



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS  
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

## Helicóptero *Ingenuity* (III)

### Precursor de la exploración aérea en el sistema solar

*Moisés M. Fernández Álvaro*

Academia de las Ciencias y las Artes Militares  
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de junio de 2024

Desde el pasado 18 de enero de 2024 el helicóptero *Ingenuity* descansa para siempre en el valle de Neretva en la superficie marciana. Después de elevarse verticalmente a 12 metros de altura sobre el suelo de Marte y mantenerse durante 4.5 segundos en el aire, descendió a una velocidad de 1 m/s siguiendo el comando recibido. Cuando se encontraba a 1 m del suelo perdió el contacto con el rover *Perseverance*, que le sirve de estación base de comunicaciones con el centro de control en NASA/JPL.

Fue su último vuelo, el número 72, en la débil atmósfera marciana. Un día después las comunicaciones se restablecieron. El análisis de las últimas imágenes enviadas revela que el aterrizaje fue accidentado, ocasionando la rotura y pérdida del extremo exterior de al menos dos palas de fibra de carbono y posiblemente la pérdida de una pala, lo que le imposibilita volver a volar; dicho análisis parece sugerir que la pala se localiza en las proximidades del helicóptero.

Este vuelo culminó una asombrosa aventura de 1.004 días terrestres, casi 1.000 soles marcianos, desde su primer vuelo el 19 de abril de 2021. Diseñado para cumplir una misión de demostración tecnológica de realizar 5 vuelos durante 1 mes, ha sobrepasado de tal manera esas expectativas iniciales que la NASA decidió pasar a una fase de demostración operacional.



*Extremo roto de una de las palas. Imagen NASA/JPL-Caltech*

En esta segunda fase cumplió misiones de exploración aérea avanzada para la conducción segura del *Perseverance*, de identificación de posibles zonas de interés científico para la toma de muestras del rover y también de reconocimiento, como puede verse en la imagen, de los restos del aterrizaje del *Perseverance* ocurrido el 18 de febrero de 2021.

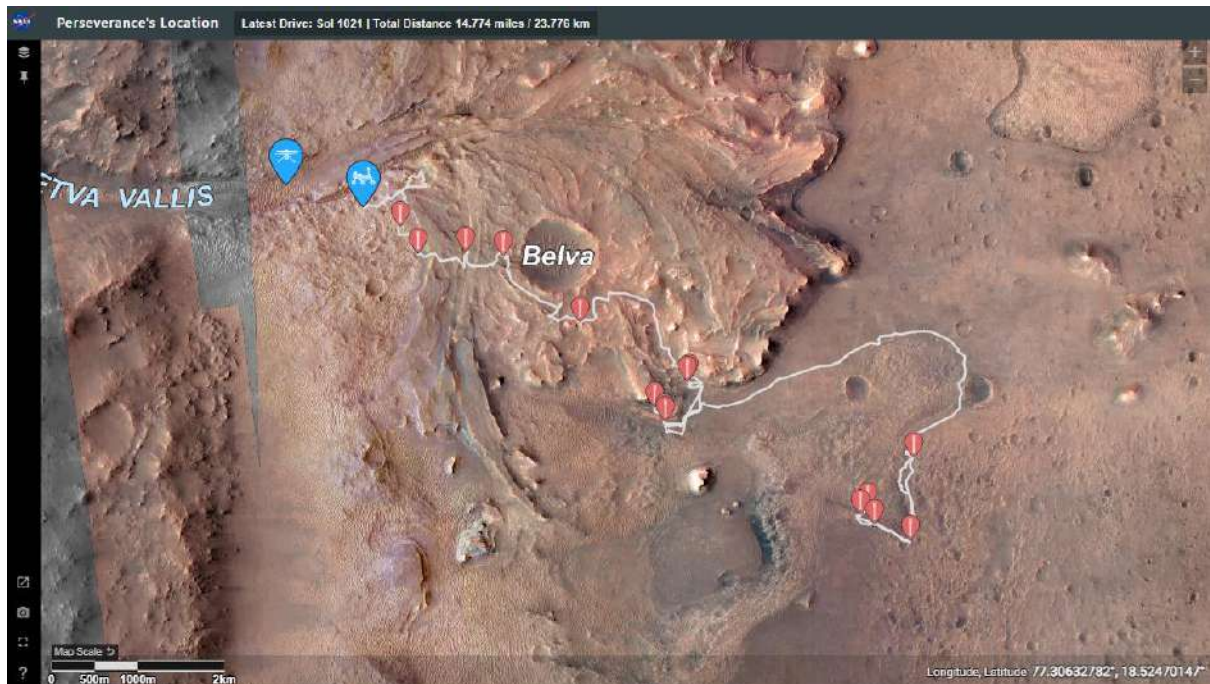
Finalmente, en los últimos meses de 2023, los ingenieros de JPL lo utilizaron como plataforma de ensayos en vuelo para expandir la envolvente de vuelo de la aeronave y determinar sus límites aerodinámicos.

Los datos obtenidos en esta última fase de ensayos en ambiente real han sido determinantes para el diseño y desarrollo de las futuras aeronaves marcianas que actualmente se están ensayando en el simulador espacial de JPL para la futura



*Restos del paracaídas supersónico y cubierta protectora del Perseverance esparcidos en la superficie marciana, cerca del lugar de aterrizaje del rover, en una foto tomada en el vuelo 26. Imagen NASA/JPL-Caltech*

misión MRS (*Mars Sample Return*) de recogida de las muestras obtenidas por el rover, en la que también colaborará la Agencia Espacial Europea (ESA).



*Recorrido del Perseverance desde su aterrizaje y localizaciones de los tubos de muestras recogidas. Imagen NASA/JPL-Caltech*

## Capacidades técnicas y operativas alcanzadas

En estos casi 3 años (llegó a la superficie marciana el 18 de febrero de 2021 adosado en la parte inferior del rover nodriza) ha logrado unas capacidades aerodinámicas muy superiores a los límites de vuelo inicialmente establecidos. Sus principales logros son:

- Número de vuelos: 72
- Tiempo total de vuelo: 128 minutos 25 segundos
- Distancia total volada: 17 km
- Velocidad máxima de desplazamiento horizontal: 10 m/s
- Altitud máxima de vuelo: 24 m
- Campos de aterrizaje utilizados: 45
- Velocidad máxima vertical al despegue: 1,5 m/s
- Velocidad mínima de descenso: 0,75 m/s



Las estadísticas alcanzadas, inimaginables al principio, han sido el resultado de un largo e intenso esfuerzo de un equipo de ingenieros y científicos de NASA y JPL que iniciaron en 2016 los primeros ensayos del prototipo en la cámara de ensayos de 8 m de diámetro y 26 m de alto del simulador espacial de JPL. Este simulador permite combinar temperaturas, presiones y composiciones de gases para replicar atmósferas de otros mundos.



*Primer vuelo controlado (el 31 de mayo de 2016) del modelo a escala nominal del prototipo del Ingenuity, ensayado en la cámara térmica de vacío del simulador espacial de JPL. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

En esa cámara pudieron comprobar que el vuelo controlado en una atmósfera similar a la marciana era posible. No obstante, las posibilidades de vuelo horizontal son muy reducidas por lo que hubo que construir un túnel aerodinámico de viento para simular los vientos marcianos y las condiciones aerodinámicas en los vuelos de avance para complementar, en lo posible, la envolvente de vuelo de diseño de la aeronave. Ese primer vuelo histórico fue la confirmación de que las condiciones de ensayo habían reproducido fielmente la atmósfera marciana.

En los meses sucesivos el equipo técnico del *Ingenuity* comprobó de manera metódica las capacidades reales del helicóptero, aumentando paso a paso sus actuaciones en vuelo. De los parámetros de diseño (10 m de altura y 5 m/s de velocidad de desplazamiento) en el vuelo número 10 ya estaba volando a 12 m de altitud y a una velocidad de 5 m/s; el record de altura, 24 m, lo establecería en el vuelo 61 y el de velocidad en el 62 alcanzando los 10 m/s.

Superados los primeros vuelos de demostración, la nueva misión de exploración aérea combinada con el movimiento en superficie del rover, requirió una gran coordinación con la misión científica del *Perseverance* en su avance por los

estrechos canales del delta del volcán Jezero, en el que habían aterrizado. Ello limitaba la capacidad de operación autónoma, al estar condicionado por la necesidad de comunicación en línea visual directa.

A continuación, se van a describir los factores técnicos que han determinado el planeamiento operativo previo a cada vuelo en esta segunda fase.



*Imagen tomada por el instrumento Mastcam-Z del Perseverance el 2 de agosto de 2023 un día antes del vuelo 54. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

## Desarrollo de los planes de vuelo del *Ingenuity*

Previamente a cada vuelo el equipo técnico elaboraba el plan de vuelo más adecuado a las necesidades de movimiento del rover en ese momento, aunque condicionado a diversos factores técnicos que se detallan a continuación:

- La energía: los vuelos demandan en un corto período de tiempo una gran cantidad de energía de la batería de a bordo y el proceso de descarga en vuelo disminuye la capacidad de suministrar un nivel alto de potencia. Por debajo de un nivel pre-establecido de carga la batería ya no es capaz de cubrir la necesidad de potencia requerida por el motor, lo que produciría la desestabilización o un apagón generalizado de los sistemas de la aeronave, ocasionando la pérdida de la capacidad de vuelo y el subsiguiente impacto en el suelo.
- El calor: el vuelo genera una cantidad significativa de calor en varios componentes del helicóptero y un tiempo de vuelo alto podría originar un sobrecalentamiento en los componentes más sensibles, ocasionar posibles fallos y en último término un fallo catastrófico. Por ello previo a cada vuelo ha de analizarse el balance térmico global de la aeronave considerando la estación climática marciana, el entorno de vuelo y el perfil de cada vuelo.
- La morfología del terreno de sobrevuelo: el tipo de la superficie sobrevolada impacta directamente en las actuaciones del sistema de navegación. Un terreno muy accidentado puede ocasionar picos de tiempo de proceso para el control del vuelo y en consecuencia picos de consumo de energía.

- La seguridad de la aeronave: una adecuada selección de los factores antes reseñados favorece vuelos más largos, pero es crucial identificar las posibles zonas de aterrizaje y evitar localizaciones inseguras. Zonas de vuelo suficientemente firmes y libres de piedras favorecen las posibles sendas de vuelo y los campos de aterrizaje seguros.

Posiblemente, este factor haya sido determinante en el accidente final, ya que el impacto se produjo en una zona de dunas en el valle Neretva tal como se aprecia en la imagen.



*Imagen: NASA/JPL-Caltech*

El denominador común de todos los condicionantes mencionados es el factor tiempo de vuelo. Ahorrar tiempo permite ahorrar energía, reducir el sobrecalentamiento de los componentes y permitir una mayor libertad para emplear velocidades más bajas para sobrevolar con mayor seguridad sobre terrenos escarpados que pudieran poner en riesgo o degradar significativamente la precisión en el aterrizaje.

### **Nuevo enfoque operacional**

Una vez demostradas sus capacidades operacionales como explorador aéreo de apoyo al rover se plantea la oportunidad de pasar a una nueva fase operacional como plataforma de ensayos en vuelo para determinar sus límites aerodinámicos.

Alcanzar velocidades y aceleraciones más altas reduce el tiempo de vuelo necesario para recorrer una distancia determinada. A su vez, mayores altitudes de vuelo permiten mayores velocidades ya que el campo de visión más amplio permite mantener más tiempo los detalles del terreno a la vista de la cámara de navegación del Ingenuity, compensando el efecto contrario de una velocidad más alta.



Por tanto, expandir la envolvente de vuelo posibilitaría relajar las restricciones iniciales en el planeamiento de los vuelos y permitiría al helicóptero operar más eficientemente junto con el *Perseverance*. Por ello, el equipo técnico decidió modificar sus objetivos y buscar oportunidades para iniciar vuelos de ensayo que le permitieran ampliar los límites de vuelo y alcanzar nuevos records.

Este nuevo enfoque permitió obtener en el vuelo 45 nuevos records de velocidad horizontal (6 m/s), que fue posteriormente superado (6,5 m/s) en el vuelo 49, de aceleración horizontal (0,85 m/s<sup>2</sup>) y la máxima altitud de vuelo hasta 18 m en el vuelo 50.

Sin embargo, compaginar la campaña de ensayos de manera continuada con el programa operacional de exploración del *Ingenuity* requería un notable esfuerzo para sincronizar los vuelos del helicóptero con los movimientos del rover sobre un terreno accidentado, manteniendo las comunicaciones directas entre ambos.

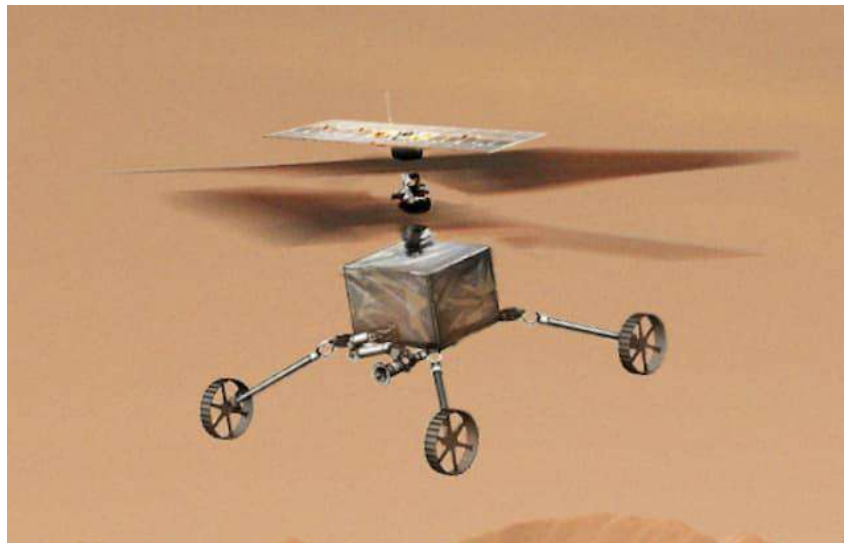


*Imagen de los movimientos del rover y la posición final del helicóptero. Imagen NASA/JPL-Caltech*

En septiembre de 2023, una vez demostradas sus capacidades operacionales como explorador aéreo de apoyo al rover, aprovechando la situación de ambos en una zona llana y alta favorable por tanto para las comunicaciones directas entre ambos, se plantea la oportunidad de pasar a una nueva fase operacional como plataforma de ensayos en vuelo para determinar sus límites aerodinámicos, poniendo especial énfasis en la reducción de la velocidad de aterrizaje por debajo del valor nominal de 1 m/s.

Alcanzar una velocidad de descenso más baja es una prioridad para el diseño del futuro helicóptero marciano SRH (*Sample Recovery Helicopter*) que se está diseñando para la recogida de los tubos de muestras que el *Perseverance* está dejando sobre la superficie del volcán Jezero.

Este nuevo diseño, como puede verse en la figura, utiliza la base del *Ingenuity* con un instrumento adicional, un brazo robótico, y unas ruedas en las cuatro patas del tren de aterrizaje. La masa añadida incrementa el nivel de esfuerzo que ha de soportar el tren de aterrizaje en la toma.



*Impresión artística del SRH. Imagen NASA/JPL-Caltech*

Por este motivo, un aterrizaje más suave es beneficioso para el tren de aterrizaje, aunque es más exigente para el algoritmo que procesa los parámetros que va detectando durante la toma para evitar un accidente. Simular en la Tierra los aterrizajes en el ambiente de gravedad marciana es difícil de conseguir de una manera realista.

En ese momento, el *Ingenuity* presentaba una oportunidad única para recolectar datos reales a las velocidades de aterrizaje nominales que se están diseñando para el proyecto SRH. Esta oportunidad se materializó en los vuelos 57 a 59, demostrándose la viabilidad de una toma más suave, a velocidades de descenso un 25% más lenta que la de diseño, tanto sobre terreno plano como en pendiente.

Además, en el vuelo 59 se alcanzó el máximo techo hasta ese momento en vuelo estacionario, 20 m de altura, y en vuelo horizontal a 16 m de altitud. Normalmente se mantiene un margen de seguridad de 4 a 6 m respecto al techo de vuelo para evitar la posible entrada en pérdida en maniobras rápidas de inclinación de la



aeronave, para absorción de variaciones imprevistas del terreno y también por la propia respuesta del software de control de vuelo ya que no es instantánea.

En los vuelos siguientes se continuó expandiendo la envolvente de vuelo. En el vuelo 60 se estableció un nuevo record de velocidad horizontal, 8 m/s. En el 61 se incrementó la velocidad de ascenso hasta 1,5 m/s y la de descenso se redujo hasta 0,75 m/s, alcanzándose también el «record absoluto del techo de vuelo en estacionario hasta los 24 metros».

Ello suponía sobrepasar el peor caso teórico en una situación de pérdida de señal del LRF (laser range finder) que se usa para medir la altura de vuelo sobre el terreno; si dicha pérdida supera los 2 segundos el helicóptero entra en modo seguro, se para e inicia el aterrizaje probablemente de forma segura en caso de vuelo en estacionario, pero posiblemente de manera no controlada si está en vuelo horizontal.

En el vuelo 62 se alcanzó el objetivo de volar a *10 m/s, record absoluto de velocidad horizontal*, a una altitud de 18 m. Además, el *Ingenuity* simultaneaba estos vuelos con su misión operativa de exploración, tomando imágenes de alta resolución de la zona sobrevolada para proporcionar la información detallada del tipo de terreno y optimizar la ruta de avance del rover.

La campaña de ensayos en vuelo del *Ingenuity* ha sido un éxito trascendental, demostrando que el helicóptero era todavía capaz de alcanzar nuevos records y aumentar la envolvente de vuelo. En resumen, en los últimos nueve meses el equipo de operaciones del helicóptero consiguió duplicar el límite de altitud máxima de vuelo (de 12 a 24 m), casi doblar la velocidad horizontal máxima (de 5,5 a 10 m/s), incrementar la aceleración máxima vertical y horizontal, y validar ambos tipos de aterrizaje (duros y suaves).

A pesar de esta rápida evolución, nuevas capacidades se fueron alcanzando, por ejemplo, la máxima distancia volada (705 m en el vuelo 69), hasta concluir su vida operativa en el vuelo 72 con un aterrizaje accidentado sobre la pendiente de una duna en el valle Neretva, según se muestra en la imagen.

En estos casi 1.000 soles marcianos de operación, ha demostrado su capacidad para seleccionar de manera autónoma lugares de aterrizaje, operar con un sensor inoperativo, limpiarse la arena acumulada por las tormentas de polvo, aterrizar en 48 campos de aterrizaje distintos, realizar tres aterrizajes de emergencia y sobrevivir a las duras condiciones ambientales en Marte: la radiación cósmica, el frío invierno y las fuertes tormentas de polvo.



*En la parte superior izquierda se puede observar el helicóptero posado sobre la pendiente de una duna, después del vuelo 72.  
Imagen: NASA/JPL-Caltech*

Diseñado para operar en la primavera marciana, no podía suministrar potencia a los calentadores durante la noche en los periodos más fríos del invierno, ocasionando periódicamente fases de congelación y reiniciación del computador de abordo. Ello obligó al equipo técnico de control en tierra a rediseñar las operaciones durante los periodos invernales para mantenerlo operativo.

Finalmente, una vez posicionado el rover en línea de comunicación directa, el equipo técnico ha podido realizar los últimos ensayos de los sistemas de abordo comprobando que siguen operativos, y descargar las últimas imágenes y datos existentes en la memoria del computador de abordo.

La última misión del *Ingenuity* será la de observatorio estacionario, mientras se encuentre en línea de comunicación directa, para recopilar datos. Los controladores de la misión han implementado un parche de software en el *Ingenuity* para adaptar sus capacidades a esta nueva encomienda.

*Ingenuity* se despertará diariamente, activará sus ordenadores de vuelo y probará el rendimiento de su panel solar, baterías y equipos electrónicos. Además, tomará una fotografía de la superficie con su cámara a color y recopilará datos de temperatura con los sensores que tiene instalados.

Con esta información, los ingenieros de *Ingenuity* y los científicos de la NASA consideran que los datos proporcionarán una perspectiva de los patrones climáticos

y del polvo de Marte, lo que sin duda beneficiará a los futuros diseñadores de aeronaves marcianas.

## Futuros desarrollos

### Helicópteros marcianos

La campaña de ensayos en el ambiente real de la atmósfera marciana tiene una trascendencia vital para el diseño y desarrollo de las futuras generaciones de helicópteros y drones marcianos. En la actualidad el laboratorio JPL-Caltech está ensayando en el simulador espacial antes citado un nuevo rotor de palas de fibra de carbono, diseñado para alcanzar velocidades casi supersónicas (0,95 Mach) en punta de pala, que se utilizará en la siguiente versión, el SRH antes citado, para la misión MSR.



*Impresión artística del SRH. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

Esta nueva versión de helicóptero marciano tendrá misiones operacionales propias tales como la recogida de las muestras que el *Perseverance* está depositando en su recorrido por la superficie del Jezero utilizando un brazo robótico. Posteriormente las transportará al lugar de aterrizaje del módulo del MSR que posteriormente despegará y traerá a la Tierra esas muestras; también incorpora ruedas para realizar aproximaciones de precisión a los tubos.

Para realizar estas misiones el SRH necesita, respecto al *Ingenuity*, aumentar la capacidad de carga, tener un rango mayor, volar a una velocidad mayor y tener capacidad de toma suave en el aterrizaje. Las nuevas palas que se están diseñando tienen una envergadura mayor, casi 10 cm más que las del *Ingenuity*, mayor



resistencia estructural y un nuevo diseño aerodinámico. Todo ello le proporciona una mayor sustentación, mayor robustez y mayor capacidad de carga.

En los ensayos realizados en JPL se han alcanzado velocidades superiores de giro del rotor, hasta 3.500 rpm, lo que supone 750 rpm más rápido que el rotor del *Ingenuity*, así como un mayor ángulo de inclinación de las palas.

De esta manera podrá realizar vuelos más rápidos lo que a su vez requiere mejorar el sistema de navegación ya que utiliza una cámara de reconocimiento del terreno. Si las rocas y otras características de la superficie pasan demasiado rápido a través de su campo de visión el sistema de navegación podría perder el rumbo; para contrarrestar este efecto volará a mayor altitud para mantener más tiempo esas imágenes en su campo de visión.

Además, para aumentar la duración de los vuelos por encima de los tres minutos (en el vuelo 12 alcanzó el record de tiempo de vuelo en 169,5 segundos) es necesario mejorar el sistema de control de temperatura y el sistema de regulación de la unidad de potencia para proporcionar al motor la energía requerida en cada situación de vuelo.

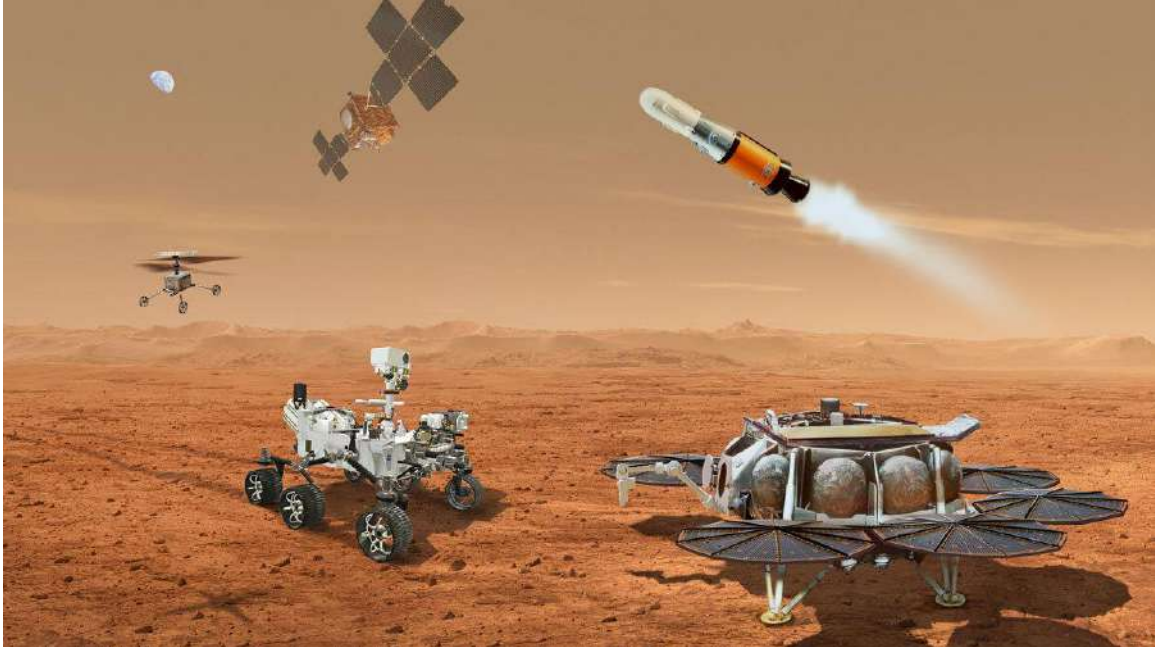
La futura generación de helicópteros marcianos se complementará con nuevos modelos de drones de 4 o más rotores dotados con mayor capacidad de giro, con ángulos de cabeceo y balanceo mayores para aumentar su maniobrabilidad. Ello les proporcionará capacidad para adentrarse en zonas inaccesibles de la escarpada superficie marciana aumentando significativamente la capacidad de exploración.

En la parte central superior de la imagen anterior se muestra un futuro modelo de dron con seis rotores, el MSH (*Mars Science Helicopter*), que se emplearía en misiones de exploración y de transporte de cargas útiles e instrumentos científicos, para estudiar terrenos en los que los rovers no pueden llegar; su capacidad de carga estaría entre los 2 y 5 kg.

### **Misión MSR a Marte**

La misión MSR a Marte puede considerarse como una misión conjunta (NASA, ESA, Centros de investigación y desarrollo) combinada (aterrizador /cohete/ helicópteros/ orbitador), que tiene como objetivo traer a la Tierra las muestras de rocas y suelo marcianos que ha ido recogiendo el rover *Perseverance*, para que puedan ser investigadas en los laboratorios terrestres en busca de vestigios de vida pasada en Marte.

Está planteada como un complejo esfuerzo colectivo de la NASA, Centros públicos y privados de investigación y desarrollo tecnológico y la ESA (*European Space Agency*).



*Impresión artística de los distintos componentes de la misión MSR una vez posicionados en Marte. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

Como puede observarse en la imagen, la misión incluye la nave SRL (*Sample Retrieval Lander*) de NASA que serviría de plataforma de lanzamiento del cohete MAV (*Mars Ascent Vehicle*) con las muestras recogidas y depositadas en un contenedor. Una vez en órbita marciana, el MAV se acoplaría al ERO (*Earth Return Orbiter*) de la ESA que sería el encargado de traer a la Tierra la valiosa carga.

La previsión actual es que sea el propio recolector de las muestras repartidas por la superficie del cráter Jezero, el rover *Perseverance*, el que deposite los tubos en el contenedor del cohete MAV con la ayuda de dos helicópteros SRH transportados a Marte adosados a la nave SRL.

El lanzamiento del SRL se prevé en 2030 (un año después del ERO) para aterrizar en Marte dos años después. La vuelta se plantea en 2035 después de tres años de operación para la recogida de los tubos de muestras.

## Misión Dragonfly a Titán

Otro heredero del *Ingenuity* es el modelo que se está desarrollando para la misión Dragonfly que se lanzará en 2028 a la luna Titán de Saturno. El objetivo de la misión es que el dron de 4 rotores vuele por la superficie de Titán durante los casi tres años nominales de duración de la misión, para estudiar la superficie en múltiples sitios distintos.



*Dron Dragonfly de cuatro rotores. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

Se cree que Titán es muy similar a la Tierra primigenia y por ello la exploración de diversos entornos, desde dunas orgánicas hasta el suelo de un cráter de impacto donde el agua líquida y materiales orgánicos complejos (fundamentales para la vida) convivieron durante decenas de miles de años, puede proporcionar pistas sobre cómo la vida puede haber surgido en nuestro planeta.

Sus instrumentos estudiarán hasta dónde puede haber progresado la química prebiótica. También investigarán las propiedades atmosféricas y superficiales de la luna de Saturno y los depósitos subterráneos de líquido y océanos. Además, los instrumentos buscarán evidencia química de vida pasada o existente.

Las propias características de Titán: su atmósfera (4,4 veces más densa que la de la Tierra) y su gravedad (la séptima parte de la terrestre) proporcionan unas condiciones óptimas para hacer volar una aeronave en Titán, pero imponen unas condiciones muy exigentes a la aeronave.



Dada la gran cantidad de nubes que hay en Titán y su distancia al Sol, *Dragonfly* utilizará un generador termoeléctrico de radioisótopos similar al de *Curiosity*. Durante el día «titaniano» (que dura ocho días terrestres) el cuatrirotor volaría de punto a punto o permanecería en vuelo estático para tomar medidas con sus instrumentos y hacer observaciones con sus cámaras; los datos recogidos servirían al equipo técnico de la misión para programar nuevos destinos a los que volar.

En resumen, podemos afirmar que «la misión del *Ingenuity* en Marte ha abierto y consolidado el futuro operacional de las aeronaves» en las misiones futuras de la NASA por los planetas y lunas con atmósfera del sistema solar. ■

**Nota:** Las ideas y opiniones contenidas en este documento son de responsabilidad del autor, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento de la Academia de las Ciencias y las Artes Militares.

© Academia de las Ciencias y las Artes Militares - 2024