



DESCUBRIENDO LAS MISIONES ESPACIALES A TRAVÉS DE SUS DATOS

Guía introductoria

PROGRAMA INVESTIGA I+D+i
Edición 2024-2025

Naiara Fernandez De Bobadilla Vallano
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial



Instituto
Nacional
de Técnica
Aeroespacial

Tabla de contenido

1. Las misiones espaciales	2
2. Datos generados en misiones espaciales	5
2.1. <i>Telemetría de salud o housekeeping</i>	<i>5</i>
2.2. <i>Telemetría específica de cada misión.....</i>	<i>8</i>
2.3. <i>Telecomandos</i>	<i>11</i>
3. ¿Cuándo se pueden transmitir datos entre los segmentos de vuelo y tierra?	12
4. Camino de los datos	14
4.1. <i>Generación y almacenamiento de telemetría</i>	<i>14</i>
4.2. <i>Procesado de datos a bordo.....</i>	<i>15</i>
4.3. <i>Transmisión vuelo-tierra</i>	<i>15</i>
4.4. <i>Procesado de datos en tierra.....</i>	<i>16</i>
4.5. <i>Archivo y análisis de datos</i>	<i>17</i>
5. Aplicación de la ciencia de datos y la inteligencia artificial en las misiones espaciales	18
6. Basura Espacial.....	24
6.1. <i>¿Qué es la basura espacial y qué implicaciones tiene en las misiones actuales?.....</i>	<i>24</i>
6.2. <i>El papel de la ciencia de datos y la inteligencia artificial en la gestión de la basura espacial</i>	<i>25</i>
7. Temas de reflexión y preguntas abiertas.....	29
8. Bibliografía.....	30

En los últimos años, el incremento en el número de lanzamientos de satélites y la complejidad de las misiones espaciales han disparado el volumen de datos generados en la ciencia del espacio. Este auge ha contribuido significativamente al avance tecnológico y científico y a una mejora en nuestra calidad de vida. Sin embargo, también ha llevado a un aumento exponencial de la basura espacial, lo que puede llegar a tener graves consecuencias.

Esta guía servirá como una primera inmersión a las misiones espaciales desde un punto de vista de los datos que se generan e intervienen en ellas y a la aplicación de la ciencia de datos y la inteligencia artificial en ellas. Trataremos de dar respuesta a las siguientes cuestiones: ¿qué tipo de datos se generan en las misiones espaciales? ¿qué camino siguen esos datos desde que son generados en el espacio hasta que son interpretados en tierra por los usuarios finales? ¿cuándo se puede realizar la transmisión de ellos entre el espacio y La Tierra? ¿Qué es la basura espacial y qué datos intervienen en su gestión? ¿Qué aplicaciones tiene la ciencia de datos y la inteligencia artificial en las misiones espaciales y en la gestión del tráfico y la basura espacial?

1. Las misiones espaciales

Una misión espacial es un proyecto en el que se desarrollan una serie de actividades planificadas y coordinadas abarcando múltiples disciplinas para conseguir objetivos específicos en el espacio, y pueden ser llevadas a cabo por agencias espaciales, instituciones científicas o empresas privadas. Estos objetivos son muy diversos, y pueden ir desde la exploración de planetas, lunas y estrellas, la observación de fenómenos cósmicos y La Tierra, la investigación científica, hasta la prestación de servicios a la población como la comunicación, la navegación o la vigilancia ambiental. Todas estas aplicaciones y servicios dependen de los datos que viajan en el espacio.

Las misiones espaciales más comunes son no tripuladas, aunque también se desarrollan misiones tripuladas llevando astronautas al espacio. Un ejemplo de las últimas es la Estación Espacial Internacional (ISS, de sus siglas en inglés), que puede alojar una tripulación de hasta 6 astronautas gracias a su equipamiento de soporte vital, que proporciona aire respirable, agua potable y control de temperatura y humedad, asegurando un entorno seguro para los astronautas y dotándola de gran complejidad.



Figura 1: Estación Espacial Internacional

Pero, una misión espacial no sólo está compuesta por las naves que se envían al espacio, ¿te imaginas en qué podría convertirse un satélite sin capacidad de comunicación con tierra para enviar todos los datos que genera? La información no llegaría a los usuarios finales y no sería de utilidad tener un segmento de vuelo en perfecto funcionamiento si no disponemos de un canal de comunicaciones y una infraestructura en tierra que permita recibir e interpretar los datos. Por este motivo, es imprescindible disponer de un sistema de comunicaciones robusto que permita la transmisión de datos entre vuelo y tierra. Sin él, no se podría cumplir de manera exitosa el objetivo principal de la misión para el que ha sido inicialmente diseñada. A continuación, vamos a introducir brevemente los elementos básicos de toda misión espacial.

Segmento de vuelo

Es el elemento que se envía al espacio, que puede ser un satélite orbitando La Tierra, una sonda espacial destinada a viajar grandes distancias en el espacio, ya sea para orbitar otros cuerpos, aterrizar en su superficie o pasar cerca de ellos para recolectar datos, o un rover diseñado para desplazarse sobre la superficie de Marte. Las misiones espaciales más comunes son los satélites que orbitan La Tierra. Los satélites se dividen principalmente en dos módulos, el módulo de servicio o plataforma y el módulo de carga útil o de pago. La carga útil realiza las tareas específicas de la misión, como telescopios o radares que recopilan datos científicos o de interés para los usuarios en La Tierra, pero requiere de la plataforma que, mediante distintos subsistemas, le da soporte para asegurar su correcto funcionamiento. El segmento de vuelo debe de ser diseñado para operar en las condiciones del espacio, teniendo en cuenta la radiación, el vacío y las temperaturas extremas.

Lanzador

Para transportar al espacio el segmento de vuelo se hace uso del segmento lanzador o, lo más comúnmente conocido, el cohete. Los lanzadores están compuestos por varias etapas que se desprenden a medida que consumen su combustible, permitiendo al segmento de vuelo alcanzar la velocidad y altitud necesarias para entrar en su órbita deseada o seguir su trayectoria en el espacio.

Segmento terreno

El segmento terreno consiste en toda la infraestructura en tierra necesaria para establecer la comunicación con el satélite y planificar, monitorizar y controlar el segmento de vuelo. En este se lleva el control de la misión y también se realiza el análisis de los datos recibidos del satélite.

El segmento terreno de cada misión dispondrá de, al menos, una estación terrena capaz de recibir y enviar señales de radiofrecuencia desde y hacia el satélite y convertirlas en datos entendibles por el resto de sistemas. El principal elemento de una estación terrena es la antena que variará según la misión, yendo desde antenas yagi parecidas a las que tenemos en nuestras casas hasta antenas parabólicas con diámetros de hasta 70 m, como la instalada en Robledo de Chavela como parte de la Red de Espacio Profundo de la NASA, en colaboración con INTA y la Agencia Espacial Europea (ESA). La complejidad de estas antenas dependerá también del tipo de órbita o trayectoria del segmento de vuelo.

Además, los segmentos terrenos dispondrán de centros de operaciones y de control de la misión desde los que se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Planificación de las actividades a ejecutar por el segmento de vuelo y conversión de las mismas en instrucciones entendibles por el satélite
- Recepción de los datos de los satélites, procesado, monitorizado y archivo de los mismos
- Cálculos de dinámica orbital para el control de la trayectoria del segmento de vuelo y ejecución de maniobras orbitales
- Gestión de las peticiones de usuarios y distribución de los datos a los mismos
- Medida de la calidad de los datos proporcionados por los satélites (imágenes, señales de comunicación...)

Segmento usuario

El segmento usuario consiste en los usuarios finales de los datos y servicios que proporciona la misión y da acceso a los mismos para su explotación. Los usuarios pueden ser muy variados, agencias gubernamentales, organizaciones científicas o nosotros mismos. Los usuarios deberán disponer de hardware y software necesario para hacer uso de los datos finales que, dependiendo de la misión, requerirá mayor o menor complejidad pudiendo incluir centros de análisis, sistemas de distribución de información o herramientas que permitan interactuar con los datos, como aplicaciones móviles.

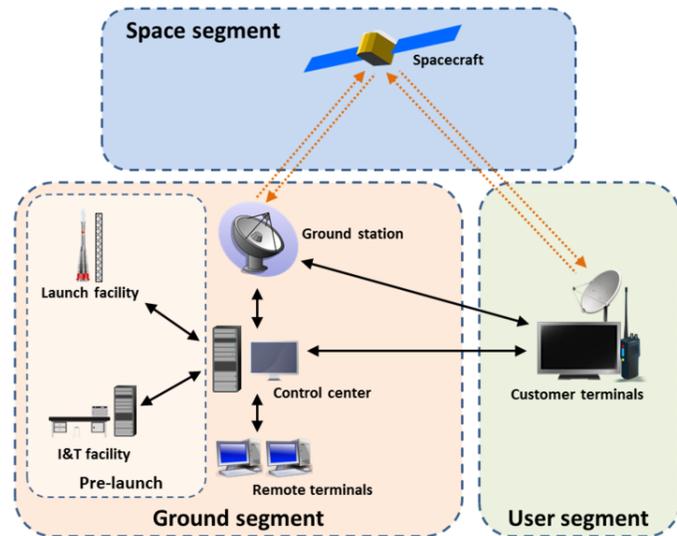


Figura 2: Elementos de una misión espacial

Operaciones

Las operaciones son una parte esencial de las misiones espaciales que, no son mencionadas habitualmente, pero merecen ser conocidas. Éstas son todas las actividades y procedimientos que se deben ejecutar para mantener una misión espacial y asegurar su correcto funcionamiento. Consisten en la recolección de los datos de la misión para verificar y monitorizar la salud de la nave espacial y detectar y solucionar anomalías, además del envío de instrucciones y configuración de la nave espacial para las distintas tareas que tendrá que ejecutar. Como parte de las operaciones también se incluyen el posicionamiento de la nave en su órbita nominal y el control y mantenimiento de la misma mediante maniobras.

Toda misión tiene una fase inicial de operaciones justo después de lanzamiento en la que se comprueban que todos los equipos funcionan correctamente. Se continúa con una segunda fase de comisionado, en la que se inician las operaciones con las cargas de pago de los satélites y se evalúan sus prestaciones. Una vez finalizada, se inicia la fase rutinaria en la que se desarrollan las operaciones nominales durante toda la vida útil de la misión hasta su fin, momento en el que se ejecutan las operaciones requeridas para evitar la generación de basura espacial, incluyendo una pasivación del segmento de vuelo llevándolo a un estado inerte y la colocación del mismo en una órbita cementerio o de re-entrada atmosférica. En cada una de estas fases, se pueden dar anomalías o contingencias en las que sea necesario realizar operaciones no rutinarias que solucionen los problemas en órbita y puedan llevar al satélite a un estado nominal para continuar con sus actividades.

Previamente al lanzamiento, todas las operaciones mencionadas pasan por una fase de definición, en las que se detallan paso a paso y se validan mediante ensayos. Además, también se ejecutan simulaciones de preparación y entrenamiento para los futuros operadores que estarán a cargo de la misión.

2. Datos generados en misiones espaciales

Después de la introducción a las misiones espaciales, vamos a centrarnos en conocer los tipos de datos que se generan en ellas. Una nave espacial es una fuente de información que está continuamente generando datos de medidas del entorno y de sus instrumentos y subsistemas, que deben de ser almacenados, transmitidos a tierra y procesados. Los datos que generan los satélites y son enviados a tierra se denominan telemetría, que se clasifica en telemetría de salud o específica de cada misión. Los datos que se transmiten en el enlace de subida, tierra-satélite, son llamados telecomandos. A continuación, explicaremos en más detalle en qué consisten.

2.1. Telemetría de salud o housekeeping

La telemetría de housekeeping abarca todos los datos que proporcionan información acerca del estado de salud de cada uno de los subsistemas que componen un satélite, siendo imprescindible realizar una continua monitorización de los mismos para asegurar su correcto funcionamiento e incluso predecir anomalías y tomar acciones correctivas antes de que los fallos lleguen a ser de mayor magnitud. En cada misión, existirán cientos o miles de parámetros de telemetrías de este tipo, dependiendo de la complejidad de cada una. La telemetría de housekeeping proporcionará información de cada uno de los siguientes subsistemas comunes a toda misión espacial:

Subsistema de potencia

Es el responsable de proporcionar, almacenar y distribuir la energía necesaria para el funcionamiento de todos los equipos del satélite. La energía se genera a través de paneles solares que convierten la luz del Sol en electricidad y se debe de almacenar en baterías para su uso durante los períodos en los que el satélite no recibe luz solar, como cuando está en la sombra de la Tierra o, lo que es lo mismo, en eclipse. Como parte de este subsistema, también se encuentra la red de distribución de energía a todas las unidades, así como convertidores de voltaje para adaptar el voltaje requerido por cada una de ellas.

Algunas telemetrías típicas que se monitorizan en tierra son el consumo de potencia de las distintas unidades, las corrientes generadas por los paneles solares o el porcentaje de descarga de la batería. Éste último parámetro es de especial importancia para detectar una degradación en las baterías que podría llegar a implicar el fin de la misión. En caso de detectar anomalías en las baterías, puede ser necesario realizar una investigación más exhaustiva de otras telemetrías para averiguar la causa y ajustar las operaciones de la misión para poder darle continuidad a pesar del fallo.

Subsistema térmico

Su función es mantener las temperaturas dentro de unos rangos operacionales para los que han sido diseñados los equipos (las baterías suelen tener un intervalo de funcionamiento estricto entre -5 °C y 20 °C , mientras que los telescopios ópticos deben de operar en condiciones muy frías, alrededor de -45 °C). Dado que en el espacio las temperaturas pueden variar de manera drástica, entre períodos de Sol y eclipse, este subsistema utiliza distintas tecnologías para disipar el exceso de calor o retenerlo según sea necesario. Estas tecnologías pueden ser pasivas, como pinturas o radiadores y activas como calentadores.

Todos los equipos de un satélite disponen de sensores que miden su temperatura y ésta es monitorizada en tierra durante toda la misión. Otros datos típicos que se recopilan son el estado de los componentes activos, para asegurar que se encienden y apagan cuando llegan a los límites de temperatura definidos para ello.

Subsistema de determinación y control de órbita y actitud

Este subsistema controla la orientación o actitud del satélite. Para ello, utiliza sensores para determinar la orientación y actuadores para ajustarla y controlarla. Existen distintos tipos de sensores, como sensores de Sol o estrellas para determinar la orientación del satélite con respecto a ellos o magnetómetros que miden el campo magnético de La Tierra. Como actuadores típicos, encontramos ruedas de reacción o magnetopares, las ruedas de reacción permiten reorientar el satélite a través de un cambio en su velocidad de rotación mientras que los magnetopares crean un campo magnético que, interactuando con el campo magnético terrestre, resulta en un par ejercido sobre la nave. El control de la actitud es indispensable para asegurar un correcto apuntamiento del satélite con el fin de apuntar las antenas del satélite a las de tierra para establecer comunicación, orientar los paneles al Sol para generar energía, apuntar los propulsores en una dirección específica para realizar una maniobra orbital o apuntar los instrumentos científicos a sus objetivos de observación. Dentro de este sistema también podemos meter al equipo GPS que suelen llevar los satélites para conocer su posición en todo momento.

Telemetría típica que se genera son la velocidad de las ruedas de reacción o el estado de las distintas unidades, ya que su uso dependerá del modo de actitud en el que se encuentre el satélite para mantener diferentes orientaciones. Los datos GPS también se descargan y se utilizan para determinar la trayectoria exacta del satélite.

Subsistema de propulsión

Este subsistema proporciona la capacidad de realizar maniobras en el espacio y realizar cambios de órbita para ajustar, por ejemplo, su altitud. Para ello, se dispone de propulsores y un tanque con combustible que, generalmente, contiene hidracina. Las maniobras son necesarias para corregir los errores de inyección en la órbita nominal por el lanzador, evitar colisiones con basura espacial y otros satélites o mantener la órbita que se puede ver modificada por el efecto de perturbaciones.

Algunas de las telemetrías típicas de este subsistema son el estado de encendido de los propulsores sólo durante las maniobras, la temperatura y presión del tanque, con los que se calculan el combustible remanente en el satélite o los pulsos de los propulsores, para verificar que las maniobras se han ejecutado correctamente y de acuerdo a lo calculado.

Subsistema de comunicaciones

El subsistema de comunicaciones permite la transmisión de toda la telemetría y la recepción de telecomandos enviados desde tierra a través de señales de radiofrecuencia en las que se encapsulan. Incluye antenas, radios y cableado específico que trabajan a las frecuencias asignadas a la misión para transmitir una señal con la suficiente potencia para que pueda ser decodificada en las estaciones terrenas y, para recibir y amplificar la tenue señal que llega de ellas.

La potencia de la señal de las estaciones terrenas que se recibe a bordo del satélite es un parámetro de telemetría que se monitoriza con el fin de asegurar que un buen nivel de señal está siendo transmitido por la antena de tierra (indicativo de su funcionamiento) y que el satélite es capaz de amplificarla y decodificar sus datos. Otros parámetros comunes son la temperatura de los transmisores o el enganche de la radio de vuelo a la señal de la estación terrena.

Carga de pago o carga útil

La carga útil es el componente que lleva a cabo la misión principal del satélite, el elemento central de la misma. Puede ser una cámara para tomar imágenes de la Tierra, un instrumento científico para medir radiación o un transpondedor para comunicaciones. Este subsistema está diseñado en función de los objetivos específicos de la misión, la cual podrá incluir una o más cargas útiles con diferentes aplicaciones.

Además de los datos específicos de la carga de pago, que veremos en el siguiente apartado, éstas también generarán telemetría de housekeeping informando acerca de la misma. Por ejemplo, su estado operacional, que nos informa acerca de si se encuentra en un estado nominal o de contingencia que no le permita ejecutar las tareas que se le ha ordenado.

Subsistema de gestión de datos

Este subsistema es el cerebro del satélite que gestiona el flujo de datos dentro del mismo, recolectando los datos de los distintos subsistemas, almacenándolos y procesándolos para transmitirlos a Tierra a través del subsistema de comunicaciones, y decodificando, almacenando y ejecutando los telecomandos recibidos en el satélite. Además, también es el responsable de gestionar y distribuir el tiempo del reloj de a bordo y de detectar y recuperarse de manera autónoma de fallos en el satélite sin la interacción del segmento terreno en caso de emergencia, los denominados FDIR (Failure Detection Isolation and Recovery). Por último, también se encarga de aplicar protocolos de comunicaciones de datos e introducir técnicas de detección y corrección de errores en los datos para evitar pérdidas de los mismos en los canales de comunicación. Para todo esto, dispone de un ordenador de a bordo con múltiples procesadores, un sistema de buses capaz de transmitir los datos entre éste y el resto de subsistemas y robustas memorias de almacenamiento.

Entre las telemetrías propias de este subsistema podemos encontrar el porcentaje de almacenamiento de las memorias de a bordo, que habrá que mantener para evitar pérdida de datos, FDIRs que han podido lanzarse y el estado en el que se encuentra el satélite tras estos, o el estado de la cola de telecomandos en memoria y el número de ellos.

Subsistema de Estructura

La estructura es el esqueleto del satélite, proporcionando soporte mecánico a todos los demás subsistemas. Ésta debe diseñarse para soportar las cargas y fuerzas durante el lanzamiento con la mínima masa posible, ya que cuanto más peso, más caro resulta el lanzamiento del satélite. Como parte de este subsistema se encuentran los elementos mecánicos que permiten el despliegue de ciertas unidades como los paneles solares, antenas o tapas de protección de elementos ópticos. Sin embargo, los mecanismos son elementos cuyo uso se minimiza en espacio ya que son fuentes de posibles fallos irreparables y que pueden suponer el fin de la misión.

La telemetría de estos mecanismos se envía a tierra para monitorizar su funcionamiento cuando se activan. Por ejemplo, será necesario monitorizar la explosión de pirotécnicos o temperaturas de resistencias para cortar los filamentos de despliegue. En ocasiones, los despliegues pueden inducir un par en el satélite, lo cual puede observarse a través de cambios en la telemetría de actitud del satélite.

Antes del lanzamiento de la misión y durante el diseño de la misma, se deberán determinar qué parámetros de telemetría de housekeeping se van a generar a bordo y enviar a tierra así como los telecomandos, los cuales deberán quedar definidos en detalle y en bases de datos. De acuerdo a la definición de éstos, se podrán dimensionar los sistemas y se customizará el software tanto del satélite como de tierra para lograr que ambos segmentos “hablen el mismo idioma” y comprendan los datos transmitidos entre ellos.

¿Qué ocurriría si alguno de los subsistemas dejase de funcionar? Un fallo de este tipo podría llegar a suponer el fin de la misión. Por ello, los equipos suelen estar redundados para que, en caso de pérdida de uno de ellos, se pueda continuar la misión de manera nominal. Existe la redundancia en frío, en la que un equipo está en funcionamiento y su redundante apagado y la redundancia en caliente, en la que ambos están trabajando simultáneamente. Para chequear que los equipos en redundancia en frío funcionan, se suelen realizar operaciones periódicas de mantenimiento en las que se activan temporalmente para verificar su estado y prestaciones.

En este enlace, podrás echar un vistazo a la telemetría de housekeeping de la ISS en tiempo real: [ISS Telemetry](#)

2.2. Telemetría específica de cada misión

Una vez que ya conocemos la telemetría de salud de las naves espaciales, vamos a ver el tipo de telemetría específica de cada misión, que dependerá de la función y los objetivos para los que haya sido diseñada. Así, vamos a hacer un repaso por ella a través de los distintos tipos de misión.

Misiones de observación de La Tierra

Las misiones de observación de La Tierra proporcionan datos de nuestro planeta, permitiendo una monitorización continua de distintas zonas. El análisis de sus datos tiene aplicaciones muy variadas, entre las que se encuentran las siguientes:

- Monitorización del cambio climático: el satélite Cryosat de la Agencia Espacial Europea (ESA) realiza observaciones y medidas del espesor de los casquetes de hielo polar y monitoriza los cambios en las placas de hielo de los océanos, esenciales para comprender los impactos del cambio climático.
- Monitorización de desastres naturales: con el objetivo de detectar inundaciones, terremotos o incendios forestales.
- Gestión de recursos naturales: permitiendo monitorizar la calidad del agua o el nivel de los ríos, así como llevar un seguimiento de los cultivos, el riego y la producción agrícola imprescindibles para la agricultura.
- Meteorología: como los satélites Meteosat o Metop de EUMETSAT, que permiten monitorizar el clima en tiempo real y proporcionan datos sobre humedad, precipitaciones, temperatura y nubes para la predicción del tiempo y el seguimiento de tormentas.
- Deforestación y uso del suelo: Satélites como Landsat han sido fundamentales para estudiar los cambios en la cobertura forestal y monitorizar la deforestación en regiones como la Amazonía.

La obtención de los datos de este tipo de misiones se basa en la teledetección, que permite obtener información de La Tierra escaneándola a distancia mediante el uso de sensores embarcados en el satélite. Éstos sensores pueden ser activos o pasivos. Los activos emiten señales a La Tierra para después detectar cambios en la señal de retorno reflejada después de rebotar en un obstáculo. Un ejemplo típico de este tipo de sensores es el radar que, emitiendo señales microondas, puede generar imágenes de la superficie terrestre incluso a través de nubes o en la oscuridad de los eclipses. El Lidar es otro sensor activo que es capaz de determinar la distancia de los objetivos mediante impulsos láser, multiplicando el tiempo que tarda en retornar la señal por la velocidad de la luz. Esto le permite generar mapas topográficos de alta precisión, útiles para la cartografía y el estudio del cambio en el terreno.

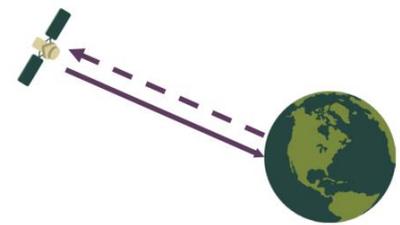


Figura 3: Sensores activos

Los sensores pasivos, por el contrario, no transmiten energía propia y las señales que detectan dependen de la energía del Sol que rebota en La Tierra, por lo que, generalmente, sólo pueden ser utilizados bajo condiciones de luz solar y no durante períodos de eclipse. Algunos de los sensores pasivos típicos son radiómetros y espectrómetros, capaces de medir la potencia de la radiación terrestre en diferentes longitudes de onda y proporcionando datos sobre la temperatura de la superficie, la cobertura de vegetación o la humedad del suelo. Otros sensores pasivos son cámaras multispectrales e hiperspectrales, capaces de capturar imágenes en múltiples bandas del espectro electromagnético (visible, infrarrojo, ultravioleta) permitiendo la identificación de diferentes materiales y fenómenos en la superficie terrestre.



Figura 4: Sensores pasivos

La misión PAZ. El satélite PAZ es un satélite de observación de La Tierra que pertenece al Programa Nacional de Observación de La Tierra por Satélite y cuyo centro de control se ubica en el Centro Espacial INTA Torrejón (CEIT). PAZ incluye tecnología radar que le permite generar productos con diversas aplicaciones como la vigilancia terrestre y marítima o la monitorización medioambiental o catástrofes naturales. En estos enlaces podrás consultar más información acerca del rol de PAZ durante la erupción volcánica de la Palma en 2021: [PAZ permite evaluar la deformación en La Palma](#), [Evolución de La Palma con PAZ](#).

Misiones de comunicaciones

Los datos de las misiones de comunicaciones consisten en voz, video y cualquier otra información que se requiera transmitir entre diferentes puntos de La Tierra a través de un satélite que actúa como repetidor, capturando las señales de un emisor, amplificándolas y retransmitiéndolas a otra ubicación en la Tierra u otro satélite. Gracias a la capacidad de retransmisión de datos de los satélites de comunicaciones, se consigue una conectividad global.

Los datos que se transmiten estarán relacionados con algún tipo de las siguientes aplicaciones:

- Telefonía móvil, proporcionada por constelaciones de satélites como Iridium.
- Televisión por satélite, envío de audio y vídeo de televisión a los hogares.
- Internet, para proporcionar el servicio a áreas de difícil acceso. Seguro que ya habrás oído hablar de los satélites Starlink de SpaceX.

- De carácter militar, aportando comunicaciones seguras para organizaciones militares.
- Comunicaciones de emergencia y desastres, para proporcionar conectividad a zonas afectadas por desastres naturales y que hayan perdido su infraestructura terrestre.
- Servicios de rescate como COSPAS-SARSAT que, mediante la activación de una baliza de emergencia, se envía una señal de socorro a los satélites patrullando las 24 horas, los cuales la amplifican y la reenvían a tierra para procesarla y activar el protocolo de rescate. Estos equipos van embarcados en aviones y barcos.



Figura 5: Red de comunicaciones por satélite

Las misiones de comunicaciones también pueden proporcionar servicios a otros satélites, siendo estos los emisores de la señal que, en vez de ser transmitida directamente a una estación terrena, se transmite a un satélite de comunicaciones que será el que la envíe a tierra. Esto permite disponer de un enlace continuo de datos entre satélites de órbita baja y una red de estaciones terrestres repartidas en el planeta a través de una red de satélites de comunicación en órbita. Un ejemplo de esto es el sistema de seguimiento y retransmisión de datos por satélite (TDRS) de la NASA, que sirve de apoyo a misiones como la ISS o el Telescopio Espacial Hubble.

Misiones científicas

Las misiones científicas son aquellas que generan datos destinados principalmente a la investigación en diversas áreas de la ciencia como la astronomía, la física, la astrobiología, la climatología o la geofísica. Ayudan a expandir el conocimiento del universo dando respuesta a preguntas sobre el origen de la vida, la dinámica del clima espacial o la exploración de la posibilidad de vida en otros planetas.

Dentro de este tipo de misiones podemos encontrar misiones de exploración planetaria como las misiones Curiosity y Perseverance de la NASA para la exploración de la superficie de Marte a través de rovers, cuyo objetivo principal es analizar la geología y atmósfera del planeta y buscar signos de vida pasada. Sondas como las Voyager para estudiar los planetas exteriores del sistema solar que proporcionaron las primeras imágenes de Júpiter y Saturno y sus lunas, o la Cassini-Huygens para estudiar Saturno y, en particular, su luna Titán.

También podemos encontrar misiones de astrofísica, cuyo objetivo es el estudio del universo, su expansión, la formación de estrellas, la composición y estructura de las galaxias y agujeros negros o la existencia de exoplanetas así como la composición atmosférica de éstos. En estas misiones se utilizan telescopios cuyas imágenes cuentan con la ventaja de no verse afectadas por las distorsiones que produce la atmósfera terrestre (como ocurre con los telescopios terrestres). Otros detectores usados son los de rayos X (muy útiles en espacio ya que la atmósfera bloquea todos los rayos X e imposibilita el estudio de las fuentes de esta radiación desde La Tierra) o los detectores de rayos gamma, para la observación de objetivos más violentos como las supernovas.

La misión CHEOPS. CHEOPS es una misión de la ESA destinada a la observación de estrellas conocidas por albergar exoplanetas cuyo objetivo es la caracterización de los mismos. Mediante sus observaciones, se puede determinar el tamaño del exoplaneta y, sabiendo su masa, derivar información acerca de su densidad y el tipo de materiales de los que está compuesto. Desde el lanzamiento de la misión, sus operaciones se han llevado a cabo desde el centro de control de la misión ubicado en el CEIT. [Aquí](#) podrás encontrar más información acerca de la misión y los descubrimientos en los que ha participado.

Otras misiones como Solar Orbiter nos aportan datos derivados de la observación del Sol, del viento solar y su impacto sobre La Tierra, y otras se desarrollan como laboratorios en órbita para la realización de experimentos científicos en microgravedad como la ISS.

¿Sabes cuántos datos pueden llegar a generarse en una única misión espacial? Esto dependerá en gran medida de la complejidad de cada una pero, para hacernos una idea, estas son algunas referencias de misiones de la Agencia Espacial Europea (ESA):

- La misión Gaia, lanzada en 2013 y cuyo objetivo es crear un mapa de la Vía Láctea mediante la observación de millones de estrellas, se espera que supere 1 Petabyte (más de 1 millón de Gigabytes) de datos para el final de la misión.
- Para la misión EarthCARE, destinada a realizar mediciones de las nubes y aerosoles atmosféricos y entender su efecto en el clima terrestre, el volumen de datos generado por órbita (92 minutos) es enorme, alrededor de 1.5 Gigabytes que, después de ser procesados, pueden llegar a convertirse en 50 GB.

2.3. Telecomandos

A pesar de que los satélites están diseñados para tener cierto nivel de autonomía, es necesario comunicarnos con ellos desde tierra para transmitirles las tareas que deben de ejecutar durante su vida útil o para recuperarlos de fallos en órbita haciendo uso de telecomandos. En comparación con el volumen de telemetría que se descarga, la cantidad de telecomandos que es necesario enviar a un satélite es mínima.

Los telecomandos son instrucciones que deben ejecutarse en un momento determinado, ya puede ser en tiempo real para ejecutarse en el momento en que los recibe el satélite, o en un tiempo o punto de la órbita específicos indicado en cada telecomando. Éstos últimos deberán ser almacenados en memorias a bordo hasta que llegue su tiempo de ejecución.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de telecomandos típicos que se envían a los satélites:

- Planificación de las cargas de pago: las actividades a realizar por las cargas de pago deben de planificarse en tierra con suficiente antelación. Una vez planificadas, se convierten a telecomandos y se envían al satélite cubriendo actividades a realizar varios días a futuro.
- Maniobras orbitales: como ya se ha comentado anteriormente, las maniobras orbitales serán calculadas desde tierra y enviadas al satélite cuando sea necesario hacer algún tipo de cambio en la órbita. Los comandos que suelen incluir son el encendido de los propulsores o el cambio de actitud para posicionar los propulsores en la dirección correcta.

- Cambios de actitud: dependiendo de cada misión, será necesario modificar la actitud para apuntar a los objetivos, a las antenas de tierra o posicionar los paneles con respecto al Sol para maximizar la generación de energía en el satélite.
- Descarga de datos: cada vez que el satélite pueda establecer comunicación con la estación terrena, se deberá de enviar un telecomando para indicar al satélite que puede comenzar la descarga de los datos que ha estado almacenando. Del mismo modo, justo antes de que finalice la comunicación, se deberá ejecutar otro telecomando para parar la descarga de datos y evitar que se pierdan.
- Encendido y apagado de los transmisores: las unidades que transmiten la señal del satélite con los datos se suelen encender únicamente en el período en el que el satélite se puede comunicar con tierra y así evitar un consumo de energía innecesario a bordo. Para ello, será necesario ejecutar estos comandos para que se enciendan los transmisores justo antes de ver a la antena de tierra y se apaguen después de terminar la comunicación.

3. ¿Cuándo se pueden transmitir datos entre los segmentos de vuelo y tierra?

Ahora que ya conocemos los tipos de datos participan en las misiones espaciales, vamos a explicar en qué momentos es posible la transferencia de los mismos entre vuelo y tierra. Los satélites que orbitan La Tierra pueden no tener un enlace constante de comunicaciones a los sistemas terrenos, por lo que la transmisión sólo se podrá realizar en determinados períodos de tiempo denominados visibilidades o pases. Las visibilidades dependerán principalmente del tipo de órbita de la nave espacial y de la localización de las estaciones terrenas en la superficie terrestre.

En función de la altura a la que se encuentre orbitando un satélite, se definen los siguientes tipos de órbitas:

- LEO – Low Earth Orbit: órbitas bajas con una altura entre 250 km y 2000 km. En éstas, los satélites orbitan a gran velocidad (alrededor de 7 km/s), completando una órbita alrededor de La Tierra en 90 - 120 minutos y sumando entre 16 y 12 órbitas al día. Entre estas, encontramos las órbitas polares heliosíncronas, muy utilizadas gracias a su sincronización con el Sol, lo que les permite mantener constantes las condiciones de luz y temperatura, muy útil en misiones de observación para detectar cambios en los productos generados y por su cercanía al planeta.
- MEO – Medium Earth Orbit: órbitas situadas entre 2000 km y 35786 km, aunque las de uso común se sitúan en torno a los 20000 km de altitud con un período orbital de alrededor de 12 horas, es decir, 2 órbitas al día. Su uso más destacado es para misiones de navegación, combinando varios satélites formando una constelación para proporcionar una cobertura global sobre La Tierra.
- GEO – Geosynchronous Earth Orbit: los satélites se sitúan a 35786 km con una velocidad de rotación igual a la de La Tierra, es decir, 24 horas. Esto permite que los satélites se encuentren fijos sobre un punto específico de la superficie terrestre. Su principal uso es para misiones de comunicaciones.

Además de éstas, existen otras órbitas como las interplanetarias utilizadas por sondas que viajan más allá de la influencia gravitacional de la Tierra o las heliocéntricas, en las que las naves orbitan alrededor del Sol.

¿Conoces los puntos de Lagrange? Los puntos de Lagrange son posiciones en el espacio donde las fuerzas gravitacionales del Sol y la Tierra se equilibran de tal manera que un tercer objeto mucho menos masivo puede permanecer en una posición estable. Existen cinco puntos de Lagrange denominados L1, L2, L3, L4, y L5, que son de gran interés para la astronomía y la exploración espacial ya que permiten observaciones sin interrupciones. L1 es Ideal para observatorios solares, como el satélite SOHO que monitoriza continuamente el Sol sin la interferencia de la Tierra, mientras que L2 es perfecto para telescopios espaciales, como el James Webb, que necesitan una vista despejada del espacio profundo sin la interferencia de la luz solar.

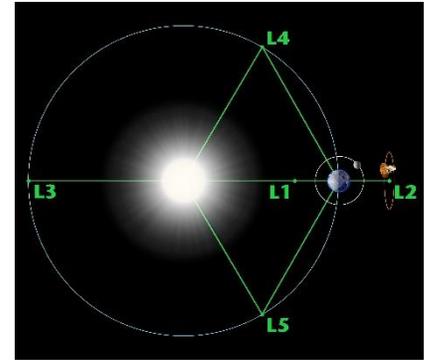


Figura 6: Puntos de Lagrange

Una vez comprendido el tipo de órbita que describe el satélite alrededor de La Tierra, se pueden deducir las características de los pases:

- Si el satélite se encuentra en una órbita LEO, el tiempo de visibilidad es limitado con respecto a una estación terrena y se reduce a alrededor de 10 minutos de duración entre 4-6 veces al día. Para tener más visibilidades y tiempo de comunicación, será necesario disponer de distintas estaciones terrenas repartidas por todo el planeta o, como hemos mencionado anteriormente en las misiones de comunicaciones, transmitiendo la señal a un satélite de órbita más alta que ofrece una cobertura terrestre mayor. Algunas de las misiones Sentinel utilizan este método para maximizar la descarga de datos mediante su envío a través de un enlace óptico a un satélite GEO de la red European Data Relay Satellite (EDRS).
- En una órbita GEO, bastaría con tener una estación terrena en una región siempre visible por el satélite para tener una comunicación constante y continua. Por esto, las órbitas GEO se utilizan en satélites de comunicaciones, los que deben de proveer de servicios continuos a áreas específicas del planeta.
- En el caso de órbitas más allá de la altitud GEO sería necesario disponer de, al menos, 3 estaciones terrenas ubicadas a una longitud terrestre de aproximadamente 120° entre ellas para tener una visibilidad constante con La Tierra. Aunque en estas órbitas, pueden darse ocultaciones de cuerpos celestes que interrumpen el enlace de comunicación.

¿Cómo se establece el enlace de comunicaciones entre los rovers situados en Marte y La Tierra? En principio, sería posible establecer un enlace directo entre el rover y las estaciones terrenas de espacio profundo, sin embargo, se trata de algo difícil de cumplir por varias razones. La primera es la incapacidad de comunicación regular desde La Tierra con los diferentes puntos de la superficie marciana y, la segunda, las restricciones de masa y potencia sobre los rovers y los requisitos de antenas de las que deberían disponer. Por esto, se hace uso de otro método que utiliza satélites intermediarios orbitando Marte para retransmitir las señales entre el rover y las estaciones terrenas. Estos satélites, además, llevan a cabo otros objetivos relacionados con la exploración de Marte. Algunos ejemplos de estos son el Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) o el satélite Mars Odyssey.

4. Camino de los datos

Ahora que ya entendemos qué es un pase y cómo se desarrolla en función de la órbita del satélite y las estaciones terrenas, vamos a describir en detalle el flujo de los datos de telemetría, desde que se generan en el satélite hasta que son analizados y recibidos por el usuario final.

El correcto análisis de los datos en misiones espaciales requerirá de una gran cantidad de recursos para solventar las dificultades encontradas en el camino de los datos. Entre ellas se encuentran las grandes distancias que tienen que recorrer los datos, los anchos de banda limitados o el ruido incorporado a la señal que puede llegar a hacer difícil la tarea de extraer la información.

4.1. Generación y almacenamiento de telemetría

El primer paso en la cadena será la generación de los datos. La telemetría de salud del satélite se genera de manera continua para disponer de información de lo que ocurre en el satélite en todo momento y, la generación de telemetría específica, se intentará maximizar mediante la operación continua de las cargas de pago de la misión. Los datos generados deberán ser convertidos de formato analógico a digital. En el caso de tener un pase disponible con las estaciones terrenas, éstos podrán ser enviados directamente a tierra en tiempo real, sin embargo, si hay períodos en los que no hay pases planificados, la telemetría deberá ser almacenada en memorias a bordo del satélite y descargada tan pronto como sea posible en los siguientes pases, esta se denomina telemetría grabada o de playback.

Durante la fase de diseño de la misión, previa a su lanzamiento, es indispensable realizar un análisis del volumen de datos que se van a generar durante la misión, la capacidad de almacenamiento de los mismos, que se podrá aumentar aplicando técnicas de compresión de datos, y la capacidad de descarga de los mismos. La capacidad de descarga dependerá de muchos factores como, por ejemplo, el número de estaciones terrenas disponibles, las memorias integradas en el satélite o incluso la frecuencia a la que se va a transmitir la señal.

Una vez en vuelo, la generación y el almacenamiento de telemetría a bordo puede configurarse dependiendo de las operaciones que se ejecuten. Normalmente, por defecto, todos los parámetros tienen definida una frecuencia de muestreo, es decir, cada cuánto tiempo se generará un dato. En ocasiones, interesa aumentar el muestreo para tener más datos durante ciertas operaciones mientras que, en actividades rutinarias, puede interesar disminuirlo para no generar más información de la necesaria o incluso desactivar la generación de esos datos. Del mismo modo, también se puede modificar el modo de almacenamiento de las memorias para que, si se alcanza su máximo, se sobrescriban los datos más antiguos o, por el contrario, los datos más recientes no se almacenen y se pierdan.

¿Sabías que la radiación espacial puede afectar a las memorias del satélite y a sus datos? La superficie terrestre se encuentra protegida de la radiación espacial proveniente del Sol y rayos cósmicos gracias a la atmósfera que la rodea. Los satélites, sin embargo, no tienen esta protección y se ven afectados por ella. Esta puede alterar las memorias y provocar errores en los datos almacenados o, incluso si la radiación es muy agresiva, inhabilitar la propia memoria. Para prevenir la pérdida de memorias y la corrupción en los datos, las memorias se protegen físicamente con materiales metálicos y se utilizan algoritmos de detección y corrección de errores que añaden una secuencia de datos adicionales denominados checksums para verificar la integridad de los datos.

Los satélites tienen autonomía para monitorizar en tiempo real su propia telemetría que está generando. Para ello, tienen definido en su software monitorizaciones que están constantemente chequeando ciertos parámetros para que, en caso de sufrir alguna anomalía, el satélite pueda detectarla y actuar de manera segura, evitando un problema mayor. En estos casos, se generarán datos adicionales del fallo y de las acciones tomadas por el satélite, que se almacenarán para ser enviadas a tierra a posteriori, con el objetivo de que los operadores e ingenieros analicen el fallo y ejecuten las operaciones pertinentes para recuperarse de la anomalía y continuar con la misión.

4.2. Procesado de datos a bordo

Los datos almacenados a bordo requieren de cierto nivel de procesado antes de ser transmitidos a tierra. Algunas misiones tendrán la capacidad de encriptación de la telemetría para asegurar la comunicación y proteger la información. En otras, el volumen de datos brutos generado excede la cantidad de datos que puede ser transmitida a tierra, por ello, se hace uso de técnicas de procesado de señal y compresión para reducirlos.

Los datos de telemetría serán estructurados en paquetes con cabeceras y campos con información adicional, como identificadores de paquete o el tiempo del satélite al que se referencian esos datos, que ayudarán a extraer la información de una manera ordenada una vez es recibida en las estaciones terrenas.

4.3. Transmisión vuelo-tierra

En el momento en el que hay un pase y se enciende el transmisor a bordo del satélite, los paquetes de telemetría son encapsulados en tramas con cabeceras y campos adicionales indicando, por ejemplo, la identificación del satélite o códigos de control de errores en las tramas. Todo esto se realiza para adaptar los datos a estándares definidos que aseguran una transmisión de los datos exitosa en el espacio.

¿Conoces los estándares CCSDS? CCSDS (Comité Consultivo para Sistemas de Datos Espaciales) es una organización internacional formada por las principales agencias espaciales que se encarga de desarrollar normas y recomendaciones para los sistemas de datos espaciales. Su objetivo principal es elaborar estándares cuya aplicación garantice un intercambio de datos fiable y eficiente entre los sistemas espaciales y los segmentos terrestres. En resumen, sus estándares definen métodos, técnicas y protocolos de generación, transmisión y gestión de los datos en todo este camino entre vuelo y tierra que estamos describiendo.

Cuando los datos se han estructurado en tramas, éstos tienen que ser adaptados al medio para poder ser transmitidos a través del espacio y la atmósfera terrestre. Aquí es cuando entra en juego el subsistema de comunicaciones del satélite, modulando los datos en una señal de radiofrecuencia capaz de viajar por el medio. Esta señal debe ser amplificada para ser emitida con un nivel de potencia suficiente para que, a pesar de las pérdidas y atenuación que sufra por el camino, pueda ser detectada y decodificada por las estaciones terrenas.

La frecuencia de la señal emitida deberá ser asignada antes de lanzamiento y autorizada por la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones), encargada de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras. La frecuencia dependerá de cada misión: para la telemetría de housekeeping, que suele suponer menor volumen de datos, se suele utilizar las frecuencias en banda S (alrededor de 2 GHz) mientras que, para la descarga de datos específicos de la misión, se suelen utilizar frecuencias

más altas como la banda X (8 GHz) que permiten utilizar anchos de banda mayor y, por lo tanto, enviar más datos por unidad de tiempo.

¿Qué factores hacen que la señal se atenúe en su camino? Los principales factores que atenúan la señal del satélite son la distancia y la lluvia. La potencia recibida disminuye con el cuadrado de la distancia entre el satélite y la estación mientras que la lluvia y la nieve absorben parte de la señal, lo que produce pérdidas importantes a partir de las frecuencias de banda X (10 GHz).

Llegados a este punto, la señal es recibida por las estaciones terrenas, donde se amplificará su nivel de potencia y se demodulará, preparándola para el procesamiento de los datos en tierra. En el caso de las misiones de navegación y comunicaciones, además de estaciones terrenas que reciban la telemetría de housekeeping del satélite, entran en juego las antenas y receptores de nuestros teléfonos móviles y hogares para recibir los datos específicos de la misión (telemetría de posición o televisión).

Durante el pase, la telemetría grabada o de playback se almacenará en los equipos de las estaciones terrenas mientras que la telemetría de tiempo real se enviará directamente a los centros de control para que los operadores puedan chequearla y monitorizar el estado del satélite en tiempo real. Después de finalizar el pase, la telemetría grabada será enviada al resto de sistemas y centros de control para su procesamiento, teniendo en cuenta que podrá existir una latencia en la recepción de la telemetría debido a que las estaciones terrenas pueden estar ubicadas a grandes distancias de los centros de control.

4.4. Procesado de datos en tierra

El primer procesamiento de la señal se realiza en la estación terrena para corregir errores, eliminar ruido y obtener las tramas de datos. Una vez completado esto, se deberá de aplicar las mismas técnicas de procesamiento por las que haya pasado la señal a bordo del satélite en sentido inverso, pasando por la extracción de las tramas y paquetes, la descompresión y descifrado de los datos para llegar a los datos en crudo o binarios de la señal. Para ello, existirán equipos y software en tierra y en el centro de control encargados de realizar estas tareas.

La telemetría que llega a los centros de control deberá ser procesada y convertida en un formato entendible por los operadores, ingenieros y científicos para poder ser analizada a posteriori. El procesamiento de la telemetría de housekeeping es más simple y directo mientras que el procesamiento de la telemetría específica de la misión podrá convertirse en un proceso más complejo con distintos niveles de procesamiento, en los que se aplicarán técnicas de calibración y corrección de efectos que dotará a los datos de mayor utilidad.

¿Sabes qué son los metadatos? Los metadatos son los datos de los datos, es decir, son información adicional que describen y aportan más características de la telemetría generada como el tiempo en el que se generó, la configuración del instrumento mientras se realizaba la medida, calibraciones aplicadas o la posición precisa en la que estaba el satélite en el momento en el que se generó el dato. Los metadatos permiten alcanzar un mayor nivel de comprensión de la telemetría incluso a posteriori y se utilizarán para alcanzar los distintos niveles de procesamiento de los que hablábamos previamente.

4.5. Archivo y análisis de datos

Cuando la telemetría ha sido procesada, deberá ser almacenada con el objetivo de disponer de un histórico de la misma al que se pueda acceder fácilmente para su consulta, a esto es a lo que se denomina archivo de los datos. Éstos podrán almacenarse en su más alto nivel de procesado o, por el contrario, almacenarse a niveles más bajos junto con sus metadatos, para poder procesarse en cualquier momento en el que se quiera hacer una consulta a posteriori.

Los archivos de datos se almacenan en múltiples centros de datos para asegurar su redundancia y protección contra pérdidas. Estos centros suelen estar ubicados en diferentes geografías para evitar el riesgo de desastres naturales o fallos de infraestructura que podrían afectar a todos a la vez. Además, también se crearán copias de seguridad para garantizar la recuperación de los datos en caso de fallo y, para asegurar su accesibilidad continua, deberán de implementarse migraciones de los datos a tecnologías más recientes que reemplacen a las actuales que se pueden quedarse obsoletas.

Para distribuir los datos a los usuarios desde el archivo, se crearán interfaces de usuario y repositorios accesibles en línea que permitan a los usuarios acceder, realizar búsquedas y descargar los datos para utilizarlos en sus investigaciones.

¿Has escuchado hablar de las misiones Sentinel? Las misiones Sentinel son una serie de misiones desarrolladas por la ESA dentro del marco del programa Copernicus de la Comisión Europea que ofrecen capacidades radar, ópticas y espectrales. Proporcionan datos para la agricultura, la gestión del agua, el monitoreo del medio ambiente, y la seguridad. En este [enlace](#), podrás acceder a la interfaz de usuario que da acceso a las imágenes de las misiones Sentinel. ¡Conviértete en usuario de la misión e investiga un poquito más acerca de sus datos!

El análisis de datos consiste en la extracción de información útil y conocimiento a partir de la telemetría mediante el uso de distintas técnicas y herramientas que permitan revelar más información sobre ella.

En el caso de la telemetría de housekeeping, los operadores realizan un primer análisis de los parámetros más importantes y generales del satélite en tiempo real durante los pases, chequeando que se encuentren en el estado esperado. Los centros de control disponen de herramientas que permiten realizar un análisis básico de la telemetría, como herramientas de visualización o de detección de parámetros que han superado los límites de operación definidos. En estos casos, se alertará a los operadores, que deberán analizar cada caso y actuar si es necesario. Además, también existen otras herramientas externas (o incluso se pueden crear a través de distintos lenguajes de programación) que permitan realizar un análisis más específico de los datos, como análisis de tendencias y evolución de ciertas telemetrías para detectar degradación en los equipos o estadísticas para evaluar las prestaciones durante la misión.

El análisis de la telemetría específica de cada misión es más complejo, especialmente para misiones científicas o de observación de La Tierra, implicando técnicas más avanzadas de análisis de datos con algoritmos de gran complejidad. Estas son algunas técnicas utilizadas y sus posibles aplicaciones:

- Análisis de imagen con el objetivo de adquirir imágenes 3D de mapas topográficos o detectar contornos para detectar tipos de estructuras y objetos específicos.

- Análisis de espectro para estudiar la energía que absorbe, emite y refleja un objeto a diferentes frecuencias, con el fin de identificar la composición de los elementos observados como atmósferas planetarias.
- Análisis de predicción de valores futuros en datos de series temporales históricas para predecir la actividad solar.
- Análisis estadísticos para correlacionar distintos tipos de datos que pueden explicar relaciones entre fenómenos observados, como la intensidad del campo magnético y la actividad volcánica de un planeta.
- Análisis con inteligencia artificial para clasificar grandes volúmenes de datos como la identificación de galaxias en imágenes de telescopios espaciales.
- Visualización de datos para facilitar su comprensión, como la distribución de temperatura en una atmósfera planetaria.
- Análisis de curvas de luz para detectar y caracterizar exoplanetas orbitando estrellas, que provocarán cambios en la luz percibida cuando éstos eclipsen sus estrellas.

En el siguiente [enlace](#) encontrarás una importante fuente de datos de exoplanetas ya analizados. ¡Te reto a que accedas a ella y descubras cómo se ven las curvas de luz de algunas de las observaciones realizadas!

5. Aplicación de la ciencia de datos y la inteligencia artificial en las misiones espaciales

La ciencia de datos se centra en la recolección, depuración y análisis de datos para obtener información útil de grandes volúmenes de ellos como patrones y tendencias a través de distintas técnicas como la estadística o la inteligencia artificial (IA). Por otro lado, la IA es la habilidad de las máquinas de imitar la inteligencia humana, lo cual se consigue a través del aprendizaje automático o machine learning. El aprendizaje automático se enfoca en el desarrollo de algoritmos inteligentes que pueden aprender a realizar tareas y tomar decisiones de manera autónoma a partir de grandes cantidades de datos y que mejoran a medida que se alimentan con diversidad de datos. Ambos campos están estrechamente relacionados y se complementan, la ciencia de datos proporciona una base mediante el análisis de los datos para que la IA pueda utilizarlos para aprender, tomar decisiones y reaccionar ante distintos escenarios.

Ambas disciplinas se han comenzado a aplicar en tecnologías espaciales para analizar y clasificar las grandes cantidades de datos que los satélites generan, procesar datos directamente a bordo de ellos o para dotar de una mayor autonomía a los sistemas, lo cual es realmente útil en misiones con alta latencia en las comunicaciones como pueden ser las misiones de espacio profundo. La integración de estas técnicas en las misiones puede llegar a optimizarlas, reduciendo la complejidad del sistema y los costes del mismo, dotando de independencia de las comunicaciones con tierra o permitiendo la toma de decisiones críticas en tiempo real.

¿Cuál fue la primera misión en incorporar IA? Deep Space One (DS-1) fue la primera misión espacial con IA desarrollada por NASA y lanzada al espacio en el año 1998. Entre sus tecnologías de IA cabe destacar el *Agente Remoto*, capaz de controlar la nave sin supervisión humana, planificar actividades y diagnosticar y recuperarse de anomalías. También disponía de *AutoNav*, un sistema de navegación óptico capaz de procesar imágenes de asteroides tomadas a bordo del satélite para determinar la posición, velocidad y trayectoria del satélite. Adicionalmente, DS-1 contaba con IA para solicitar a tierra “ayuda” en caso de anomalías de las que no hubiese podido recuperarse mediante el envío de una baliza especial. Esta baliza contendría un resumen con información acerca del estado del satélite, qué intentos de recuperación se habrían realizado y las últimas tareas ejecutadas.

A continuación, vamos a ver algunas de las múltiples aplicaciones de la ciencia de datos y la IA en las misiones espaciales.

Navegación autónoma

La navegación autónoma es una de las principales aplicaciones de la IA para ayudar a los satélites a navegar de manera independiente en entornos desconocidos. La ESA ha desarrollado la misión HERA que será lanzada en octubre de 2024, la cual utilizará IA para hacer una navegación autónoma hacia el asteroide Dimorphos, perteneciente al sistema de asteroides Didymos. Este sistema de navegación se basará en un seguimiento de las características del asteroide, a través de la toma de distintas imágenes junto con datos tomados de sensores a bordo del satélite. Con ello, el sistema tendrá una comprensión de cómo el satélite se desplaza con respecto a la superficie del asteroide y cómo debe ser su trayectoria de acercamiento a él. De este modo, el sistema podrá tomar sus propias decisiones en tiempo real, lo que hasta ahora es realizado por los equipos en tierra y telecomandado a los satélites en misiones de este tipo. En este [vídeo](#) podrás ver en qué consiste la misión HERA.

Dentro del campo de la navegación, también se han iniciado estudios en los que se hace uso de aprendizaje automático aplicado a robótica. Por ahora, se han desarrollado y probado robots en la ISS capaces de compartir información entre ellos, de manera que, si uno adquiere cierto aprendizaje (de una maniobra realizada, por ejemplo), el resto de robots también se beneficiarán de ello. Este concepto podrá servir de aplicación en el control de satélites en formación que orbitan cercanos y coordinados en el espacio.

Soporte a astronautas

La ciencia de datos podrá ser útil para la monitorización de la salud de astronautas, quienes llevan incorporados sensores que muestrean sus funciones vitales. Mediante la aplicación de modelos predictivos sobre la biometría de los astronautas, podrían llegar a predecirse cambios en las condiciones físicas de los astronautas y detectar alertas médicas, permitiendo aplicar medidas preventivas e, incluso, extender su estancia en el espacio.

La agencia espacial alemana (DLR) ha desarrollado los sistemas CIMON, basados en inteligencia artificial y diseñados para dar soporte a los astronautas en sus tareas a bordo de la ISS. Estos sistemas son capaces de ver, hablar, escuchar y entender a los astronautas y han servido como la primera colaboración entre astronautas, asistentes robóticos e IA. En este [vídeo](#) podrás ver cómo un astronauta de la ISS interactúa con CIMON.

Monitorización de TM de salud y detección de anomalías

Los sistemas actuales de detección y recuperación de fallos (FDIR) están basados en límites pre-programados antes del lanzamiento de las misiones en función a las prestaciones del sistema esperadas una vez en órbita, lo que puede implicar que no se detecten anomalías que no se han previsto con anterioridad a bordo. Ante esto, la ciencia de datos y la IA tienen el potencial de mejorar los sistemas FDIR a través de la continua monitorización en tiempo real de la telemetría y aplicando análisis estadísticos y predictivos, lo que puede permitir detectar problemas a bordo con anterioridad y evitar que se conviertan en problemas mayores o fallos catastróficos.

El progreso en técnicas de minería de datos ha permitido desarrollar aplicaciones de detección de anomalías y fallos entrenadas a partir de los archivos de telemetría de housekeeping de distintas misiones. Con ello, estas aplicaciones obtienen un conocimiento del sistema y son capaces de construir un modelo propio del mismo de manera dinámica, sin estar éste basado en la experiencia humana y en lo que se espera del mismo en órbita (como los modelos FDIR actuales). Además, estas aplicaciones también pueden caracterizar y monitorizar interacciones entre distintos parámetros y variables, información que puede ser muy valiosa para los ingenieros y controladores de la misión. Vamos a ver algunas de las aproximaciones estudiadas para la detección de anomalías a bordo de los satélites basadas en las disciplinas en cuestión:

- Con nuevos algoritmos de IA, se pueden deducir los rangos límite de los sensores y las distintas telemetrías a partir de datos históricos recopilados en vuelo, lo que los hace más representativos de lo que está realmente ocurriendo en órbita en distintas condiciones y simplifica en gran medida las técnicas actuales, que requieren dar una definición de los límites superior e inferior de cada parámetro de TM entre los que se prevé que se encuentre durante su funcionamiento nominal.
- Otros algoritmos son capaces de reducir la complejidad y dimensiones de los datos de TM, extraer distintas características y propiedades de los mismos y clasificarlos para detectar errores e identificar el tipo de anomalías en ellos. Para ello, requieren de una fase inicial de entrenamiento, en la que los algoritmos son alimentados con los datos del archivo de TM o de simulaciones para lograr un aprendizaje del sistema y su comportamiento.

Los métodos de entrenamiento de los algoritmos de IA pueden llegar a consumir extensos períodos de tiempo, especialmente para escenarios con altos y complejos volúmenes de datos como son las misiones espaciales. Por ello, el reto en su aplicación se encuentra en encontrar qué algoritmos de IA son más eficientes para cada tarea de todo este proceso.

NASA ya ha aplicado este tipo de algoritmos en misiones espaciales: el sistema genérico SHARP se desarrolló con el objetivo de automatizar el análisis de salud y el estado en distintas misiones. A partir del análisis en tiempo real de la telemetría de los satélites, SHARP fue capaz de detectar y analizar potenciales problemas en ellos. El sistema IMS (Inductive Monitoring System) también ha formado parte de la ISS. IMS es capaz de aprender del comportamiento nominal del sistema a partir de datos históricos y generar un modelo de operación nominal del mismo que almacena como referencia. Una vez en operación, monitoriza en tiempo real las desviaciones de los datos con respecto al modelo de referencia y, si los datos se alejan de los nominales, genera información acerca de las desviaciones detectadas.

Observación de La Tierra

La observación terrestre es un área en el que la IA ha empezado a utilizarse de manera más amplia, ya que presenta un gran potencial para extraer información y comprender características de nuestro planeta. Los sistemas de IA pueden ayudar a científicos e investigadores a identificar patrones clave y hacer nuevos descubrimientos del comportamiento de nuestro planeta, permitiendo realizar una mayor explotación de los datos obtenidos.

Dentro del conjunto de datos terrestres recopilados, existen conexiones entre variables debidas a la física y química detrás de los fenómenos que se dan en nuestro planeta. Los humanos, sin embargo, no somos capaces de identificarlas fácilmente, en especial en sistemas no lineales que varían en el espacio y en el tiempo como en este caso. La IA permite descubrir estas conexiones de manera automática.

Vamos a ver algunas de las múltiples y potenciales aplicaciones de la IA en el campo de la observación terrestre:

- Identificación de plásticos en las superficies marinas: gracias al uso de imágenes satelitales de alta resolución, se ha podido demostrar cómo, mediante el uso de técnicas de identificación de bordes en las imágenes, se pueden identificar boyas marinas o sospechas de plásticos flotando en los océanos.
- Creación de un gemelo digital de La Tierra: la creación de un modelo digital de La Tierra capaz de imitar su comportamiento es una propuesta para afrontar los grandes retos que se están dando actualmente como son los recursos de agua y comida, la contaminación o el aumento del nivel del mar. Gracias a la combinación de datos de satélites de observación terrestres e IA, un gemelo digital de La Tierra podría ayudar a predecir la actividad natural y humana, así como a monitorizar la salud del planeta o simular la relación entre la actividad humana y sus efectos sobre el mismo.
- Detección de gases invernadero: combinando datos de satélites de observación y meteorológicos con IA, se ha demostrado la detección y cuantificación de fugas de metano en casi tiempo real con gran resolución en el espacio y tiempo.
- Nuevas capacidades en satélites de observación: a partir de la monitorización y detección de ciertos fenómenos terrestres con cámaras de baja resolución, se podría hacer uso de IA para tomar la decisión de apuntar cámaras de mayor resolución a las áreas de interés previamente identificadas, pudiendo estar embarcadas en el mismo satélite con capacidad dual o en otro satélite independiente con instrumentos de mayor resolución.
- Cambio climático: con la combinación de datos del mismo objetivo tomadas desde distintas fuentes a través de IA, se podrían derivar conclusiones acerca de factores que intervienen en el cambio climático del planeta. Un ejemplo de esto es el estudio de las consecuencias de los aerosoles en la atmósfera, partículas que afectan a la dispersión y absorción de la radiación solar y tienen un impacto en el cambio climático. Gracias a la IA se pueden combinar medidas de aerosoles tomadas por distintos satélites en distintos espectros (visible, térmico) para obtener más información de estos como composición o absorción y sus efectos en la atmósfera terrestre.

La misión ϕ -sat-1. ϕ -sat-1 fue la primera misión de observación de La Tierra de la ESA en incorporar IA. Las cámaras a bordo de la misión tomaban grandes cantidades de imágenes terrestres, de las que muchas no podrían haberse procesado debido a la presencia de nubes en ellas. Para evitar el envío de estas imágenes a las estaciones terrenas y hacer las comunicaciones de la misión más eficientes, ϕ -sat-1 utilizó algoritmos de IA capaces de filtrar las imágenes con nubes, descartarlas y seleccionar las consideradas útiles para ser enviadas a tierra.



Figura 7: Uso de IA en la misión ϕ -sat-1.

Predicción del clima espacial

A partir de las muestras de datos de sensores de viento solar o satélites de observación de La Tierra, se pueden aplicar técnicas de aprendizaje automático para buscar patrones en los datos relacionados con variaciones en la ionosfera debidos al clima espacial. Con estos resultados se podría realizar un mejor pronóstico del clima espacial como eyecciones de masa coronal que pueden tener un impacto negativo en los satélites y los astronautas. Esto permitiría tomar medidas preventivas ante la predicción de tormentas solares, como reorientar los satélites para minimizar la exposición a la radiación o preparar a los astronautas para ello.

También se puede hacer uso de técnicas de visión artificial para detectar regiones de agujeros coronales en el Sol. Los agujeros coronales son regiones donde el campo magnético del Sol se extiende hacia el espacio como un campo abierto, lo que hace que el viento solar escape mucho más rápido. Este viento solar puede tener un impacto negativo en el clima espacial y, por lo tanto, afectar a las misiones espaciales. Gracias a técnicas de visión artificial y datos solares recopilados, se pueden detectar estos agujeros y estimar su tamaño. Además, la IA también permite analizar tendencias en ellos y predecir sus regiones de cobertura en años futuros.

Exploración científica

La IA es crucial para dotar de autonomía a rovers que ejecutan tareas complejas en Marte. Es importante que éstos puedan operar con mínima intervención humana, utilizando algoritmos sofisticados y técnicas de aprendizaje automático que les permitan tomar decisiones en tiempo real basadas en conjuntos de datos recopilados durante su misión en el planeta. El uso de IA aporta a los rovers en Marte los siguientes beneficios:

- Navegación autónoma: gracias a estos sistemas los rovers son capaces de evitar obstáculos, seleccionar caminos seguros que reduzcan el riesgo de fallo de la misión o acceder a regiones del planeta más difíciles.
- Toma de decisiones en tiempo real: las comunicaciones con tierra pueden tener, como hemos visto, grandes retrasos, por lo que capacitando a los rovers a tomar decisiones de manera autónoma in situ puede hacer mucho más eficiente la misión sin la necesidad de establecer la comunicación con tierra.
- Recopilación eficiente de datos: los algoritmos de aprendizaje automático permiten a los rovers identificar objetivos científicos valiosos y de alta prioridad localizados en la superficie, asegurando la recolección de datos de alta resolución y con gran valor científico durante la misión.

Gracias al uso de la ciencia de datos y la IA, se consiguen realizar exploraciones más exhaustivas de Marte, permitiendo investigar distintas características geológicas del planeta y aumentar el conocimiento que tenemos del planeta.

Hoy en día, NASA está investigando el uso de un algoritmo de aprendizaje automático para realizar un análisis rápido de las muestras tomadas por el futuro rover Rosalind Franklin, y ayudar a los científicos a decidir las estrategias más eficientes durante la misión. Una vez el rover tome y analice las muestras, los datos serán enviados a tierra donde, a través del algoritmo, se podrá identificar qué datos son más interesantes o importantes para continuar examinándolos. Así, los científicos podrán decidir la siguiente acción a realizar: continuar analizando la misma muestra, tomar otra o abandonar esa zona y dirigirse hacia otras áreas de interés. En la actualidad, este algoritmo está siendo alimentado con ejemplos de muestras que pueden encontrarse en Marte para que, una vez tomadas las muestras reales, las utilice y genere predicciones en la composición química de las mismas.

En este [artículo](#) podrás leer más sobre cómo NASA utiliza IA en el rover Perseverance para posicionar sus instrumentos hacia rocas de interés y decidir, de manera autónoma y en tiempo real, si es necesario continuar examinándola en más detalle basándose en la composición de minerales de la misma.

También se están desarrollando técnicas de IA con el objetivo de disminuir los datos que se envían a tierra desde misiones en las que las comunicaciones son más complicadas y se vuelven un reto. Gracias a distintos algoritmos, se podrán procesar los datos a bordo de rovers o satélites para que después éstos sólo envíen los datos más valiosos y necesarios a tierra, reduciendo el flujo de comunicaciones y haciéndolas más eficientes.

La aplicación de distintos métodos de ciencia de datos sobre las medidas tomadas por telescopios ha supuesto un crecimiento exponencial en el descubrimiento de exoplanetas. A través de observaciones del telescopio espacial Kepler y algoritmos de aprendizaje profundo capaces de identificar falsos positivos, NASA ha llegado a descubrir exoplanetas que previamente no habían sido detectados con los mismos datos de entrada. Con estos algoritmos, se pueden llegar a detectar algunas de las señales más tenues provenientes de fuentes muy lejanas en el espacio.

Adicionalmente, técnicas de modelos estadísticos también pueden ser útiles para analizar distribuciones de galaxias y clasificarlas, atacando problemas astrofísicos complejos y dando respuestas a temas como el origen, evolución y expansión del universo.

La misión OPS-SAT. OPS-SAT consistió en un nanosatélite de demostración tecnológica lanzado en 2019 por la ESA. Éste alojó un amplio número de experimentos para probar tecnologías innovadoras dentro de distintas disciplinas, entre las que se encontraba la IA. OPS-SAT incorporó algoritmos de aprendizaje profundo para detectar bosques en la superficie terrestre, mejorar la calidad de las imágenes tomadas por el satélite, detectar y realizar un seguimiento autónomo de distintas características en la superficie terrestre o controlar de manera más eficiente la orientación del satélite.

A pesar de los beneficios y el fuerte potencial que ha demostrado la aplicación y los estudios de la ciencia de datos y la IA en las misiones espaciales hasta ahora, todavía quedan muchos retos y problemas que abordar, como los altos recursos computacionales que requieren estas disciplinas en sistemas limitados como son los satélites. Sin duda, la ciencia de datos y la IA cambiará la manera en la que se desarrollen las misiones espaciales.

6. Basura Espacial

6.1. ¿Qué es la basura espacial y qué implicaciones tiene en las misiones actuales?

Basura espacial se considera a todo objeto artificial en el espacio que no tiene una función útil, incluyéndose satélites fuera de servicio, fragmentos de lanzadores o restos de explosiones y colisiones entre ellos. Estos fragmentos pueden variar en tamaño, desde milímetros hasta metros, y pueden mantenerse en órbita durante años y décadas dependiendo de la altitud a la que se encuentren. Cada colisión en el espacio puede generar más fragmentos, exacerbando el problema y pudiendo llegar a ocasionar que ciertas regiones del espacio queden inutilizables, lo que se conoce como el síndrome de Kessler.

¿Has oído hablar de algún evento de colisión entre objetos espaciales? En 2007, China llevó a cabo la destrucción intencional del satélite Fengyun 1C con un misil anti-satélite, lo que llevó a catalogar más de 2700 fragmentos derivados del impacto. Dos años después, en 2009, se produjo una colisión accidental entre los satélites Iridium 33 y Cosmos 2251, estando el primero operacional, y suponiendo la generación de más de 2000 fragmentos de basura espacial.

- ➔ En esta [página](#), la ESA ofrece algunos números interesantes acerca de la basura espacial. Y en [ésta](#) podrás visualizar los objetos que se encuentran orbitando La Tierra.

Como podréis imaginar, esto supone una amenaza para las misiones actuales y futuras y tiene un gran impacto sobre ellas. La basura espacial puede provocar daños catastróficos, ya que un impacto a la gran velocidad a la que se mueven esos fragmentos puede destruir una misión o hacer que pierda ciertas de sus funciones. Las misiones tripuladas son especialmente vulnerables, ya que los impactos podrían llegar a poner en peligro la vida de los astronautas.

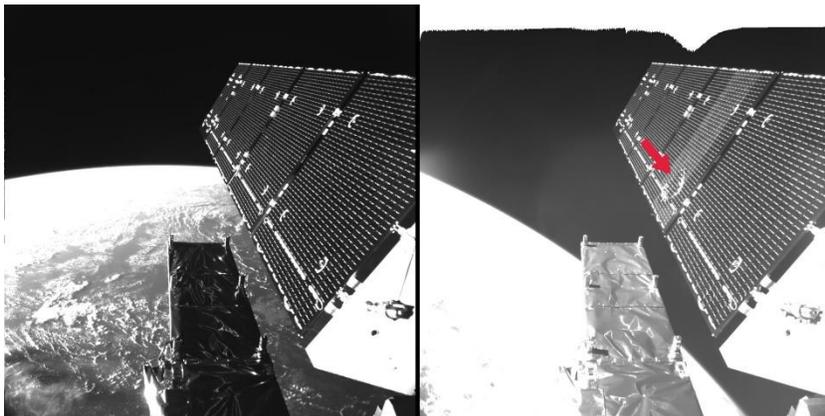


Figura 8: Efecto del impacto de un fragmento de basura espacial en el satélite Sentinel-1A

La basura espacial también tiene un impacto sobre las operaciones de las misiones, las cuáles deben de maniobrar para evitar colisiones con ella. Esto no sólo implica un consumo adicional de fuel, sino también una interrupción en las tareas planificadas y en la prestación de servicios. Además, también supone un aumento de los costes, ya que implica la ejecución de tareas adicionales y la necesidad de personal disponible 24 horas del día para actuar en caso de ser necesario.

Para un satélite típico en órbita LEO, se pueden dar cientos de alertas de colisión semanalmente que hay que analizar, la mayoría pasan a ser de bajo riesgo, aunque varias de ellas se mantienen en estado de alerta y requieren un seguimiento detallado. Las misiones tienen que, de media, ejecutar una maniobra de evasión de colisión al año.

Debido al crecimiento exponencial de basura espacial en las últimas décadas y su gran impacto para las misiones actuales y futuras, se ha impulsado la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de detección y recuperación de basura espacial, así como nuevas estrategias de reentrada de satélites para minimizar su continuidad en el espacio después de finalizar su vida útil. Además, se han elaborado estándares de mitigación de basura espacial para tratar de disminuir y frenar la generación de la misma. Con el objetivo de mitigar los riesgos que implica la basura espacial y permitir gestionar de manera más efectiva el tráfico espacial, también se ha comenzado a investigar la aplicación de la ciencia de datos y la IA que, mediante el procesado de grandes volúmenes de datos, aprendizaje de patrones y toma de decisiones en tiempo real, parecen ofrecer soluciones prometedoras para mejorar la gestión de este problema.

6.2. El papel de la ciencia de datos y la inteligencia artificial en la gestión de la basura espacial

La gestión del tráfico y basura espacial es una tarea indispensable para garantizar la seguridad de las misiones espaciales. Ésta consiste en una serie de pasos que incluyen: la detección, identificación y catálogo de los objetos que se encuentran orbitando La Tierra, la determinación de sus trayectorias, la evaluación de los riesgos de colisión entre ellos y la ejecución de maniobras por parte de las misiones capacitadas para ello para evitar las posibles colisiones.

El primer paso en la gestión del tráfico espacial en el que interviene la ciencia de datos es la recolección de información de los fragmentos de basura espacial y satélites operativos. Para ello, existen redes de vigilancia y seguimiento espacial que usan tecnologías radar y telescopios terrestres para detectar y realizar un seguimiento de los mismos. También existen misiones espaciales que, con sus telescopios y sensores a bordo, pueden realizar la misma función desde el espacio y, de manera más directa, las propias misiones también pueden aportar sus datos de posición, velocidad y trayectoria. Así, se hace una recopilación de un gran volumen de datos que deberán ser gestionados e integrados desde las distintas fuentes mencionadas. A continuación, se depurarán y adaptarán a un formato común y coherente que permita su posterior análisis. Con todos ellos, se generarán bases y catálogos de datos incluyendo la población de objetos detectados que deberán mantenerse bajo continua actualización.

Posteriormente, estos datos se analizan para determinar las trayectorias de los objetos, predecirlas a futuro y evaluar los riesgos de colisión entre ellos. A partir de esta información, se generan los estándares CDMs (Conjunction Data Messages) para los escenarios de aproximaciones cercanas entre objetos, incluyendo detalles como la identidad de los objetos, la distancia mínima y la velocidad relativa entre ellos, el tiempo en el que se estima la colisión, la incertidumbre que se tiene acerca de la posición de los objetos y la probabilidad de que se produzca el impacto. Este análisis lo suelen realizar entidades como la Oficina de Basura Espacial de la ESA (Space Debris Office, SDO) y lo comunican a las misiones operacionales para llevar a cabo una maniobra que reduzca la probabilidad de choque en caso de ser finalmente necesario.

El uso de la IA en la gestión del tráfico espacial todavía es limitado y se encuentra en una fase inicial de desarrollo y demostración tecnológica. A pesar de ello, ya se han comenzado a considerar y estudiar múltiples aplicaciones en las que podría ser de gran ayuda y en las que revolucionaría la manera de abordarlo. Vamos a verlas a continuación.

Identificación y clasificación de objetos en órbita

Las tecnologías actuales de detección de objetos presentan limitaciones a la hora de realizar el seguimiento de fragmentos muy pequeños (de alrededor de 1 cm o menores) u objetos de los que se tiene una gran incertidumbre en su órbita, por lo que hay gran parte de ellos que no pueden ser detectados. Ante esto, la IA ofrece la posibilidad de mejorar la detección y clasificación de los distintos objetos (satélites activos, inoperativos y fragmentos de basura espacial) a partir de las imágenes tomadas por las anteriores tecnologías.

La visión artificial permite entender y extraer información de las imágenes tomadas por los sensores. Esta técnica se basa en realizar un pre-procesado de las imágenes con el objetivo de mejorar su calidad (como la optimización de brillo o color) para después extraer información de las mismas como bordes, formas, texturas, patrones o estructuras. Con esto, se pueden llegar a derivar propiedades de los objetos en las imágenes como su tamaño, orientación o curvatura incluso en tiempo real.

Una vez se han detectado los objetos en las imágenes, pueden aplicarse algoritmos de aprendizaje automático y profundo de clasificación para categorizarlos y caracterizarlos basándose en atributos como el tamaño, forma o material. Esto permitiría conocer en más detalle la naturaleza y propiedades de la población de basura en el entorno de un satélite para darle la capacidad al sistema de priorizar las distintas posibles estrategias de mitigación. Por ejemplo, objetos a más velocidad y de mayor tamaño pueden requerir una intervención inmediata debido a que implican un mayor riesgo, mientras que los de menor tamaño y velocidad, podrían ser menos problemáticos.

Con el fin de obtener buenos resultados a través de este tipo de algoritmos de IA, es muy importante realizar una fase previa de entrenamiento de los mismos. Para este entrenamiento, es indispensable alimentarlos con una amplia diversidad de datos de los que puedan aprender. Para esto, es muy útil aplicar el aumento de datos, que consiste en generar nuevos datos e incrementar las opciones de entrada a los algoritmos. En el caso de las imágenes, el aumento de datos aplicaría variaciones a las imágenes como rotaciones o distorsiones que aportan distintas perspectivas y escenarios al modelo.

La ESA ya ha comenzado a integrar la IA en su departamento de basura espacial, liderando propuestas destinadas a desarrollar modelos de IA para la detección de objetos espaciales como [ésta](#), que busca el reconocimiento de satélites en órbitas GEO a partir de imágenes de telescopios convencionales.

Predicción de la posición orbital y la probabilidad de colisión entre objetos

Una predicción orbital precisa es de vital importancia en la gestión de la basura espacial. Sin embargo, debido a la baja precisión de las observaciones y al desconocimiento de las propiedades físicas y geométricas de la basura, la estimación de las trayectorias siempre tiene un error, que aumenta rápidamente a medida que se amplía la predicción de la órbita en el tiempo. Esto hace complicado conocer exactamente la posición de los objetos y puede llegar a limitar el período de validez de esta información.

Esta incertidumbre se cuantifica para definir un volumen alrededor del satélite en el que podría encontrarse el mismo para, después, definir la probabilidad de colisión entre varios objetos. Así, cuanto mayor sea la incertidumbre en la órbita, mayor será ese volumen y peor la predicción de las colisiones. Tener grandes incertidumbres puede implicar tener falsas alertas de posibles impactos, lo que aumenta significativamente la carga de trabajo e, incluso, puede llegar a suponer un mayor número de maniobras a ejecutar durante la misión y más consumo de fuel innecesario. A medida que se acerca el tiempo de la posible colisión, la incertidumbre disminuye y se tiene información más precisa del posible impacto, sin embargo, no se puede posponer la toma de decisión acerca de si maniobrar o no hasta ese momento, ya que se requiere una preparación de la misma con cierto margen de tiempo. Por todos estos motivos, es imprescindible mejorar las técnicas de análisis de estos datos, lo que puede alcanzarse gracias al uso de la IA.

Actualmente, se están desarrollando técnicas de análisis predictivo para extraer los errores en la predicción orbital de observaciones históricas que, junto con algoritmos de aprendizaje automático, sirve para entrenar modelos que puedan predecir los errores orbitales a futuro y mejorar la predicción en la posición de los objetos. Gracias a ello, los operadores de las misiones pueden decidir con días de antelación entre proceder a la preparación de una maniobra o esperar a tener datos adicionales antes de iniciar estas tareas. La empresa *Neuraspace* ya ha puesto en marcha una herramienta que aplica estos algoritmos de IA, puedes leer más sobre ello en este [enlace](#). Además, ya se han publicado estudios que muestran una reducción en los errores de miles a cientos o decenas de metros en predicciones 7 días a futuro, alcanzando una mejora en la precisión del 50%, lo que muestra el potencial que puede tener la IA en aplicaciones de este tipo.

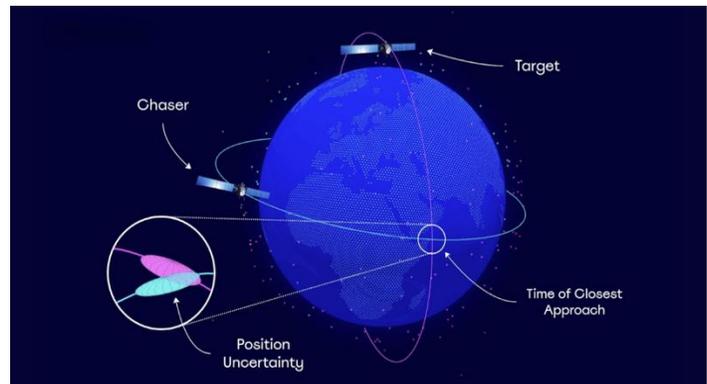


Figura 9: Colisión con incertidumbre en la posición de los objetos (*Neuraspace*)

A partir de las posiciones orbitales (y otras variables a tener en cuenta) se hace el cálculo de la probabilidad de colisión entre los objetos. Cada misión tiene definido un umbral de probabilidad de colisión que, si es superado, deberá ejecutarse una maniobra de evasión de colisión. De este modo, una mejora en la precisión y predicción de la posición orbital implicará una mejora en el cálculo de la probabilidad de colisión.

En la actualidad, los operadores de las agencias hacen un seguimiento de la probabilidad de colisión de cada alerta y, si se acerca al límite definido en la misión, lo comunican a los operadores para empezar a preparar una maniobra. Como se prevé que exista un incremento en el número de alertas, se espera que este método deje de

ser una opción viable por la carga de trabajo que supondría. Por eso, también se están estudiando técnicas de IA para simplificar todo este proceso y predecir la evolución de la probabilidad de colisión de cada alerta. Predecir la probabilidad de colisión permitiría alertar a las misiones con mayor tiempo para empezar a preparar las operaciones necesarias con cierta certeza de que finalmente se vaya a ejecutar.

Para probar la robustez de estos algoritmos, se hace uso del histórico de CDMs con alertas de colisión pasadas para predecir la probabilidad de colisión final del evento, la cual puede compararse con la del último CDM correspondiente que se tuvo en el caso real y validar los resultados del algoritmo. Sin embargo, como ya hemos mencionado anteriormente, el entrenamiento de estos algoritmos de IA con gran variedad de datos es indispensable. En este caso, la mayoría de alertas no resultan en un riesgo final de colisión y su probabilidad disminuye a medida que se acerca el tiempo de la colisión. Por este motivo, existe un reto y dificultad en entrenar adecuadamente a estos algoritmos ya que, a pesar de haber gran cantidad de CDMs, sólo son una minoría de ellos en los que se mantiene una probabilidad de colisión alta.

Ejecución de maniobras

Para satélites en órbita LEO, debido a la interrumpida comunicación que tienen con las estaciones terrenas, la decisión acerca de ejecutar o no una maniobra ante un aviso de colisión no es posible tomarse en tiempo real y se debe decidir con un margen de tiempo suficiente para enviar al satélite todos los telecomandos de la maniobra durante un pase. ¿Te imaginas las ventajas que tendría disponer de un satélite que, de manera autónoma y sin intervención humana, pudiese observar su entorno, analizarlo y tomar la decisión de ejecutar una maniobra de evasión de colisión si fuese necesario? Gracias a la IA podemos plantearnos esta pregunta.

Con IA se podría llegar a replicar todo el proceso de identificación de los casos en los que una maniobra es estrictamente necesaria, la parte más compleja que hasta ahora es realizada por los operadores. Gracias a la inteligencia artificial, se podrían implementar algoritmos capaces de calcular los riesgos de colisión, tomar decisiones y ejecutar maniobras mediante la evaluación de distintos factores como el tamaño de los objetos, su velocidad y trayectoria o, incluso, las prioridades de la misión y restricciones operacionales.

Integrando el análisis predictivo con algoritmos de toma de decisión mediante IA, se podría llegar a alcanzar un alto nivel de autonomía en todo el proceso de evasión de colisión, mitigando los riesgos que implica y aportando seguridad a las misiones en órbita. Además, también permitiría reducir de manera significativa los tiempos de respuesta y la carga de trabajo de los operadores, reduciendo la intervención humana en todo el proceso y permitiendo a los operadores enfocarse en otras tareas y llevar a cabo unas operaciones más eficientes.

Eliminación de basura espacial

Además de todo lo anterior, la IA también se está teniendo en cuenta para diseñar satélites autónomos y con robótica capaces de identificar y capturar satélites inertes y otro tipo de basura espacial, permitiendo hacer una limpieza activa del entorno orbital.

Técnicas de visión artificial y aprendizaje automático podrían ser de gran ayuda para realizar operaciones de proximidad tanto con otros satélites o con objetos no cooperativos como es la basura espacial para desecharlos al final de su vida útil. La IA permitirá diseñar satélites con mecanismos capaces de capturarlos y transferirlos a

una órbita segura o realizar una reentrada de los mismos en la atmósfera terrestre. Del mismo modo, la IA podría ayudar al guiado de los propios satélites al final de su vida útil hacia una reentrada controlada por sí mismos.

Como podréis deducir de todo esto, la aplicación de la IA en la gestión del tráfico espacial promete significantes beneficios para las misiones futuras a través del desarrollo de algoritmos capaces de detectar y eliminar fragmentos de basura espacial y satélites inertes, así como de predecir las trayectorias de los objetos, las posibles colisiones entre ellos y dotar a los satélites con autonomía para ejecutar maniobras ante éstas. Aunque ya se han dado los primeros pasos, todavía queda mucho para superar los desafíos y limitaciones que presenta el uso de la ciencia de datos y la IA en la gestión de la basura espacial y conseguir explotar todas sus capacidades.

7. Temas de reflexión y preguntas abiertas

- ¿Qué impactos podría tener una pérdida temporal o permanente de telemetría de los distintos tipos de misiones?
- ¿Qué consecuencias puede tener hacer un análisis incorrecto o incompleto de los datos obtenidos en telemetría?
- ¿Deberían los datos recopilados en misiones espaciales estar disponibles de manera gratuita y abierta para la comunidad científica mundial o, por el contrario, deberían estar protegidos?
- ¿Crees que debería de existir un marco legal internacional que regulase el uso común del espacio y la gestión del mismo y de la basura espacial?
- ¿Qué otras consecuencias se te ocurren que puede tener la basura espacial sobre las misiones actuales y futuras?
- ¿Qué consecuencias podría tener un mal uso y aplicación de la inteligencia artificial en las misiones espaciales y en gestión del tráfico espacial?
- ¿Qué desafíos y limitaciones crees que presenta el uso de inteligencia artificial en las misiones espaciales y en la gestión de la basura espacial?
- ¿Crees que es seguro confiar en la capacidad de la inteligencia artificial para tomar decisiones autónomas en las misiones espaciales sin la intervención de humanos?

8. Bibliografía

[Ground segment - Wikipedia](#)

[Introduction to Satellite Ground Stations – Telecomworld101.com](#)

[Cómo es la operación de CHEOPS \(inta.es\)](#)

[Tipos De Satélites: Diferencias En Sus Funciones Y Utilidad \(eos.com\)](#)

[ESA - About satellite navigation](#)

[Transforming Energy into Imagery: How Satellite Data Becomes Stunning Views of Earth | NESDIS \(noaa.gov\)](#)

[Imagine the Universe! \(nasa.gov\)](#)

[What is Artificial Intelligence? - NASA](#)

[ESA - Artificial intelligence in space](#)

[ESA - Artificial intelligence boosts science from Mars](#)

[ESA - Working towards a Digital Twin of Earth](#)

[ESA - ESA Space Environment Report 2024](#)

[ESA - Reentry and collision avoidance](#)

[AI for space traffic management: Q&A \(neuraspaces.com\)](#)

[ESA - AI challenged to stave off collisions in space](#)

[Questjournals - AI in Addressing Space Pollution](#)

[Autonomy and AI to Solve the Debris Problem and Create an In-Space Economy - Luxembourg Space Agency](#)

[Space Debris Removal using AI and Deep Learning](#)