

# **Helicóptero *Ingenuity*.**

## **El precursor de la exploración aérea en Marte (I)**

*Moisés Manuel Fernández Álvaro*  
Academia de las Ciencias y las Artes Militares  
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de febrero de 2022

El 18 de febrero de 2021 llegaba a Marte el helicóptero *Ingenuity* acoplado en la parte inferior de la estructura del rover *Perseverance*. Inicialmente estaba previsto como un experimento más de la misión *Mars 2020 Perseverance*, una demostración tecnológica para analizar las posibilidades de vuelo de un vehículo en la débil atmósfera marciana. Su éxito le ha convertido en un elemento esencial de la propia misión.

Con el desarrollo de los sucesivos vuelos los ingenieros del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) han ido adquiriendo confianza en las posibilidades operacionales del helicóptero y resolviendo las dificultades e incidentes que han surgido en algunos vuelos.

El cumplimiento con plena satisfacción de los hitos técnicos y operativos que se habían establecido para los primeros 5 vuelos fue el factor decisivo para ampliar la misión del *Ingenuity* y convertirse en elemento determinante para diseñar la ruta que ha de seguir el rover en su desplazamiento por la superficie marciana. Además, ha proporcionado información muy valiosa para seleccionar posibles objetivos de recogida de muestras que realiza el rover con el taladro, para su posterior sellado en tubos diseñados para poder recogerlas y traerlas a la Tierra en el futuro.

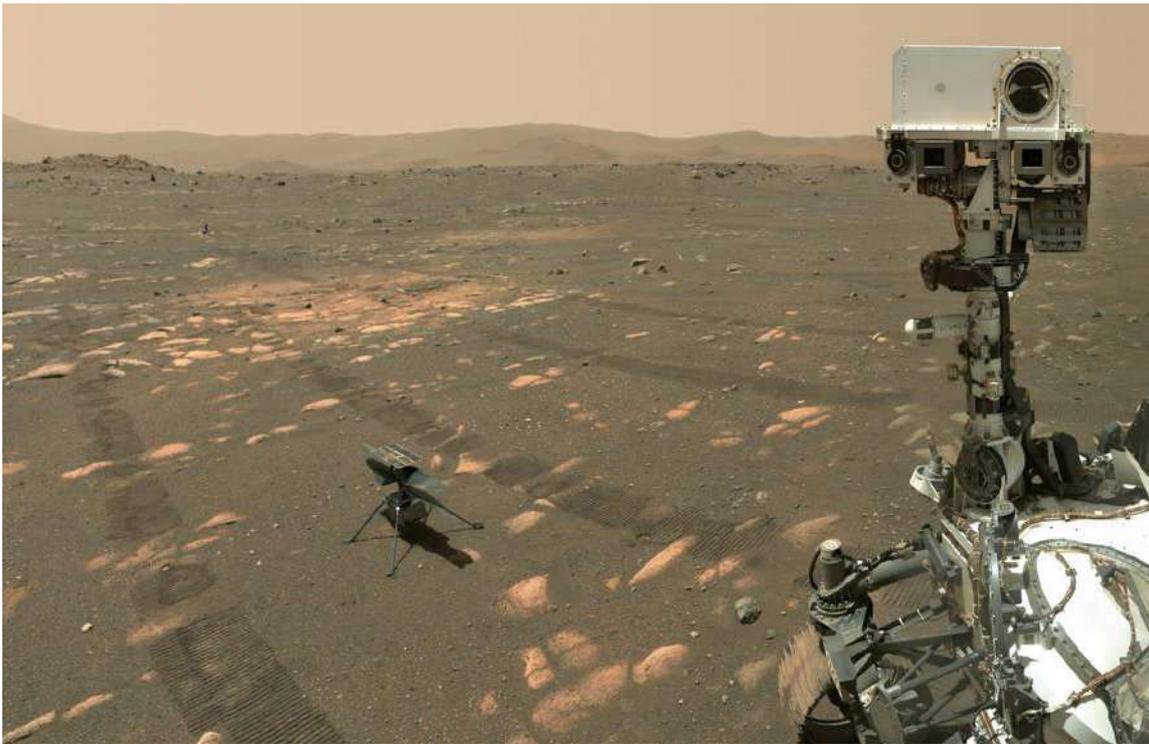
### **Capacidades operacionales**

Puede afirmarse que el helicóptero birotor *Ingenuity* ha iniciado la exploración aérea en Marte siendo el precursor de varias capacidades operacionales, tales como:

- Observación aérea avanzada para identificación de objetivos.
- Observación del terreno para determinación de la trayectoria óptima del rover en su desplazamiento.
- Obtención de imágenes estéreo para generación de mapas de elevación digitales del terreno, que facilite la planificación de rutas del rover y la prevención de riesgos.

- Obtención de imágenes en B/N y color de alta resolución (HR) que proporciona 10 veces más resolución que las obtenidas por los orbitadores marcianos.
- Banco de ensayos en vuelo para implementación de SW con nuevas soluciones para la dinámica de vuelo que han sido previamente ensayadas en laboratorio.
- Sensor de datos dinámicos para modelización y análisis de incidencias ocurridas en vuelo.
- Base de diseño para futuros ingenios de exploración aérea en Marte y otros objetivos planetarios con atmósfera.

Además, este éxito permitirá incorporar en las misiones futuras a Marte (y otros mundos con atmósfera) aparatos aéreos multirrotor, con mayor capacidad de carga de experimentación, capaces de realizar reconocimientos aéreos a mayor distancia del rover nodriza y con canales de intercomunicación de mayor ancho de banda.



*El rover Perseverance Mars de la NASA se hizo un selfie con el helicóptero Ingenuity, a unos 13,9 metros del rover en esta imagen tomada el 6 de abril de 2021, el 46 día marciano, o sol, de la misión con el instrumento WATSON. Imagen: NASA/JPL-Caltech*

El proceso seguido en los sucesivos vuelos ha permitido validar paso a paso la aerodinámica de las palas del rotor y las *performances* previstas de la dinámica de

vuelo del aparato (altitud, velocidad horizontal y vertical, estabilidad, etc.). En definitiva, se ha delimitado su envolvente de vuelo operacional.

## **Desarrollo del proyecto**

En el año 2014 se inicia el diseño conceptual del helicóptero por JPL con el apoyo del *Ames Research Center* y del *Langley Research Center* (ambos pertenecientes a NASA) para el análisis de las *performances* de vuelo. Una vez obtenida la financiación, JPL desarrolló el diseño, fabricación, ensayos e integración en el rover con la colaboración de las empresas AeroVironment Inc, Qualcomm, Snapdragon y SolAero que proporcionaron los componentes principales, y de Lockheed Martin Space que desarrolló el sistema de suelta del helicóptero al suelo marciano.

Los criterios principales del diseño fueron:

- Utilización de componentes COTS (*commercial off the self*).
- Capacidad de realizar 5 vuelos en 30 soles (días marcianos).
- Empleo de procesador tipo Smartphone con sistema operativo abierto Linux.
- Capacidad de vuelo autónomo después de la recepción del telecomando desde el rover.

El coste total del proyecto fue de 80 millones USD aproximadamente.

El viaje a Marte lo realizó acoplado a la parte inferior del rover, que le proporcionó protección mecánica, térmica y ambiental, así como el suministro de energía durante todas las fases desde el lanzamiento hasta la suelta y descenso al suelo marciano.

Una vez posicionado el rover Perseverance en la superficie marciana dentro del cráter Jezzero, 2 meses después, a 330 m desde el lugar de amartizaje, se inició una secuencia de movimientos programados para realizar la separación del helicóptero de la nave nodriza y el posicionado seguro en el suelo.

A continuación, como paso previo al inicio de los vuelos, se fue revisando el correcto funcionamiento de todos los subsistemas del aparato, así como la puesta en marcha del motor eléctrico de los rotores para comprobar que en 12 segundos alcanzaban la velocidad óptima de giro de las palas, 2537 rpm, para ese primer vuelo.



*Imágenes: NASA/JPL-Caltech*

El 7 de abril de 2021, el 47º día marciano, o sol, de la misión el helicóptero desbloqueó sus aspas, lo que les permitió girar libremente. Estas imágenes fueron captadas por la cámara Mastcam-Z a bordo del rover en el siguiente sol, el 8 de abril, después de realizar una prueba real de puesta en marcha de los rotores para asegurarse que funcionaban correctamente

Finalmente, el 19 de abril de 2021, a las 12.33h solar local, se realiza el primer vuelo de un aparato sobre la superficie de Marte, despegando del campo de vuelo elegido por la ausencia de obstáculos, de 10 m x 10 m, denominado Wright Brothers Field y separado 65 m del rover.

Precisamente, la NASA se ha llevado al planeta rojo un pedazo de tela del ala del primer avión del mundo, el Wright Flyer I, unido a la parte inferior del panel solar del Ingenuity.

## **Características técnicas**

Las características técnicas principales del aparato son:

- Masa: 1.8 Kg.
- Peso: 1.8 Kg en la Tierra (0.68 Kg en Marte).
- Altura: 0.49 m.
- Birotor coaxial, contrarrotatorio, con 2 palas de fibra de carbono con módulo de *foam*, de envergadura de ~4 ft (~1.2 m) de punta a punta de pala.
- Potencia: paneles solares para recargar baterías Sony de ion Litio con seis celdas con una capacidad de placa de 2 Ah, capaces de proporcionar energía para un vuelo de 170 segundos por día marciano (~350 W de potencia media en vuelo).



*Imagen artística del helicóptero Ingenuity*

- Radio de alcance: hasta 2050 ft (625 m).
- Altitud de vuelo: hasta 33ft (10 m).
- Características ambientales: atmósfera con densidad ligeramente inferior al 1% de la terrestre y presión media de 0.6 kPa (en la Tierra 101,3 kPa); compuestos principales: CO<sub>2</sub> (95%), N (3%) y Ar 1.6%.
- Control térmico tipo aerogel capaz de soportar bajas temperaturas en el rango de -20° C hasta -90° C.
- Velocidad horizontal de desplazamiento: hasta 36 Km/h (10 m/s).
- Velocidad vertical: hasta 3 m/s.
- Velocidad de giro del rotor: hasta 2900 rpm (5 veces mayor que los helicópteros estándar en la Tierra).
- Capacidad de vuelo autónomo mediante recepción de telecomandos del rover; sistema de comunicación en UHF a 900 MHz, capaz de transmitir datos a 250 kbit/s a distancias de hasta 1000 m.
- Cámara B/N (NavCam) para seguimiento vertical del suelo, integrada con el sistema de navegación inercial.
- Cámara 4K de alta resolución (HR) capaz de tomar fotos de sitios ubicados a larga distancia.

## **Sistema de navegación**

El sistema de navegación está basado en un inercial (IMU) utilizando giróscopos y acelerómetros, que integra las aceleraciones y velocidades angulares de giro, para

estimar su posición, velocidad y ángulo de actitud en todo momento. Adicionalmente, fusiona datos otros sensores (sensor de inclinación, altímetro y detector de peligro); el sistema de control de abordaje reacciona a las diferencias entre el movimiento estimado y el deseado, y ajusta los nuevos datos con una frecuencia de 500 veces por segundo.

Este sistema de navegación está complementado por un sistema de navegación relativa basado en visión (VBN) para corregir la propagación de errores en el tiempo inherentes al sistema de navegación inercial.

El sistema VBN utiliza las imágenes de la cámara B/N (NavCam) correlacionando los datos iniciales con las imágenes obtenidas verticalmente del suelo, a 30 imágenes por segundo, asignando a cada imagen una marca de tiempo.

El algoritmo de navegación hace una predicción de la imagen siguiente en base a la localización de elementos significativos de la anterior (cambios de color, protuberancias del terreno, piedras, dunas) y busca dónde aparecen realmente esos elementos en la imagen. Con las diferencias obtenidas entre las localizaciones estimadas y reales corrige sus predicciones de posición, velocidad y actitud de la aeronave.

A diferencia del sistema de navegación por reconocimiento del terreno, ampliamente utilizado por los misiles crucero, este sistema no necesita disponer previamente de una cartografía o modelo del terreno sobre el que va a desplazarse.

## **Conclusiones**

El cumplimiento con éxito de los requisitos técnicos y operativos en las sucesivas fases de demostración tecnológica y operacional del helicóptero *Ingenuity* ha demostrado la viabilidad y complementariedad del componente aéreo en las futuras misiones de rovers sobre la superficie marciana y en otros planetas y lunas con atmósfera.

Su éxito permite considerar a los futuros helicópteros y drones multirrotor un elemento esencial en el diseño y desarrollo de las operaciones de superficie (exploración, investigación, etc.) a llevar a cabo por los futuros rovers.

De manera similar al desarrollo y participación creciente del componente aéreo en la evolución de las misiones y campañas de los ejércitos desde el siglo XX en la Tierra, mediante globos aerostáticos, dirigibles, aviones, helicópteros y drones multirrotor, *Ingenuity* ha demostrado la viabilidad de ampliar el radio de acción

operacional del rover nodriza sirviéndole como elemento de proyección avanzada en sus misiones científicas de exploración.

Funciones tales como cartografía digital del terreno en HR, determinación de rutas óptimas de desplazamiento, observación y asignación de objetivos a investigar, caracterización en altura del perfil atmosférico (velocidad de viento, temperatura, presión, etc.) e incluso como relé de comunicaciones locales de superficie más allá del horizonte en misiones multirover, podrán ser incluidas desde el diseño preliminar de las futuras misiones a Marte con ambos componentes: rovers de superficie y drones aéreos multirotores.

Respecto a futuras misiones marcianas, la próxima generación de helicópteros estará en el rango de masa entre 5 y 15 kg, con cargas útiles científicas entre 0,5 y 1,5 kg, pudiendo comunicarse directamente con un orbitador, lo que les permitiría desarrollar misiones independientes del rover de superficie.

De hecho, podrían utilizarse para explorar regiones inaccesibles con los rovers o con características especiales, por ejemplo, zonas de hielo de agua o salmueras donde la vida microbiana del terreno pudiera haber existido e incluso sobrevivir.

Los helicópteros también podrían realizar la recuperación rápida de las pequeñas cápsulas de muestras que está recogiendo el rover *Perseverance*, para un futuro regreso a la Tierra a bordo de un vehículo ascendente desde Marte.