbita cercana. A partir de los estudios de casos considerados, las probabilidades de impacto a corto plazo procedentes de los encuentros de la ISS con la nube de desechos de fragmentación se estimaron de un orden de magnitud cuatro veces más alto que las procedentes del conjunto de desechos de fondo. Los resultados de estos estudios se han publicado en una revista prestigiosa y se han comunicado en importantes conferencias internacionales.^{6,7}

D. Protección contra desechos de naves espaciales

La protección de naves espaciales contra el impacto de desechos a hipervelocidad es otro ámbito de investigación en el que el Reino Unido participa activamente.

1. Pruebas de impacto a hipervelocidad

Un consorcio constituido por Matra Marconi Space (MMS), ERA, Kent y Fluid Gravity Engineering está próximo a llevar a su término un contrato de dos años con la ESA para investigar soluciones económicas para el blindaje de naves espaciales no tripuladas contra desechos. Dadas las restricciones impuestas por los costos y por la masa sobre el diseño de las naves espaciales típicas, hay pocas opciones creíbles para el blindaje. El consorcio ha propuesto una nueva serie de soluciones de blindaje contra desechos que deberían mejorar las probabilidades de permanencia de naves espaciales futuras, tales como la sustitución de una estructura normal alveolada con una sola capa de aluminio, típica de muchas naves espaciales, por una capa doble, y la adición de aislantes térmicos en varias capas de paño Beta para cubrir la estructura del satélite. Se han fabricado muestras de blindaje que se han sometido a una serie de impactos a hipervelocidad utilizando LGG. Los resultados de estas pruebas han permitido obtener ecuaciones balísticas límites para cada nuevo tipo de blindaje. Estas ecuaciones dan la seguridad de que puede predecirse la efectividad del blindaje cuando se aplique a un satélite. Durante el resto del contrato, habrá un período de análisis de la relación entre el costo, el riesgo y el beneficio para cuantificar la rentabilidad de las soluciones de blindaje. Por último, se establecerán directrices para asesorar a los diseñadores de sistemas de protección de naves espaciales sobre el tipo y la colocación más adecuados del blindaje en un diseño particular de nave espacial.

2. Modelos de supervivencia de satélites

La DERA ha seguido desarrollando un modelo de programa innovador llamado SHIELD, cuya finalidad es identificar la estrategia óptima de protección contra desechos para una misión de satélite particular. Para ello utilizará un algoritmo genético que investigará automáticamente y evaluará muchos miles de posibilidades alternativas para la configuración de equipo dentro de una representación geométrica tridimensional del cuerpo del satélite, junto con las muchas opciones y ubicaciones para la aplicación del blindaje al satélite. El proceso de evaluación utiliza una métrica de supervivencia de nueva

formulación para determinar rápidamente la efectividad de cada solución. Uno de los elementos de esta métrica es una distribución generada en Monte Carlo de desechos impactantes que penetran en el cuerpo del satélite, que a su vez se ha obtenido de los datos de flujo direccional de desechos generados por el modelo de DERA IDES. La métrica está construida de tal manera que puede revelar si los elementos críticos están suficientemente protegidos por el equipo vecino y si los beneficios de la adición de blindaje justifican el costo y la masa añadidos. De esta manera, el modelo puede determinar la mejor solución para ofrecer la máxima protección al equipo esencial. Se prevé que el modelo pueda llegar a ser un instrumento de ingeniería adicional para ser usado durante las fases iniciales de un proyecto de satélite cuando haya flexibilidad suficiente para hacer cambios en el diseño. La versión 0.1 de SHIELD se acaba de terminar y está ya lista para validación. El trabajo se ha publicado como documento fuera de programa en una importante conferencia espacial y en una prestigiosa revista británica de defensa.^{8,9}

3. Modelos de hidrocódigos

El diseño de blindajes amortiguadores mejorados mediante materiales nuevos como Nextel y Kevlar es esencial para minimizar los riesgos de impacto para futuras misiones espaciales de larga duración, en particular las que requieren la presencia de una tripulación. Es esencial por consiguiente comprobar la respuesta de estos nuevos materiales al impacto a hipervelocidad, para conseguir un diseño óptimo del blindaje. Imperativamente se requieren simulaciones con hidrocódigo para comprobar el rendimiento de los blindajes a las velocidades típicas de los impactos de desechos orbitales (> 10 km/s). Para ello, los hidrocódigos utilizan modelos materiales en condiciones de alta presión y tirantez. Se han construido ya modelos materiales para el aluminio, material convencional en una nave espacial, pero no para Nextel y Kevlar. Una compañía británica, Century Dynamics, ha estado desarrollando por contrato con la ESA modelos materiales para estos materiales particulares. La calidad de los modelos obtenidos se ha comprobado comparando simulaciones de hidrocódigo con pruebas de impacto. Una descripción de la investigación se ha presentado en un importante simposio internacional, siendo seleccionada después para optar al galardón a la mejor ponencia.¹⁰

Century Dynamics se ha esforzado también notablemente por mejorar su propio programa informático de hidrocódigo llamado Autodyn. Se están realizando trabajos de investigación y desarrollo a largo plazo sobre una técnica denominada hidrodinámica de partículas suaves (*smooth particle hydrodynamics*, SPH), combinando las inversiones propias con subvenciones del Ministerio de Defensa y de la DERA. Es digno de mención el hecho de haberse conseguido ya y validado una capacidad SPH tridimensional en Autodyn. Autodyn recibe ahora mucha atención en todo el mundo, y tanto la ESA como la NASA han comprado licencias para su instalación en grandes computadoras durante el pasado año.

Notas

¹ J.A.M. McDonnell y colaboradores, "Aerogel position-sensitive impact sensor: capabilities for in situ collection and sample return", ed. provisional.

² G.A. Graham y colaboradores, "Hypervelocity impacts in low Earth orbit: cosmic dust versus space debris", *Advances in Space Research*, vol. 23, No.1 (1999), pp. 95-100.

³ G.A. Graham y colaboradores, "Natural and simulated hypervelocity impacts into solar cells", de próxima publicación en *International Journal of Impact Engineering*.

⁴ L. Wang y J.P.W. Stark, "Direct simulation of space debris evolution", *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 36, No. 1, enero-febrero de 1999.

⁵ C.R. McInnes, "A simple analytical model of the long term evolution of nanosatellite constellations", de próxima publicación en *Journal of Guidance, Control and Dynamics*.

⁶ G.G. Swinerd, S.P. Barrows y P.H. Stokes, "Short-term debris risk to large satellite constellations", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 22, No.2 (1999), pp. 291-295.

⁷ G.G. Swinerd, S.P. Barrows y P.H. Stokes, "Short-term debris risk to the International Space Station arising from a spacecraft fragmentation", presentado en el 49º Congreso Astronáutico Internacional celebrado en Melbourne, Australia, 28 de septiembre a 2 de octubre de 1998, doc. nº IAA-98-IAA.6.4.04.

⁸ P.H. Stokes y colaboradores, "Novel modelling solutions for debris risk reduction", *Advances in Space Research*, vol. 23, No.1 (1999), pp. 231-241.

⁹ P.H. Stokes y colaboradores, "Protecting satellites against orbital debris", *Journal of Defence Science*, vol. 4, No.2 (1999), pp. 121-131.

¹⁰ C.J. Hayhurst y colaboradores, "Development of material models for Nextel and Kevlar-epoxy for high pressures and strain rates", comunicación presentada en el Simposio sobre impacto a hipervelocidad celebrado en Huntsville, Alabama, Estados Unidos de América, en noviembre de 1998, doc. nº 1044.