



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

Helicóptero *Ingenuity*. Desarrollo de sus capacidades operativas (II)

Moisés M. Fernández Álvaro

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

26 de marzo de 2022

Descripción de los primeros vuelos

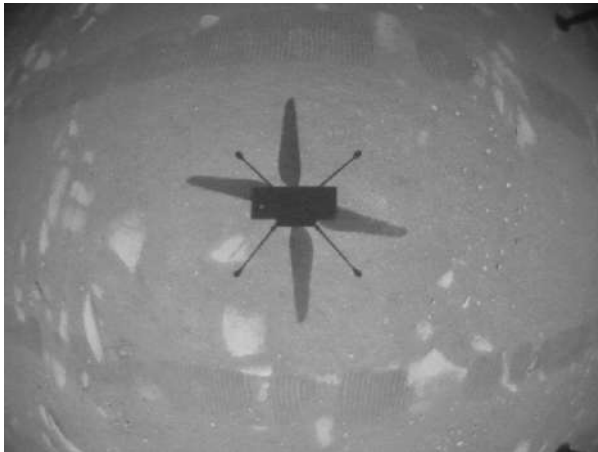


El rover Perseverance Mars de la NASA hizo esta foto del helicóptero Ingenuity el 6 de abril de 2021, el 46 día marciano, o sol, de la misión con el instrumento WATSON, a unos 13,9 metros del rover. Imagen: NASA/JPL-Caltech.

Antes de iniciar los vuelos se comprobaron el correcto funcionamiento de todos los subsistemas del aparato y la puesta en marcha del motor eléctrico de los rotores. Finalmente, el 19 de abril de 2021, a las 12.33 hora solar local, después de alcanzar la velocidad óptima de giro de las palas para este primer vuelo, 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.

Este primer vuelo controlado, elevándose verticalmente hasta una altura de 3 m y manteniéndose en estacionario durante 30 s, duró 39.1 s. Ha sido equiparado al primer vuelo controlado del *Flyer* de, 12 s, en Kitty Hawk el 17 de octubre de 1903 con un recorrido de 36 m. Desde ese primer vuelo, el desarrollo de la aeronáutica y de los vuelos espaciales ha sido vertiginoso, apenas 120 años separan ambos hitos y demuestran que el vuelo controlado en la superficie de otro planeta o luna con atmósfera es posible.



Sombra del Ingenuity. Imagen NASA/JPL-Caltech.

El helicóptero *Ingenuity* tomó esta foto, capturando su propia sombra, mientras flotaba sobre la superficie marciana el 19 de abril de 2021, durante el primer vuelo controlado y con motor en otro planeta. Usó su cámara de navegación, que rastrea de forma autónoma el suelo durante el vuelo con una velocidad de toma de imágenes sincronizada con la velocidad de giro de las palas, de manera que parezcan congeladas en la imagen.

El helicóptero ha ido cumpliendo las especificaciones técnicas de diseño y ampliando progresivamente el dominio de vuelo hasta cumplir con éxito en los 5 primeros vuelos el objetivo de demostración tecnológica. En ese momento los ingenieros de misión decidieron continuar los vuelos y pasar a una fase de demostración operacional, acompañando los sucesivos desplazamientos del rover.



El segundo vuelo fue capturado el 22 de abril de 2021. Imagen: NASA / JPL-Caltech.

En el Anexo 1 se muestra el *Flight Log* de los 18 primeros vuelos. Hasta la fecha actual, el último vuelo realizado es el 8 de febrero de 2022, con un retraso de un mes después de la fecha prevista, el 7 de enero, a causa de las condiciones meteorológicas locales.

A continuación, se describen aspectos significativos de algunos vuelos para mostrar el proceso de avance técnico y la resolución de los problemas que iban surgiendo:

- En el 4º vuelo realiza un vuelo de ida y vuelta, como en los anteriores, en dirección sur para buscar la zona de aterrizaje en el próximo vuelo; es la primera «exploración aérea», generando un mapa digital de elevación del terreno.
- En el 5º vuelo se dirige en dirección sur aterrizando en el nuevo campo de vuelo denominado *Airfield B* realizando toma de imágenes en HR.



El quinto vuelo fue capturado por una de las cámaras de navegación a bordo del rover Perseverance. Esta fue la primera vez que voló a un nuevo lugar de aterrizaje. Imagen: NASA / JPL-Caltech.

- En el 6º vuelo ocurrió el primer incidente en vuelo, el aparato comenzó a realizar movimientos angulares de cabeceo y de balanceo descontrolados, más de 20º, con picos de consumo de energía, que se detuvieron al llegar a la posición prevista de aterrizaje, lo que le permitió posarse suavemente en el suelo.

El análisis de los datos recibidos permitió deducir que a los 54 segundos de vuelo se produjo un fallo en el suministro de imágenes de la cámara de navegación, con la pérdida de una imagen, lo que alteró la correcta

asignación de las imágenes posteriores a las marcas de tiempo reales, por lo que el algoritmo de navegación comenzó a realizar correcciones erróneas continuamente produciendo las oscilaciones observadas.

A pesar de esta anomalía el aparato sobrevivió, ya que está diseñado para ser suficientemente robusto (con un amplio margen de estabilidad), pudo proseguir el vuelo y aterrizar suavemente a 5 m de la posición prevista.

Otro factor de diseño decisivo en el aterrizaje es que en la fase final de la maniobra de descenso la cámara de navegación se detiene. Gracias a ello el helicóptero pudo estabilizarse y realizar el descenso a la velocidad nominal.

En conjunto, el helicóptero sobrevivió gracias a que los diversos subsistemas (rotores, actuadores y potencia) respondieron a incrementos anómalos de su capacidad. Este vuelo ha proporcionado una información muy valiosa a los diseñadores para futuras misiones y ha ampliado significativamente, de manera imprevista, su envolvente de vuelo.

- El 9º vuelo ha batido el record de distancia, 625 m, y casi de duración, 2 min 46 s, (el record lo tiene el 12º con 4 s más) y ha validado la idea de servir como explorador para un rover y ver sitios inaccesibles (o zonas de exclusión) para un vehículo de superficie, como por ejemplo zonas de dunas; el rover *Spirit* murió atascado en una zona de terreno demasiado blanda que no se pudo ver previamente.

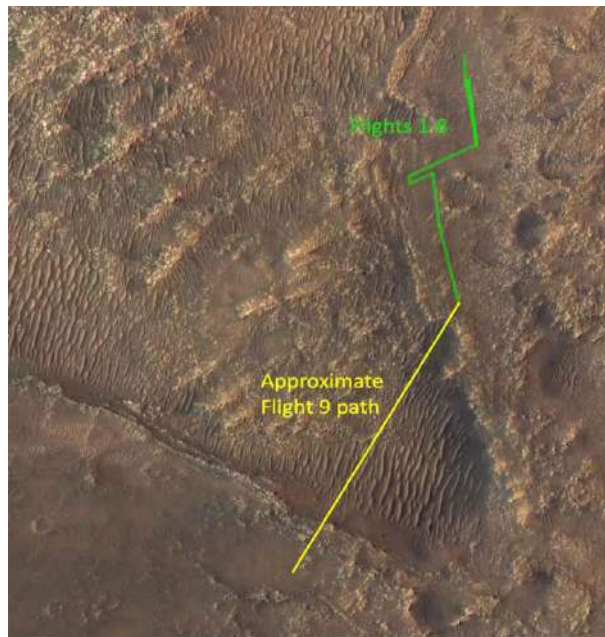


Imagen: NASA/JPL-Caltech

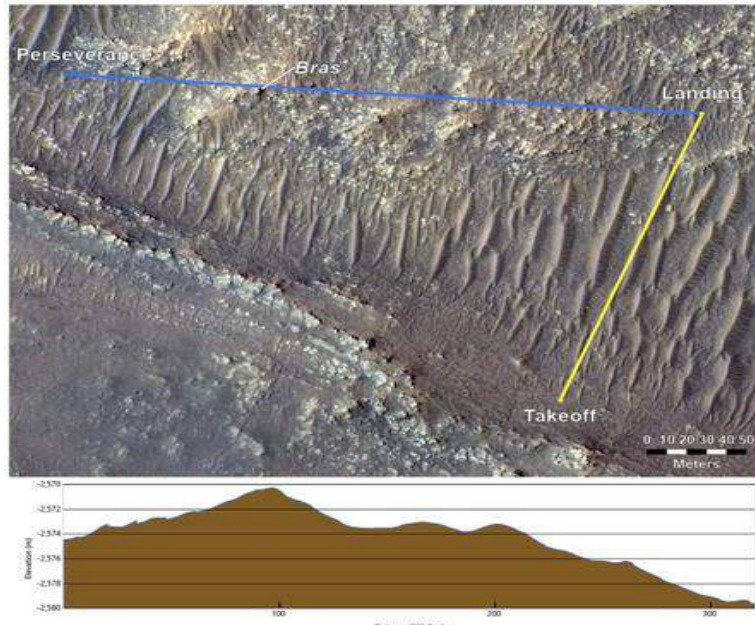
Las imágenes en HR obtenidas por la cámara lateral (apunta 22° por debajo de la horizontal) a 10 m de altura, han proporcionado también información detallada de la estratigrafía de las diferentes capas de roca circundante, lo que permitirá analizar los cambios ocurridos de las condiciones climáticas del cráter en la antigüedad.

- El 13^{er} vuelo fue realizado a baja altitud y baja velocidad, para obtener imágenes de mayor detalle en sentido contrario al vuelo anterior y elaborar un mapa 3D más detallado de la zona, lo que permitió optimizar la ruta que posteriormente siguió el rover; un video de vuelo captado desde el rover con su instrumento *Mastcam Z*, permitió observar las nubes de polvo generadas por los rotores en el despegue y aterrizaje.



Nube de polvo generada en el despegue. Imagen: NASA/JPL-Caltech

- En el 17^o vuelo se produjo durante el descenso al *Airfield K* una interrupción momentánea en la comunicación entre el helicóptero y el rover; el análisis posterior de los datos de telemetría transmitidos al rover sugiere una configuración difícil de conexión de la radio durante el aterrizaje debido a obstáculos en la orografía de la zona de aterrizaje, más escarpada que en los campos de vuelo anteriores.
- El 18^o vuelo realizado el 15 de diciembre de 2021 terminó con descenso sobre el nuevo campo de vuelo *Airfield L*, con «aterrizaje» duro por primera vez, que le hizo balancearse de manera imprevista. *Ingenuity*, que supera ya los 30 minutos de vuelo en Marte, ha ampliado los límites del alcance y del rendimiento de la radio de *Ingenuity* durante el aterrizaje. Para ello el



Mapa topográfico del vuelo 17 de Ingenuity. Imagen: NASA/JPL-Caltech

equipo ha modificado la secuencia de vuelo para comunicarse en un modo de baja velocidad de datos, lo que proporciona un impulso adicional en la intensidad de la señal en el enlace radio con el rover.

- El 19º vuelo, inicialmente previsto para el 7 de enero de 2022, no llegó a despegar, como demostraron las fotos enviadas los días 9 de enero (el helicóptero se encontraba en la misma posición que en la foto realizada el 20 de diciembre después del vuelo anterior) y 11 de enero (en la que se aprecia sobre el suelo un reflejo del sol en la película metálica de protección



Foto tomada el 26 de diciembre de 2021 a las 12:37:28 hora solar local. Imagen NASA/JPL-Caltech

térmica de la aviónica del helicóptero, similar al de la foto tomada el 26 de diciembre); el objetivo de este vuelo era efectuar el recorrido del 9º vuelo en dirección contraria para obtener una cartografía 3D de esa zona.

Las imágenes obtenidas por el orbitador marciano MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*) a principios de enero de 2022 mostraron desplazamientos de grandes tormentas de polvo regionales desde el hemisferio sur al hemisferio norte, alcanzando la zona del cráter *Jezzero*, anticipándose el «periodo polvoriento» en casi dos meses, pues suelen iniciarse en el otoño marciano (previsto su inicio el 24 de febrero) extendiéndose a lo largo del invierno.

El helicóptero había sobrevivido en las condiciones atmosféricas de primavera y verano marcianos, pero ante las nuevas condiciones atmosféricas los responsables del proyecto decidieron retrasar el vuelo por condiciones meteorológicas.

Finalmente, el pasado 8 de febrero de 2022 el Ingenuity realiza su primer vuelo en 2022, durante 100 s recorriendo 62 m.

Dos han sido los factores que han motivado este retraso:

- Al aumentar el polvo en suspensión, el incremento de la radiación absorbida recalienta la atmósfera, reduciendo aún más su débil densidad (hasta un 7% según los datos obtenidos por el instrumento MEDA del rover).
- La acumulación de polvo en los paneles solares reduce su capacidad de absorción de la radiación solar (hasta un 18%), lo que afecta a la capacidad de carga de la batería y le impide proporcionar la energía necesaria para aumentar la velocidad de giro de los motores y aumentar así la sustentación del aparato.

Para poner en contexto este reto, baste señalar que volar en la atmósfera marciana es equivalente a volar en la atmósfera terrestre a 100.000 ft, mientras que la altura de vuelo máxima alcanzada por los helicópteros terrestres es de 42.000 ft.

Conclusiones

A lo largo de los sucesivos vuelos la aeronave ha conseguido consolidar nuevas *performances* de vuelo: más tiempo de vuelo, mayor altura, mayor distancia recorrida y mayor velocidad de desplazamiento.

Ha demostrado tener un diseño robusto y estable, manteniendo la estabilidad de vuelo en condiciones adversas, controlando térmicamente la aviónica dentro de los

márgenes de diseño, reconfigurando la conexión radio con el rover para mejorar la señal y soportando su primera tormenta de polvo en el inicio del otoño marciano.

La supervivencia de la aeronave, la superación con creces de las expectativas técnicas y operativas previstas y la demostración práctica de capacidades operacionales equivalentes a las que en la Tierra realiza el componente aéreo en las operaciones conjuntas con fuerzas terrestres, han demostrado, sin lugar a dudas, 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.

De hecho, *Ingenuity* ha demostrado ser necesario para ampliar el radio de acción operacional del rover nodriza, sirviéndole como elemento de proyección avanzada en sus misiones científicas de exploración. Los futuros drones multi-rotor serán un elemento esencial en el propio diseño de las futuras misiones de exploración e investigación, por ejemplo, para facilitar la recogida de las muestras selladas que va diseminando el rover *Perseverance*.

NASA, a través de su programa *Mars Sample Return*, prevé recuperar esas muestras, almacenarlas en el cohete ligero *Mars Ascent Vehicule (MAV)* que despegará de Marte, y encapsularlas en el orbitador *Earth Return Orbiter* de la ESA, para traerlas de manera segura a la Tierra.

Las futuras generaciones de multi-rotos, de mayor capacidad, permitirán desarrollar misiones independientes y explorar regiones inaccesibles con los rover de superficie.

Sin lugar a dudas, la gesta del helicóptero *Ingenuity* quedará grabada como una de las más importantes en la historia de la aeronáutica.

Flight Log

Flight	Sol	Date	Horizontal Distance		Max. Altitude		Max. Groundspeed		Duration	Route of Flight	
			m	ft	m	ft	m/s	mph		seconds	From
1	58	April 19, 2021	0	0	3	~10	0	0	39.1	Wright Brothers Field	
2	61	April 22, 2021	4	~13	5	~16	0.5	~1	51.9		
3	64	April 25, 2021	100	~328	5	~16	2	~4.5	80.3		
4	69	April 30, 2021	266	~873	5	~16	3.5	~8	116.9		
5	76	May 7, 2021	129	~423	10	~33	2	~4.5	108.2	Wright Brothers Field	Airfield B
6	91	May 22, 2021	215	~705	10	~33	4	~9	139.9	Airfield B	Airfield C
7	107	June 8, 2021	106	~348	10	~33	4	~9	62.8	Airfield C	Airfield D
8	120	June 21, 2021	160	~525	10	~33	4	~9	77.4	Airfield D	Airfield E
9	133	July 5, 2021	625	~2051	10	~33	5	~11	166.4	Airfield E	Airfield F
10	152	July 24, 2021	233	~764	12	~39	5	~11	165.4	Airfield F	Airfield G
11	163	Aug. 4, 2021	383	~1257	12	~39	5	~11	130.9	Airfield G	Airfield H
12	174	Aug. 16, 2021	450	~1476	10	~33	4.3	~10	169.5	Airfield H	
13	193	Sept. 4, 2021	210	~689	8	~26	3.3	~7	160.5		
14	241	Oct. 24, 2021	2	~6.5	5	~16	0.5	~1	23.0		
15	254	Nov. 6, 2021	407	~1335	12	~39	5	~11	128.8	Airfield H	Airfield F
16	268	Nov. 20, 2021	116	~381	10	~33	1.5	~3	107.9	Airfield F	Airfield J
17	282	Dec. 5, 2021	187	~614	10	~33	2.5	~6	116.8	Airfield J	Airfield K
18	292	Dec. 15, 2021	230	~755	10	~33	2.5	~6	124.3	Airfield K	Airfield L
19	345	Feb. 8, 2022	63	~207	10	~33	1	~2.2	100	Airfield L	Airfield E