



UNIÓN DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS TÉCNICOS INDUSTRIALES Y GRADUADOS EN INGENIERÍA DE LA RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA (UAIIE)

“CONVOCATORIA 2022”

VII PREMIO NACIONAL DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA BASURA ESPACIAL

AUTORES:

José Luis Sánchez Díaz, Jaime San Martín, José Manuel Moñino

BLOQUE TEMÁTICO:

Gestión de Residuos

NIVEL EDUCATIVO:

2º Bachillerato

COORDINADOR:

Víctor Barbero Romero

(Octubre de 2021)

Índice de Contenidos

Resumen.....	3
Palabras Clave.....	3
1. Desarrollo	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodología.....	3
1.4. Resultados	4
1.4.1. Análisis de la basura espacial.....	4
1.4.2. Regulación internacional	8

1.4.3. Eliminación de la basura.....	11
1.5. Conclusiones.....	16
1.6. Glosario de Siglas	19
2. Bibliografía.....	19

Resumen

Desde que empezó la carrera espacial, el número de objetos de basura en órbita se ha incrementado de forma exponencial y ha provocado que actualmente gran parte de las misiones que están activas se encuentren en riesgo. La permisividad en cuanto a la legislación acerca de la basura espacial ha empeorado la situación ya que aunque se hayan implementado medidas para atenuar el problema, estas solo tendrán un efecto a largo plazo y muchas de ellas incluso evitan que se puedan probar sistemas de eliminación. Es por esto que cobra especial relevancia el desarrollo de los sistemas de detección precisa de objetos de basura espacial para así cuantificar el problema, y sistemas de eliminación, para mitigar esta problemática. Por tanto, y aunque en los sistemas de detección ya se están haciendo grandes avances, es clave que se siga investigando, sobre todo en los de eliminación, porque muchos de estos aún se encuentran en las

fases previas a su puesta en funcionamiento. A pesar de todo esto, hay empresas que están implementando métodos de eliminación pasiva de basura espacial e incluso algunas que ya están experimentando con sistemas activos de eliminación, como la misión ELSA-d de Astroscale. Esto, sin duda, es muy importante porque si se sigue por el camino de la investigación, el desarrollo y la innovación, al final se podrá eliminar por completo el problema de la basura espacial.

Palabras Clave

Basura espacial

Mitigación

Detección

Consecuencias

1. Desarrollo

1.1. Introducción

En 1957 la Unión Soviética puso en órbita el Sputnik, el primer satélite artificial en la historia de la humanidad; desde entonces, se han producido más de 10.000 lanzamientos, los cuales han puesto en distintas órbitas terrestres una enorme cantidad de objetos de diversa índole. De todos ellos, sólo una pequeña parte pertenece al grupo de sistemas y satélites operativos, el resto, es considerado como basura espacial que orbita la Tierra y viaja a velocidades que pueden superar los 16 km/s, que son alrededor de 57.000 km/h. A día de hoy, se calcula que hay cerca de siete toneladas métricas de basura espacial orbitando el planeta. Además, de acuerdo a estudios realizados por la European Space Agency (ESA), se calcula que existen más de medio millón de fragmentos de basura espacial cuyo tamaño oscila entre 1 cm y 10 cm; y cerca de 170 millones de fragmentos de tamaño inferior a 1 centímetro que se encuentran circulando alrededor de la Tierra y generando un riesgo para todos los sistemas que hay actualmente en órbita. Por otra parte, el término de basura espacial, a pesar de no tener una definición

completamente objetiva, hace referencia a cualquier objeto que orbite alrededor de la Tierra y que no tenga una función determinada.

1.2. Objetivos

Los objetivos que este trabajo persigue son: analizar la evolución e incremento de la densidad de basura espacial a lo largo del tiempo mediante el Síndrome de Kessler, identificar las órbitas más afectadas, analizar los sistemas para monitorizar la basura e identificar las tecnologías y métodos de reducción de basura espacial.

1.3. Metodología

El proyecto constará de diversas partes o temas en general, los cuales se irán desarrollando hasta dar lugar a una profundización en la materia que se está tratando y cuyo objetivo es la comprensión y el estudio de la basura espacial en su conjunto.

Cabe destacar que todas las hipótesis e ideas que se expongan en este proyecto serán contrastadas y verificadas sobre la base de argumentos e información obtenida en Internet y proporcionada por organismos y personas especializadas en el ámbito del que se está tratando (información de operadores satelitales, agencias espaciales,

etc.). Las referencias bibliográficas empleadas se presentarán siguiendo las reglas adecuadas.

1.4. Resultados

1.4.1. Análisis de la basura espacial

1.4.1.1. Origen de la basura

Según el “Orbital Debris Mitigation” de la NASA (*ARES | Orbital Debris Program Office | Debris Mitigation*, s. f.), se pueden establecer 4 fuentes principales de generación de basura espacial:

Etapas abandonadas de vehículos de lanzamiento: cerca del 30% de estas permanecen en órbita terrestre.

Vehículos espaciales fuera de servicio: unos 2300 vehículos espaciales fuera de servicio continúan en órbita terrestre, considerándose basura espacial y suponiendo una gran amenaza para los vehículos y sistemas operativos en órbita.

Desechos relacionados con misiones: en los procesos de lanzamiento y despliegue de objetos en el espacio se puede llegar a generar basura. Un ejemplo de ello podrían ser correas, muelles, sensores y hasta cubiertas de motores, que eran abandonados a menudo en la órbita durante los primeros años de la carrera espacial,

más específicamente en la década de los 60s y 70s.

Desechos de fragmentación: La mayor parte de la basura espacial proviene de los desechos de fragmentación. Y por lo general, esta fragmentación se produce por tres motivos principales: explosiones, colisiones o eventos anómalos.

- ***Explosiones:*** hasta el año 2007 las explosiones de las etapas de los cohetes eran el mayor contribuyente a la formación de basura espacial. Muchas de estas explosiones fueron accidentales y ocurrieron tras el despliegue de un satélite u otro objeto, normalmente entre 24 horas y 20 años después del lanzamiento. Estas explosiones fueron causadas, en la mayor parte de las ocasiones, porque los restos de los propulsores se incendiaban y explotaban. Los resultados de estas explosiones son muy variados, desde la formación de unos pocos residuos espaciales hasta la generación de toda una nube de objetos muy pequeños, que viajan a velocidades de hasta 4 km/s.

- ***Colisiones:*** las colisiones son responsables de gran parte de la basura que se encuentra actualmente en órbita. Las colisiones que tienen lugar a grandes velocidades generan una gran cantidad de

basura debido a que la fuerza de impacto es muy grande y los objetos implicados tienden a descomponerse en infinidad de fragmentos.

- *Eventos anómalos*: más de 50 de estos eventos han sido relacionados con etapas superiores y vehículos espaciales. La gran mayoría de estos eventos son producidos por el entorno, como por ejemplo cuando un satélite colisiona con una partícula pequeña. El caso más claro de este tipo de eventos fue el del Cosmic Background Explorer, que pocos años después de su lanzamiento expulsó al espacio unas 70 piezas de basura de 10 cm cada una.

Figura 1 se puede observar el aumento de la basura espacial desde que empezó la carrera espacial hasta la actualidad.

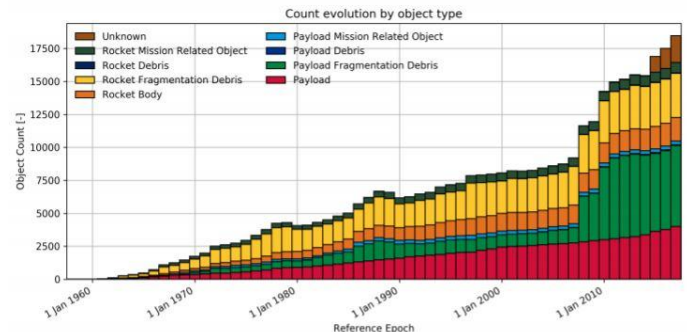


Figura 1. Número de objetos catalogados en la órbita terrestre según tipo de objeto
(TFG_SAMUEL_OCANA_LOSADA.pdf, s. f.).

1.4.1.2. Aumento de la basura espacial en los últimos años

Antes del comienzo de la carrera espacial no existía ningún objeto en la órbita terrestre creado por el ser humano; pero a partir de ese momento, el número de objetos creció rápidamente y con ello, el número de colisiones y, por ende, el número de fragmentos de basura espacial, cuyo crecimiento ha sido progresivo y exponencial. Esta creciente cantidad de basura supone un gran riesgo para el entorno orbital y a su vez, supone un peligro, aunque menor, la posibilidad de un impacto en la superficie terrestre. En la

1.4.1.3. El síndrome de Kessler

Donald J. Kessler desarrolló una tesis en el año 1991, que tituló “Collisional cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth Orbit” (Kessler, 1991) en la que se describe un evento en cascada cuyo resultado sería la destrucción de naves y satélites a gran escala en una región orbital, y que la dejaría inservible para posteriores misiones. Este fenómeno causaría que la densidad de basura espacial en una determinada órbita, que en este caso podría ser una órbita baja, llegara a una “densidad crítica”. Por encima de esta densidad ya comentada, el aumento de explosiones entre objetos, entre los que estaría incluida

la basura espacial, generaría más basura aún.

1.4.1.4. Casos reales

Desde los primeros años de la carrera espacial, se empezaron a detectar impactos de satélites que derivaron en basura espacial. Más específicamente, los científicos establecen que un tercio de la basura espacial proviene de tan solo 10 rupturas de satélites. En la Tabla 1 se pueden apreciar las peores rupturas de satélites sobre la base de la cantidad de residuos emitidos.

Common Name	Owner	International Designator	Cataloged Debris	Debris in Orbit	Year of Breakup	Altitude of Breakup	Cause of Breakup
 Fengyun-1C	China	199-025A	3218	2989	2007	850 km	Intentional Collision
 Cosmos 2251	Russia	1993-036A	1559	1371	2009	790 km	Accidental Collision
 STEP 2 Rocket Body	USA	1994-029B	710	58	1996	625 km	Accidental Explosion
 Iridium 33	USA	1997-051C	567	487	2009	790 km	Accidental Collision
 Cosmos 2421	Russia	2006-025A	509	0	2008	410 km	Unknown
 SPOT 1 Rocket Body	France	1986-091C	492	32	1986	805 km	Accidental Explosion
 OV 2-1 / LCS 2 Rocket Body	USA	1965-082DM	473	35	1965	740 km	Accidental Explosion
 Nimbus 4 Rocket Body	USA	1970-025C	375	245	1970	1075 km	Accidental Explosion
 TES Rocket Body	India	2011-049D	370	111	2001	670 km	Accidental Explosion
 CBERS 1 Rocket Body	China	1999-057C	343	178	2000	740 km	Accidental Explosion

Tabla 1. Las peores rupturas de satélites en base a la cantidad de basura emitida.

En cuanto al año en que ocurrieron, es destacable comentar que se detectó el primer caso en el año 1965, es decir, muy poco tiempo después de que se lanzara el primer objeto al espacio. Por otra parte, hay que destacar el ensayo de un misil

antisatélite por parte de China en el 2007, con el cual se destruyó un satélite meteorológico, el Fengyung-1C, aumentando la población de basura espacial un 25% (6789506, s. f.). Pero el evento más importante fue la única colisión hasta la fecha de dos satélites en órbita, la cual ocurrió en el año 2009. Los satélites Kosmos-2251, que era un satélite inactivo ruso, y el Iridium 33, un satélite activo norteamericano, impactaron a una velocidad aproximada de 11,5 km/s y generaron más de 2200 fragmentos rastreables, pero se estima que se produjeron muchos más que no se pueden rastrear debido a su tamaño. Regresando a la actualidad, en el año 2019 la India llevó a cabo con éxito una operación de misiles antisatélites y logró derribar un satélite indio de órbita baja, lo que generó más de 400 fragmentos de basura espacial.

1.4.1.5. Tipos de órbitas

Órbita baja terrestre (LEO; del inglés Low Earth Orbit): normalmente se encuentra a menos de 2000 km de altitud y puede llegar a estar a solamente 300 km sobre la Tierra. Los satélites de esta órbita suelen viajar a unos 7,8 km/s. Para establecer una comparación, a esa velocidad un satélite tarda aproximadamente 90 minutos en dar una

vuelta completa al planeta. Por ejemplo, la ISS se encuentra en una órbita LEO a unos 350 km de altura.

Órbita polar: dentro de las órbitas bajas se encuentran las órbitas polares. Este tipo de órbita pasa aproximadamente por encima de los polos y su trayectoria forma un ángulo recto cuando cruza el ecuador. La altura de estas órbitas se encuentra entre los 200 y 1.000 km y los satélites en órbita polar hacen un barrido de polo a polo de una franja de meridianos del planeta en cada órbita.

Órbita heliosíncrona: es un tipo de órbita baja, más específicamente un tipo de órbita polar. La característica distintiva de estas órbitas es que su plano orbital sigue la dirección del Sol y normalmente se encuentran a una altitud de entre 600 y 800 km de altura. Este tipo de órbitas son útiles en situaciones en que se requieren condiciones de iluminación constante del satélite.

Órbita media terrestre (MEO; del inglés *Medium Earth Orbit*): se encuentran a una altitud por encima de los LEO y por debajo de los GEO. Estas órbitas son muy adecuadas cuando se sitúan varios satélites en forma de constelación con fines como las comunicaciones o la navegación.

Órbita geostacionaria (GEO): es aquella que mantiene una posición fija con respecto a la superficie terrestre. La mecánica de Newton hace que esta órbita tenga una altura constante de 36.000 km y la posición estacionaria necesariamente pasa por la línea del ecuador. Por tanto, los satélites que se encuentran en esta órbita permanecen inmóviles en el cielo y debido a esto, este tipo de órbita es ideal para los satélites de telecomunicaciones, ya que permiten disponer de un repetidor de señal siempre visible desde las mismas localizaciones terrestres.

Órbitas elípticas: todas las órbitas descritas anteriormente son circulares, pero las excéntricas se caracterizan por presentarse en forma elíptica con un extremo muy cercano a la Tierra, por ejemplo, entre 500 y 2.000 km se encontraría su extremo más cercano mientras que el más lejano se encuentra a unos 150.000 km (la mitad de la distancia entre la Tierra y la Luna). Estas órbitas se usan para misiones en las que es conveniente alejarse de los efectos electromagnéticos y gravitatorios de la Tierra, como pueden ser los telescopios espaciales de rayos X.

Órbita de transferencia geostacionaria: es un tipo de órbita excéntrica muy elíptica

que en su extremo más alejado toca la órbita geostacionaria. Este tipo de órbitas se utilizan para transferir un satélite desde la órbita de lanzamiento.

1.4.1.6. Órbitas más afectadas

Tras haber expuesto el Síndrome de Kessler, debemos destacar que la más afectada por la basura espacial es la órbita LEO, debido a que en esta ocurren la mayor parte de las colisiones que generan a su vez más basura. Este problema no sucede por ejemplo en MEO, debido a que en esta órbita apenas hay satélites, por lo que la probabilidad de impacto es muy baja. Por último, en las órbitas GEO no hay ningún tipo de basura espacial a pesar de que existen bastantes satélites y sistemas allí debido a que cuando la vida útil del satélite finaliza, este es llevado a una órbita cementerio con la última parte del combustible, en altitudes superiores a los 36000 km.

1.4.1.7. Consecuencias

El gran problema que causa la basura espacial es que afecta a las actividades terrestres que dependen principalmente del espacio. Este riesgo es consecuencia del aumento de la probabilidad de colisión con los satélites. Pero en particular, si los

sistemas de telecomunicaciones quedasen destruidos, esto tendría graves consecuencias para el mundo actual. Es decir, si los satélites de telecomunicaciones dejaran de funcionar, por consiguiente, dejarían de funcionar servicios tan básicos como el GPS, e incluso todas las transmisiones informativas dejarían de funcionar de manera correcta ya que la comunicación con las diferentes partes del mundo se vería interrumpida o se vería muy retrasada, por lo que perderían su utilidad.

1.4.2. Regulación internacional

Desde que comenzó la carrera espacial, se han llevado a cabo iniciativas a nivel internacional para regular y mitigar los residuos espaciales.

La NASA estableció en 1979 el Orbital Debris Program (Programa de Basura Orbital) (6789506, s.f.) con el objetivo de abordar y tratar de buscar una solución al problema de la basura espacial para poder continuar la exploración espacial evitando posibles impactos de basura espacial.

En 1990, un grupo llamado Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) comenzó a trabajar en las Space Debris Mitigation Guidelines (Guías para la Reducción de Basura Espacial) y se propusieron una serie de directrices en

2002 que fueron mejoradas y actualizadas en 2007. En los dos casos, las directrices fueron clasificadas como no obligatorias, pero como modelo estándar es útil y debería aplicarse en la realidad. Actualmente, el IADC continúa mejorando estas directrices y el UN Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (UN COPUOS) ha creado un grupo de trabajo en el Long Term Sustainability of Space Activities (LTSSA; Sostenibilidad a Largo Plazo de las Actividades espaciales) dentro del cual se encuentra un grupo de expertos cuya misión es tratar el tema de la basura espacial y su mitigación. Regresando a los tratados realizados destaca el firmado en 1967, que se llamó el Tratado de Principios que Gobiernan las Actividades de los Estados en la Exploración y Uso del Espacio Exterior, incluyendo la Luna y Otros Cuerpos Celestes, el cual conforma la base del derecho espacial internacional. Este tratado fue firmado por los Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Soviética y posteriormente se fueron adhiriendo más países hasta llegar a los 102 que hay en la actualidad. Más adelante, en 1972 se produjo la Convención de Responsabilidad Internacional para Daños Causados por Objetos Espaciales, que es un tratado que expande las normas de responsabilidad de 1967. Aun así, actualmente existen una

serie de problemas que necesitan ser abordados para facilitar la oportunidad de cualquier proyecto de trabajar en la eliminación de basura espacial y son los siguientes:

1.4.2.1. Sistemas de radar

El funcionamiento de los radares se basa en una antena transmisora que emite radiación electromagnética, una antena receptora y un dispositivo detector de energía. Entre los sistemas de detección de basura espacial usando radares, existen varios tipos que se expondrán a continuación:

Phased-Array Radars (Antenas en Fase o Radares de Matriz por Fases): este sistema se basa en un conjunto de antenas en las que las fases relativas de las señales se varían intencionadamente con el objetivo de alterar el diagrama de radiación del conjunto. Lo más común es reforzar la radiación emitida en una dirección en concreto y eliminarla en las direcciones indeseadas. De este modo se consigue hacer barridos sin necesidad de movimiento físico, con la ventaja añadida de que se pueden escanear ángulos del orden de miles de grados por cada segundo. Esto permite utilizar la antena en funciones de detección, así como en el

seguimiento de muchos blancos individuales. Modificando algunos elementos radiantes se puede variar el haz de radiación pudiendo ensancharlo para mejorar las funciones de búsqueda o estrecharlo para hacer un seguimiento preciso de un objetivo. El inconveniente de este sistema es la imposibilidad de poder dirigirlo hacia ángulos cercanos al plano en los que están los elementos radiantes. Para poder hacer una cobertura de 360° se suelen disponer tres matrices bidimensionales de antenas en las paredes de una superficie piramidal («Antenas en fase», 2021).

La SSN (Space Surveillance Network) opera radares que utilizan UHF (Ultra High Frequency) y pueden detectar múltiples objetos simultáneamente.

VHF Fence Radar [Radar Valla de Frecuencia Muy Alta (Very High Frequency)]: es un sistema cuyo objetivo es realizar un seguimiento de satélites artificiales y basura espacial en la órbita de la Tierra. El sistema se basa en tres transmisores de VHF y seis receptores situados aproximadamente a una latitud de 33N a través de EEUU que constituyen una valla interferométrica que puede detectar objetos de más de 30 cm que pasen a través del sistema.

1.4.2.2. Sistemas ópticos

Un telescopio óptico es aquel que capta y enfoca luz, principalmente de la parte visible del espectro electromagnético, para crear una imagen aumentada. La capacidad de captar luz de un telescopio y su sensibilidad para poder resolver detalles pequeños están directamente relacionadas con el diámetro de su objetivo, que es la lente o el espejo que captan y enfocan la luz. Por tanto, cuanto más grande es el objetivo, más luz recibe el telescopio y mayor es el detalle de las imágenes captadas. Después de haber visto el funcionamiento de los telescopios ópticos, vamos a ver algunos ejemplos de ellos:

Michigan Orbital Debris Survey Telescope (MODEST): es un telescopio óptico el cual está diseñado para hacer observaciones en la órbita geoestacionaria y que tiene capacidad para detectar objetos de más de 30 cm. A veces este telescopio es usado para obtener datos adicionales acerca del seguimiento de basura espacial. En la Figura 2 se puede ver una secuencia de imágenes que han sido recopiladas por este sistema y en las que las estrellas están reflejadas con rayas, y los satélites o fragmentos de basura espacial se corresponden con los puntos u óvalos.

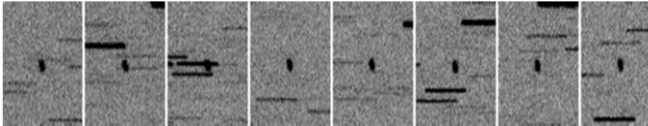


Figura 2. Imágenes del MODEST tomadas de la órbita geostacionaria (NASA's Orbital Debris Program Office, *Briefing to the NASA Advisory Council*, s. f.).

Meter-Class Autonomous Telescope (MCAT): la NASA desarrolló este sistema conjuntamente con el Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea y el plan se basaba en la construcción de un telescopio de 1,3 metros en la isla Kwajalein Atoll. El instrumento del telescopio utiliza un sensor de imagen de fotograma completo de dispositivo de carga acoplada con resoluciones de imagen de hasta 4k.

1.4.3. Eliminación de la basura

1.4.3.1. Sistemas de desorbitación pasiva (PMD)

La utilización de sistemas de desorbitación pasiva al final de la vida útil de cada objeto representa la opción más económica. Además, la ventaja de este método es que se pueden desorbitar cualquier tipo de objetos, sin importar el tamaño del mismo. Un inconveniente que tendría este método es que solo sería efectivo en órbitas bajas.

La idea es conseguir crear una suma significativa de resistencia atmosférica que acelere la reentrada en la atmósfera de un vehículo u objeto espacial cuando éste deja de ser funcional. Dentro de este sistema encontramos una gran variedad de dispositivos como pegamentos, adhesivos, globos, membranas inflables (Inflatable Tube Membranes ITM), correas suspendibles o velas solares, los cuales son sistemas muy sencillos de implementar. Gracias a estos sistemas se podrían reducir a la mitad o incluso a un tercio el tiempo que tardaría el satélite en desorbitar.

En cuanto a los adhesivos, espumas expandibles o pegamentos, éstos se adhieren a la superficie del objeto de basura espacial para expandirse en volumen y alterar las órbitas de los desechos espaciales. Una posible forma de generar una variación en este campo podría ser la congelación de vahos, que causaría una resistencia orbital que desorbitaría el objeto.

Los principales sistemas pasivos que existen son los siguientes:

Velas Solares: pueden ser utilizadas con satélites de mayor tamaño y ya están siendo utilizadas en la realidad, por lo que se podría considerar este método como viable. Las velas solares fueron utilizadas

para acelerar la desorbitación del satélite Fastrac de la NASA y se usaron en el proyecto canadiense CANX-Drag-Sail. Además, un gran número de programas universitarios de todo el mundo están desarrollando sistemas similares, por lo que, en ese aspecto, este método tiene futuro ya que se está trabajando bastante en implementar mejoras en él con el objetivo de que sea aún más efectivo y reducir los costes de fabricación. Destacan los productos AEOLDOS (Aerodynamic End Of Life DeOrbit System) de Clyde Space, RODEO de Composite Technology Development y Deorbit Sail de Surrey Satellite Technology.

Estos sistemas tienen un nivel de desarrollo muy elevado y ya se está pensando en sacarlos al mercado. En la Figura 3 se muestra la vela solar AEOLDOS, pero en una versión de prototipo porque aún está en fase de desarrollo.

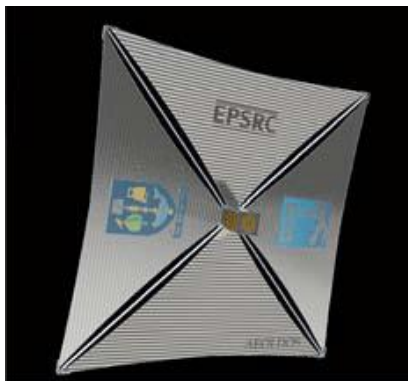


Figura 3. Representación del prototipo de vela solar AEOLDOS (Figure 12.4. AEOLDOS Can Multiply the Average Frontal Area of a Typical..., s. f.).

Globos de gas: es un sistema que se basa en que un globo se conectaría a un satélite para hincharse al final de la vida útil del satélite que lo transporta (Figura 4). Las mayores ventajas de los globos de gas son su fiabilidad, el bajo coste que suponen y el pequeño volumen de almacenamiento que requieren, además de su bajo peso. De hecho, el globo pesaría menos que el combustible necesario para desorbitar el satélite, por lo que hace de este método una alternativa económicamente efectiva y fácil de implementar. Variando el nivel de inflado del globo durante el retorno hacia la Tierra se podría llegar a controlar con mayor o menor precisión la localización del impacto.

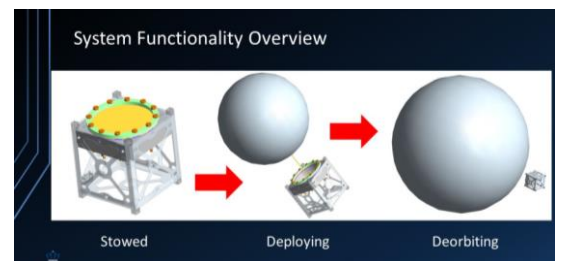


Figura 4. Representación de un globo de gas para la desorbitación de un CubeSat (Sánchez López, 2018).

Correas de intercambio de impulso o de momento: este sistema se basa en ataduras no conductoras que tienen la

capacidad de generar una propulsión pasiva y que permiten transferir el impulso entre objetos en el espacio. En concreto, las ataduras pueden redistribuir el impulso de un sistema de un cuerpo a otro, pero el impulso general siempre se conserva («Momentum exchange tether», 2021).

El principio de este sistema se fundamenta en la fuerza del gradiente de gravedad, en la que dos objetos separados por una distancia, pero unidos por una cuerda, son separados por la fuerza del gradiente de gravedad, lo que causa una alineación vertical entre los dos objetos. Aparte de esto y debido a las irregularidades en el campo gravitacional del cuerpo central, el sistema de sujeción, que estaría casi verticalmente alineado, libra u oscila de una manera similar a la de un péndulo, alrededor del centro de masa del sistema. Este movimiento de oscilación o de balanceo se puede utilizar para ascender o descender la órbita de un sistema en tándem sin usar ningún tipo de propulsión (*Space Tethers - Directorio eoPortal - Misiones satelitales*, s. f.). Tal y como se muestra en la *Figura 5*, un despliegue dinámico de un cuerpo desde otro provoca una ganancia de impulso, lo que da como resultado la posibilidad de alterar las órbitas para hacerlas más altas o bajas, lo que a su vez permitiría

desorbitar grandes objetos. La mayor desventaja que presenta este sistema es el peso añadido que supondría llevar el cuerpo junto con la correa; además de las operaciones de despliegado, en las que hay grandes posibilidades de que se produzca una desorbitación incompleta o errónea, lo que haría que el sistema no fuese efectivo, y supondría que el objeto que se ha pretendido desorbitar se convertirá en basura espacial de gran tamaño.

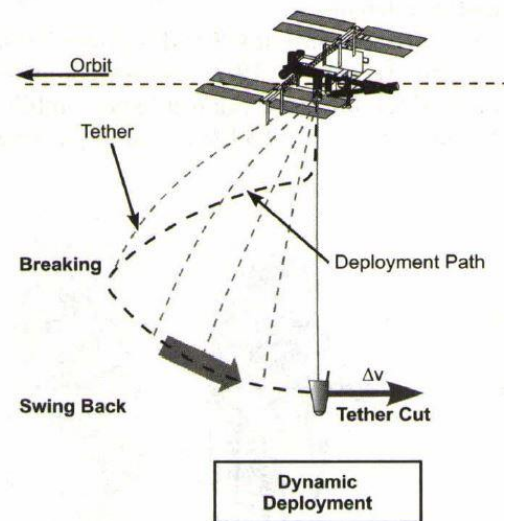


Figura 5. Representación del sistema de correas de intercambio de impulso (*NASA's Orbital Debris Program Office, Briefing to the NASA Advisory Council*, s. f.).

1.4.3.2. Métodos One-by-one

Los sistemas de eliminación de basura espacial de uno en uno ya han sido demostrados y los pasos para que el

dispositivo se adjunte a la basura espacial y la consiga desorbitar serían: en primer lugar, encontrarse con el escombros utilizando la propulsión de lanzamiento y una pequeña suma de combustible añadida. Después, el dispositivo captura al escombros con su brazo robótico y lo estabiliza. A continuación, el dispositivo deberá desorbitar la basura utilizando combustible a modo de propulsión. Finalmente, comenzará la reentrada en la atmósfera, en la que se quemará la basura capturada y el dispositivo recolector. En este ámbito podría destacarse el proyecto e.Deorbit de la ESA (Biesbroek et al., s. f.).

1.4.3.3. Láseres

Este tipo de métodos pueden ser muy útiles a la hora de combatir el problema de la basura espacial. El primer método es la irradiación de un objeto que sea basura espacial cuando este presenta amenaza de colisionar con otro objeto en órbita, lo que modificaría la trayectoria del escombros y evitará el impacto. Esto podría consistir en un sistema de seguimiento basado en el láser y tendría una gran efectividad porque a esas velocidades orbitales incluso un pequeño cambio en el periodo orbital podría ser suficiente para desviar la órbita y evitar una colisión. Otra propuesta es la de posicionar un sistema de energía irradiada

en la ISS para eliminar la basura espacial de la órbita baja terrestre desde esa estratégica localización. Más concretamente, este tipo de sistemas serían especialmente efectivos para la basura que se encuentre orbitando a pocos cientos de kilómetros de la superficie terrestre.

1.4.3.4. Métodos One-by-many

Estos sistemas actúan igual que los one-by-one pero con la diferencia de que estos eliminarían múltiples fragmentos en cada misión.

Pulso atmosférico: este sistema se basaría en que la basura espacial puede ser eliminada de la órbita baja terrestre a partir de perturbaciones de ondas desde altitudes bajas. Estos pulsos de gases atmosféricos generarían una resistencia que provocaría la reentrada y la posterior desintegración de los fragmentos mucho antes de lo que estos lo harían de forma natural.

En cuanto al tipo de basura que se podría eliminar, este método podría ser muy efectivo para basura de tamaño pequeño y la idea que se propone para ello sería utilizar una plataforma aérea, como por ejemplo unos globos de gran altitud, para generar pulsos de aire atmosférico en el espacio.

La altitud a la que estos sistemas operan estaría entre los 25 y 35 km, de esta forma se minimizan los efectos de resistencia desde la parte inferior de la atmósfera. Una ventaja puede ser la seguridad que ofrece en el sentido de que no se emplea ningún dispositivo en órbita en este sistema, en donde cualquier mal funcionamiento o avería podría generar nueva basura espacial. Por otra parte, otra ventaja sería el bajo coste que tendría este sistema, ya que como se ha mencionado anteriormente, no presenta ningún dispositivo aparte del propio globo, lo que reduce considerablemente los costes. Una posible desventaja de la propuesta es la cantidad de combustible que se necesitaría para impulsar los gases hasta la órbita baja terrestre, así como el hecho de que, para eliminar gran cantidad de basura con un solo impulso, sería necesario que ésta se encontrase cerca del sistema, pero como no se ha probado nunca, no se sabe si sería realmente efectivo en la eliminación de basura espacial en grandes cantidades.

Motores de plasma: fue llevado a cabo por Lei Lan, Hexi Baoyin y Jingyang Li, en la Universidad Cornell (Nueva York) y se basa en la idea de un motor espacial con la capacidad de eliminar continuamente los desechos espaciales utilizando estos mismos como propulsor (Lan et al., 2015).

El Debris Engine está compuesto principalmente por un desintegrador de basura preliminar, un molino de bolas un sistema de carga y un acelerador tándem electrostático (Figura 6). El desintegrador preliminar desintegra los fragmentos de basura de gran tamaño en unos de un tamaño adecuado para que después el molino de bolas triture los fragmentos hasta convertirlos en polvo, que pasa posteriormente al sistema de carga; y más adelante el polvo cargado es acelerado en el acelerador tándem electrostático, en el que alcanza una gran velocidad. Por último, éste se eyecta desde la tobera, de forma que la nave obtiene un empuje que le permite avanzar hasta el siguiente fragmento de basura espacial, en el que repite el mismo proceso una y otra vez.

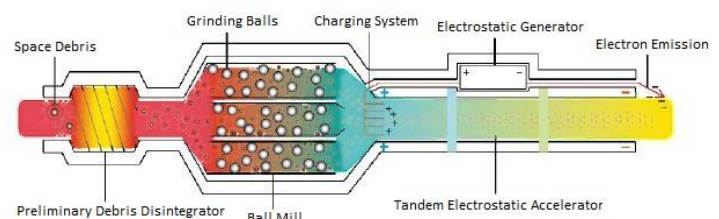


Figura 6. Estructura del proyecto Debris Engine.

Correas electrodinámicas (Electrodynamic Tethers): este sistema consiste en la utilización de largos cables conductivos que una vez desplegados en el espacio pueden ser usados para generar potencia a expensas de la energía cinética

del movimiento orbital, o para conseguir una fuerza de empuje o resistencia a través de la interacción entre cargas en movimiento y campos magnéticos (Figura 7). El principio físico que hace que este sistema funcione es la fuerza de Lorentz. Por otra parte, una ventaja que posee este sistema es que, al no emplear combustible, resulta una opción de bajo coste en comparación con otros métodos expuestos anteriormente.

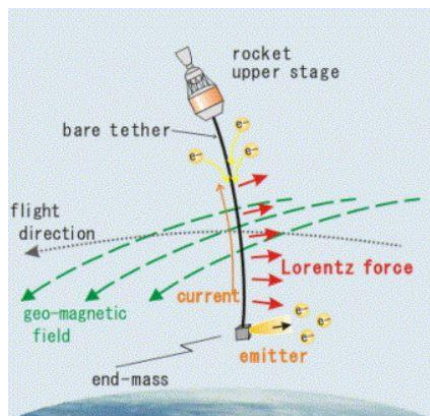


Figura 7. Explicación gráfica del sistema de correa electrodinámica (Kawamoto et al., 2006).

limpieza espacial. Esta maqueta ha sido creada en un programa llamado Ultimaker Cura (Figura 8), y tras esto se procedió a adaptar el formato digital para hacerlo apto para su impresión 3D. Finalmente, esta se llevó a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño. Tal y como se ve en las siguientes imágenes, en el formato digital se ven claramente todas las partes que integran el satélite, que está formado por dos partes, la primera y más grande es el Servicer, que actúa como sistema principal y realmente es el que realiza toda la maniobra. Y por otro lado el cliente, que es el más pequeño y cuya única función es la de servir como “basura espacial” para las pruebas de todos los sistemas y maniobras del Servicer.

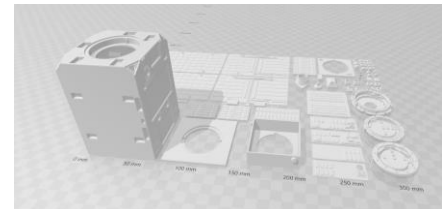


Figura 8. Prototipo propuesto

1.4.3.5. Prototipo Propuesto

El modelo propuesto en este caso se trata de un satélite que tiene la función de recoger basura espacial. El prototipo se ha materializado en la construcción de una maqueta a escala de un posible sistema de reducción de la basura en el espacio. El modelo está inspirado en un sistema de la empresa japonesa Astroscale, que actualmente es líder en el sector de la

1.5. Conclusiones

Después de realizar este trabajo de investigación acerca de la basura espacial son varias las conclusiones extraídas. Tras haber ampliado el conocimiento sobre diversos aspectos de la basura espacial, se

puede confirmar que este problema es una amenaza real y peligrosa para el mundo en el que vivimos. Como ya se ha explicado, el aumento de la basura espacial es un hecho irrefutable tal y como ha demostrado el Síndrome de Kessler, queda a la vista que, si no se hace nada para remediar la situación, la basura espacial seguirá creciendo cada vez más rápido. Esto puede acarrear consecuencias muy graves como la imposibilidad de lanzar objetos al espacio en un largo periodo de tiempo, lo que sería devastador para la creciente carrera espacial que se está gestando en todo el planeta. Por ejemplo, países como China o India, ya han desarrollado diversas misiones espaciales como la de enviar un vehículo rover a Marte, que es un proyecto que ha llevado a cabo China con gran éxito. Entonces surge la evidente necesidad de actuar para poder solucionar este problema. En cuanto a los avances en los sistemas de detección de basura espacial, hemos observado que muchos de los observatorios que hay en el mundo se están centrando cada vez más en la detección de ésta. Pero no se debe olvidar que todavía hacen falta mejores sistemas de "tracking" de la basura para evitar eventos como la colisión de satélites. A su vez, otro aspecto importante a tener en cuenta es el tema de las barreras legales que se presentan a la hora de poder

eliminar la basura; y en este trabajo se refleja la necesidad que existe de crear un organismo internacional regulador que establezca un marco jurídico acorde a la situación actual. Se debe comentar también que para superar las barreras económicas hace falta poner en funcionamiento un sistema que fuese capaz de generar fondos que se destinarían a la limpieza del espacio. Esto podría ser factible mediante el pago de tasas de las empresas que operen en el espacio y que pueden generar basura espacial. En lo que respecta a las medidas que se han tomado para reducir la basura espacial, hemos visto que una forma muy adecuada de no generar más residuos es mediante el uso de métodos de eliminación pasivos implementados al final de la vida útil del sistema. En relación con los métodos de eliminación, una conclusión que se obtiene es que los métodos one-by-one son altamente ineficientes, lentos y caros; por lo que la investigación en este campo debería estar centrada en encontrar métodos mucho más económicos y que no requieran tanto tiempo. Por el contrario, hemos visto que los sistemas láser son una muy buena alternativa a los one-by-one y si se siguen haciendo avances en este campo de la investigación, podríamos estar delante de uno de los métodos del futuro en cuanto a la eliminación de basura en el espacio.

Siguiendo con los métodos, cabe destacar que la utilización de los métodos one-by-many es crucial, sobre todo para aquella basura que tiene un tamaño menor a 1 centímetro de diámetro. Este tipo de fragmentos son los que suponen un mayor riesgo porque existen millones de ellos y son irrastreables con los sistemas de detección actuales. Por ello, uno de los sistemas más prometedores es el de los motores que utilizan basura espacial como combustible, y más concretamente el proyecto Debris Engine. Este método sería muy eficaz contra los pequeños fragmentos, ya que al motor le costaría menos adaptarlos para convertirlos en combustible debido que ya tendrían el tamaño óptimo, lo que ahorraría una gran cantidad de energía en la fase de triturado. Además, otro sistema revolucionario que sería capaz de eliminar toda la basura espacial a largo plazo sería el de las correas electrodinámicas. La gran ventaja que presenta este sistema frente al resto es que el medio de propulsión no emplea combustible, característica que hace a este sistema predilecto en términos de eficiencia y bajos costes. Por último y en lo que a mí respecta, los proyectos enfocados a una eliminación activa de basura espacial son los que deberían tener mayor desarrollo en un futuro con el fin de garantizar un entorno

espacial limpio y sostenible, que no suponga ningún riesgo para nosotros ni para las generaciones venideras, ya que estamos a las puertas de una era de exploración espacial sin precedentes.

Índice de figuras

Figura 1. Número de objetos catalogados en la órbita terrestre según tipo de objeto (<i>TFG_SAMUEL_OCANA_LOSADA.pdf</i> , s. f.).....	5
Figura 2. Imágenes del MODEST tomadas de la órbita geoestacionaria (<i>NASA's Orbital Debris Program Office, Briefing to the NASA Advisory Council</i> , s. f.).....	11
Figura 3. Representación del prototipo de vela solar AEOLDOS (<i>Figure 12.4. AEOLDOS Can Multiply the Average Frontal Area of a Typical...</i> , s. f.).....	12
Figura 4. Representación de un globo de gas para la desorbitación de un CubeSat (Sánchez López, 2018).	12
Figura 5. Representación del sistema de correas de intercambio de impulso (<i>NASA's Orbital Debris Program Office, Briefing to the NASA Advisory Council</i> , s. f.).	13
Figura 6. Estructura del proyecto Debris Engine.....	15

Figura 7. Explicación gráfica del sistema de correas electrodinámicas (Kawamoto et al., 2006). 16

Figura 8. Prototipo propuesto..... 16

Índice de tablas

Tabla 1. Las peores rupturas de satélites en base a la cantidad de basura emitida..... 6

Antenas en fase. (2021). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Antenas_en_fase&oldid=134060311

ARES | Orbital Debris Program Office | Debris Mitigation. (s. f.). Recuperado 15 de mayo de 2021, de <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/mitigation/>

Biesbroek, R., Innocenti, L., Wolahan, A., & Serrano, S. M. (s. f.). *E.DEORBIT – ESA'S ACTIVE DEBRIS REMOVAL MISSION*. 10.

Figure 12.4. AEOLDOS can multiply the average frontal area of a typical... (s. f.). ResearchGate. Recuperado 27 de junio de 2021, de https://www.researchgate.net/figure/AEOLDOS-can-multiply-the-average-frontal-area-of-a-typical-cubesat-mission-almost_fig152_289527097

Kawamoto, S., Makida, T., Sasaki, F., Okawa, Y., & Nishida, S. (2006). Precise numerical simulations of electrodynamic tethers for an active debris removal system. *Acta Astronautica*, 59(1), 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.02.035>

Kessler, D. J. (1991). Collisional cascading: The limits of population growth in low earth orbit. *Advances in Space Research*, 11(12),

1.6. Glosario de Siglas

- GEO (Geosynchronous Earth Orbit)
- ISS (International Space Station)
- LEO (Low Earth Orbit)
- MEO (Medium Earth Orbit)
- NASA (National Aeronautics and Space Administration)
- PMD (Post-Mission Disposal)
- UHF (Ultra High Frequency)
- VHF (Very High Frequency)

2. Bibliografía

6789506. (s. f.). *Orbital Debris Management & Risk Mitigation*. Issuu. Recuperado 20 de junio de 2021, de https://issuu.com/msazriel/docs/orbital_debris_management

63-66. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90543-S](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90543-S)

Lan, L., Li, J., & Baoyin, H. (2015). Debris Engine: A Potential Thruster for Space Debris Removal. *arXiv:1511.07246 [astro-ph, physics:physics]*.
<http://arxiv.org/abs/1511.07246>

Momentum exchange tether. (2021). En *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Momentum_exchange_tether&oldid=1036683846

NASA's Orbital Debris Program Office, Briefing to the NASA Advisory Council. (s. f.). 50.

Sánchez López, J. (2018). *Un problema real, la basura espacial* [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València].
<https://riunet.upv.es/handle/10251/101742>

Space Tethers—Directorio eoPortal—Misiones satelitales. (s. f.). Recuperado 20 de agosto de 2021, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/space-tethers>

TFG_SAMUEL_OCANA_LOSADA.pdf. (s. f.). Recuperado 15 de mayo de 2021, de http://oa.upm.es/51151/1/TFG_SAMUEL_OCANA_LOSADA.pdf