



Artículo Nº 33 / 2025

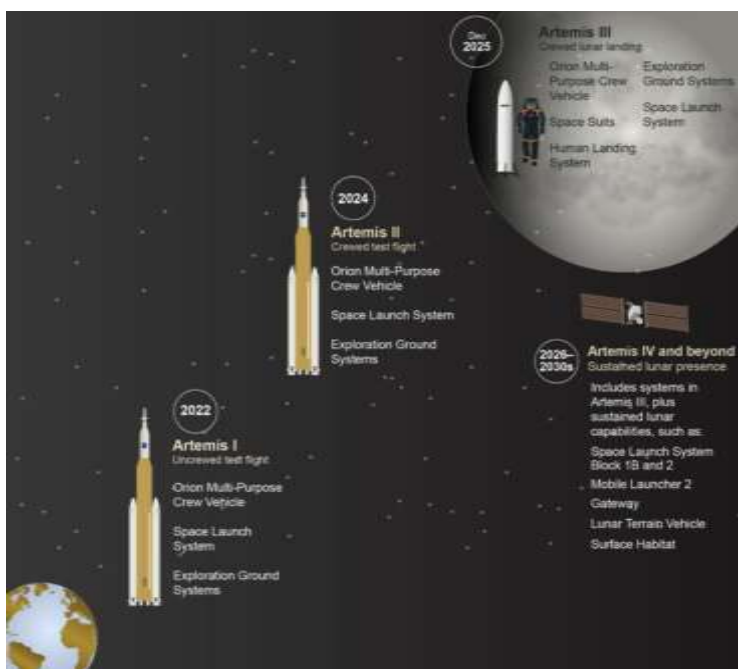
MÓDULOS LUNARES DE SISTEMA DE ATERRIZAJE HUMANO (HLS) DEL PROGRAMA ARTEMIS

Por Álvaro Aguirre Warden, Director de Asuntos Espaciales.

23 de diciembre de 2025. 10 Min. de lectura.

La exploración lunar ha regresado con una fuerza sin precedentes en el siglo XXI. Tras décadas de ausencia de misiones tripuladas a la Luna desde el programa Apolo, el programa Artemis de la NASA pretende no solo de llevar seres humanos al satélite natural, sino establecer una presencia sostenida que habilite investigaciones científicas, recursos in situ y, eventualmente, misiones más lejanas hacia Marte. Uno de los elementos primordiales de este programa es el Human Landing System (HLS), una nave específicamente diseñados para transportar astronautas desde la órbita lunar hasta la superficie y de vuelta.

La primera misión denominada Artemis I, fue un vuelo de prueba no tripulado que se efectuó el 16 de noviembre de 2022, para evaluar el SLS (Sistema de Lanzamiento Espacial) y de la cápsula Orión que llevará a los astronautas al espacio. La segunda misión denominada Artemis II, será una misión tripulada por cuatro astronautas que orbitarán la Luna a bordo del módulo Orión. La tercera misión denominada Artemis III tiene como objetivo el de llevar a dos humanos (al menos una mujer y una persona de color) a la superficie de la Luna a través del módulo lunar Sistema de Aterrizaje Humano (HLS, *Human Landing System*) de SpaceX. Las siguientes misiones Artemis IV y en adelante son las conocidas como Sostenida Presencia Lunar (SLD).



Programa Artemis. Fuente: GAO.

El contrato del desarrollo del HLS para Artemis III fue asignado por la NASA a la empresa SpaceX por un valor de 2.900 millones de dólares, y este módulo se conoce como HSL Opción A., posteriormente la NASA modificó el contrato con SpaceX para la etapa de las misiones de Sostenida Presencia Lunar y le ha asignado Artemis IV donde utilizará el módulo HLS Opción B de SpaceX por un valor de 1.150 millones de dólares.

Para la misión Artemis V, la NASA seleccionó a Blue Origin para desarrollar el HLS por un valor de 3.400 millones de dólares.

Cada módulo lunar tripulado se lanzará previamente una versión no tripulada por motivos de seguridad con la excepción del HLS Opción B.

Desafíos de construir un sistema de aterrizaje lunar.

Los obstáculos que enfrenta el HLS son múltiples y complejos. El primero de ellos es el entorno lunar, un lugar hostil donde el agua se encuentra congelada en cráteres permanentemente oscuros, el regolito es abrasivo, la radiación es intensa y las temperaturas varían de forma extrema. Estos factores exigen que los vehículos sean robustos y extremadamente seguros.

Otro desafío es el acoplamiento orbital. Los astronautas viajarán en la nave Orion, la cual se acoplará con el HLS en la órbita lunar. Esta maniobra, que fue común durante el programa Apollo, adquiere nuevas complejidades cuando se integran vehículos de diversas compañías y con interfaces de diseño distintas.

También sobresale la dificultad de desarrollar sistemas de soporte vital capaces de albergar a los astronautas durante días o semanas en la superficie. La NASA ha creado concursos y programas de investigación para fomentar soluciones innovadoras en oxigenación, reciclaje de agua, temperatura, microbios y manejo de desechos.

En la Luna, las naves espaciales como HLS Starship y Blue Moon Mark 2 se enfrentarán a temperaturas extremas, como es el caso del polo sur de la Luna, donde durante la noche lunar, las temperaturas pueden bajar hasta los -223° Celsius, y en algunas partes del espacio profundo, las temperaturas pueden variar desde los 120° Celsius bajo la luz solar directa hasta casi los -273° Celsius en la oscuridad.

Existen dos métodos principales para gestionar las condiciones térmicas, que es el pasivo y el activo. Los controles térmicos pasivos incluyen materiales como aislamiento, pintura blanca, mantas térmicas y metales reflectantes. Los ingenieros también pueden diseñar controles operativos, como apuntar las áreas térmicamente sensibles de una nave espacial lejos de la luz solar directa, para ayudar a gestionar condiciones térmicas extremas. Las medidas de control térmico activo que podrían utilizarse incluyen radiadores o refrigeradores criogénicos.

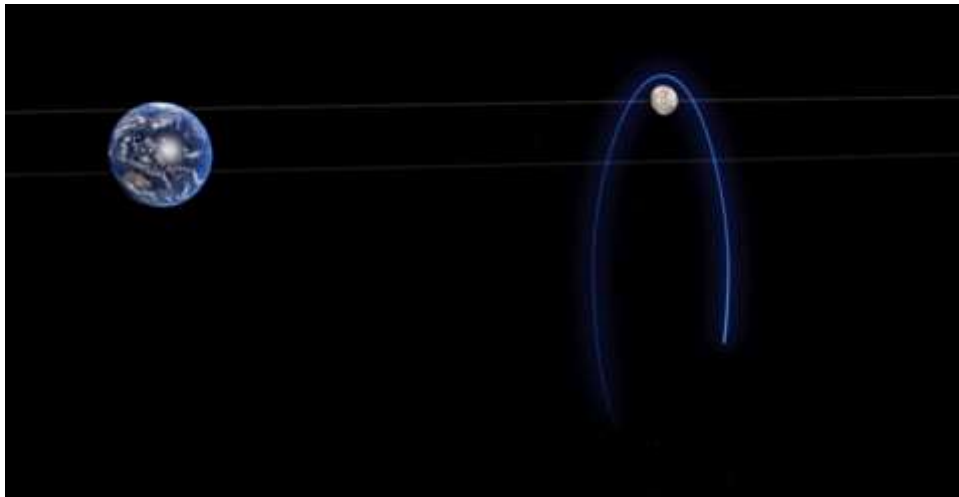
Órbita de Halo Casi Sostenida (NRHO).

Es una órbita que combina las ventajas de la órbita lunar baja (acceso a la superficie) con los beneficios de la órbita retrógrada distante (eficiencia de combustible). NRHO es una órbita de una semana que se equilibra entre la gravedad de la Tierra y la de la Luna. Esta órbita acercará periódicamente a las naves espaciales lo suficiente como para proporcionar un acceso sencillo al Polo Sur de la Luna, a otros sitios de alunizaje de la Luna.

Algunas características claves de la NRHO son:

- Estabilidad: La NRHO se encuentra en un punto de equilibrio entre las fuerzas gravitacionales de la Tierra y la Luna, lo que permite una estabilidad a largo plazo con un mínimo de energía para mantener la órbita.
- Acceso a la superficie lunar: Esta órbita permite un acceso fácil y periódico a la superficie lunar, especialmente al polo sur lunar, que es un área de interés para futuras misiones de exploración.
- Eficiencia de combustible: Debido a su estabilidad, la NRHO requiere menos propulsión para mantener la órbita en comparación con otras órbitas lunares.
- Comunicación: La NRHO proporciona una línea de visión continua con la Tierra, lo que facilita la comunicación ininterrumpida entre la Tierra y la Luna,

La NRHO es ideal para misiones que requieren una presencia sostenida en el espacio cislunar, como la Estación Lunar Gateway, que servirá como un punto de parada para misiones tripuladas a la Luna y más allá.



Órbita NRHO

SISTEMA HLS STARSHIP DE SPACEX.

Starship HLS ofrece una combinación única como un vehículo enorme, reutilizable y diseñado para operar exclusivamente en el espacio, sin necesidad de sobrevivir a reentradas atmosféricas. Su capacidad de transportar más masa y volumen que cualquier alunizador anterior amplía las posibilidades científicas y operativas de cada misión, desde experimentos avanzados hasta equipos pesados para la construcción de bases lunares.

El Starship HLS se basa en la arquitectura general del vehículo Starship, pero adaptado para operar exclusivamente en el espacio en sus funciones lunares por lo cual no necesita un escudo térmico y un frenado aerodinámico como son las naves que ingresan a la Tierra, como es el caso de la Starship. Su estructura cuenta con un volumen interno habitable significativamente mayor que el del Módulo Lunar del Apolo, ofreciendo espacio para sistemas de soporte vital, áreas de descanso, almacenamiento y estaciones de control.

De acuerdo con la configuración propuesta, el HLS mide alrededor de 50 metros de altura, no tiene superficies aerodinámicas, y su tren de aterrizaje es menos robusto producto de la gravedad lunar como la Starship. Además, recibe la energía eléctrica a través de una banda de paneles solares situada alrededor de la circunferencia del vehículo. Los motores Raptor de la HLS Starship serán ubicados en el medio de la nave para evitar problemas de impacto de la pluma de la nave con el suelo lunar.



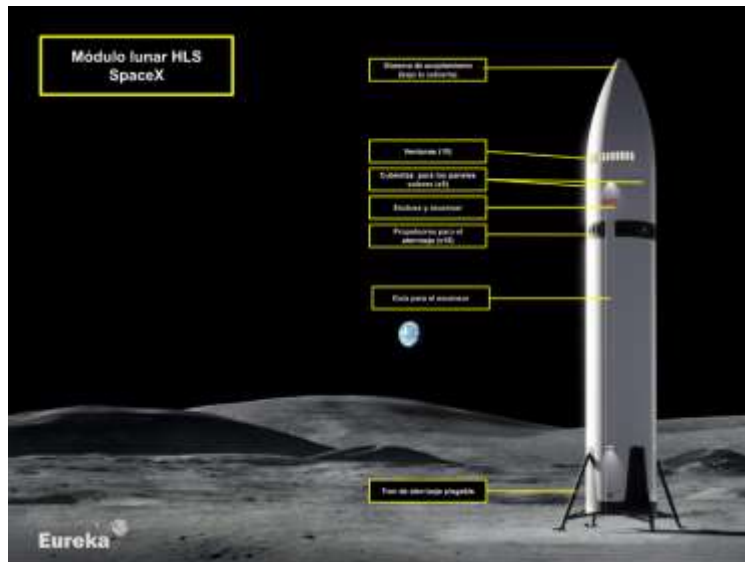
Evolución en el diseño del HLS de SpaceX (SpaceX / Eureka).

Una de las innovaciones más distintivas es el elevador interno, necesario debido a la gran altura del vehículo. Este sistema permitirá descender de forma segura a los astronautas y equipos desde la cabina hasta la superficie lunar. También incorpora un sistema avanzado de acoplamiento que permite conectarlo con la nave Orión o con la futura estación lunar Gateway. Este acoplamiento es esencial, pues la transferencia de tripulación en órbita lunar constituye uno de los puntos más delicados del perfil de misión.

Por otro lado, a diferencia de otros modelos de alunizadores, el HLS emplea motores orientados hacia los costados, llamados landing thrusters, diseñados para minimizar la perturbación del regolito lunar, el polvo extremadamente fino y abrasivo que puede dañar los instrumentos, afectar sensores y representar riesgos para la tripulación. Esta disposición también permite un control más preciso durante las últimas fases del descenso.

La nave HLS Starship tiene las siguientes características:

- 24 propulsores de oxígeno-metano en la parte central del cuerpo para su uso en el aterrizaje en la superficie lunar.
- Capacidad de sobrevolar 100 días en órbita lunar.
- Transporte de material desde la Luna a la órbita y desde la órbita a la Luna.
- Soporte para un mayor número de actividad extravehicular en la superficie lunar que el mínimo requerido por la NASA.
- Se puede aplicar un margen de exceso de combustible para acelerar un ascenso de emergencia desde la Luna.



Partes del HLS en el diseño actual. Fuente: SpaceX/ Eureka.

Reabastecimiento en vuelo.

Uno de los aspectos más revolucionarios y desafiantes del Starship HLS es su dependencia del reabastecimiento en órbita. Para poder llegar a la Luna y regresar a su punto de encuentro en órbita lunar con la nave Orión, y posteriormente con Gateway, el HLS debe cargarse con grandes cantidades de propelente antes de iniciar su trayectoria.

Aunque el principio básico de transferencia de fluidos en microgravedad está bien establecido, esta técnica nunca se ha realizado a la escala requerida para misiones lunares. Su éxito no solo permitiría misiones lunares más eficientes, sino que también abriría la puerta a vuelos interplanetarios basados en repostaje orbital, un paso esencial si la humanidad aspira a llegar a Marte.

No obstante, el proceso requiere perfeccionar maniobras de acoplamiento, regular la temperatura del combustible criogénico y emplear sistemas de bombeo altamente precisos.

Para ello, SpaceX desarrollará naves cisterna de combustible y un depósito en órbita, variantes de la Starship.

Cantidad de lanzamientos para cargar el estanque de combustible.

Para cargar el depósito orbital de combustible con la cantidad de combustible que requiere la nave Starship HLS, se deben realizar 14 lanzamientos (según informe de la Oficina de Rendición de Cuentas del Gobierno (GAO, Government Accountability Office), los que deben ser ejecutados en pocas semanas para evitar que el metano y el oxígeno líquido se evaporen, considerando la complejidad que conlleva el traspaso de toneladas de este combustible. Pero de acuerdo a SpaceX estima que, en realidad, bastará con cuatro transferencias de combustible, es decir, cinco lanzamientos del sistema Starship en total.

El depósito orbital permitirá que la nave HLS Starship solo se tenga que acoplar con un vehículo en vez de con catorce diferentes e introduce más flexibilidad para la NASA de cara a planificar el lanzamiento del cohete SLS y la nave tripulada Orión, que solo estará lista para despegar una vez SpaceX haya terminado sus transferencias de combustible.

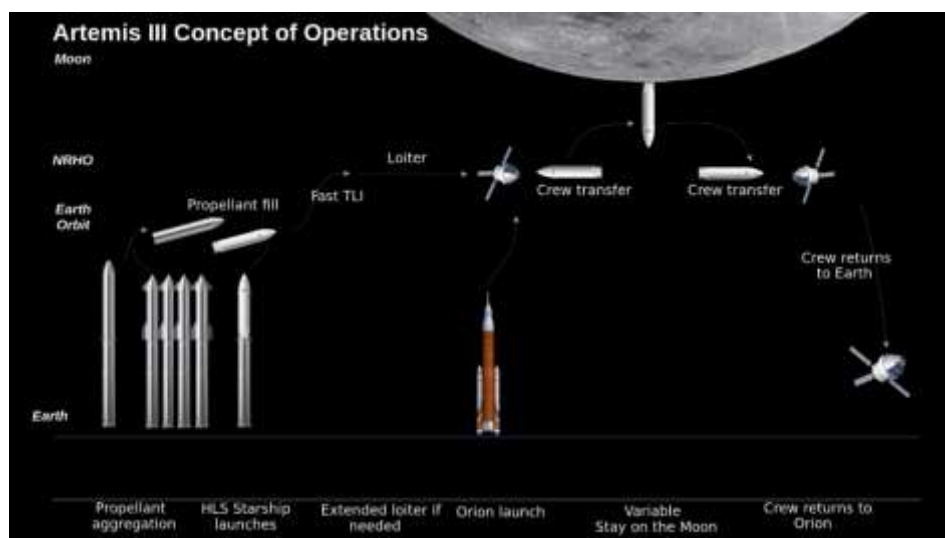


Depósito orbital acoplado a una Starship tanker para trasvase de propelentes. Tras un número indeterminado de acoplamientos en LEO, el depósito se unirá al HLS para trasvasar propelentes y viajar a la Luna (SpaceX).

Vuelo a la Luna con la HLS Starship.

Para realizar el vuelo hacia la Luna de la HSL Starship se deben ejecutar una serie de pasos en forma secuencial:

1. El depósito orbital de combustible se lanzará a la órbita terrestre baja, seguido de varios otros lanzamientos de naves cisternas que llevarán el combustible hacia el depósito que se encontrará orbitando, donde se reunirán, acoplarán y transferirán el combustible hacia el depósito.



Concepto de misión de SpaceX para el Sistema de Aterrizaje Humano (HLS). Fuente: NASA.

2. Una vez que haya suficiente combustible en el depósito orbital, la nave HLS Starship sin tripulación se lanzará a la órbita terrestre baja, luego se reunirá y se acoplará al depósito. El depósito transferirá el combustible a la nave HLS Starship, y a continuación, la nave Starship HLS realizará una rápida transferencia a la órbita NRHO, donde permanecerá por hasta 90 días para confirmar el estado de la nave y esperar el lanzamiento y la llegada de la nave Orión (el plazo de 90 días es para adaptarse a cualquier posible retraso en el lanzamiento de la nave Orión o SLS).
3. Cuando ambas naves espaciales hayan llegado a NRHO, Orión se acoplará a la nave HLS Starship en preparación para expedición a la superficie de la Luna. Una vez que la tripulación y sus suministros estén listos, dos astronautas abordarán la nave HLS Starship y dos permanecerán en la nave Orión. Orión se desacoplará y se alejará de la nave HLS Starship para permanecer en NRHO durante aproximadamente una órbita alrededor de la Luna, con una duración de aproximadamente 6,5 días, lo que coincide con la duración de la expedición de superficie.



Diseño actual del módulo lunar HLS de SpaceX. Aquí aparece el HLS Opción A de Artemisa III acoplado a la nave Orión en órbita lunar de tipo NRHO. Dos de los cuatro astronautas pasarán de la Orión al HLS para pasar cerca de una semana en el polo sur lunar (SpaceX).

4. Una vez que se completen las actividades de la superficie lunar, incluidas las caminatas lunares, la HLS Starship ascenderá de regreso a la órbita NRHO, donde la tripulación se transportará a la nave Orión para su regreso a la Tierra.

BLUE MOON MARK 2 DE BLUE ORIGIN.

Blue Origin, junto con sus socios Lockheed Martin, Draper, Boeing, Astrobotic y Honeybee Robotics (conocidos como el “Equipo Nacional”), desarrollará el módulo de alunizaje HLS Blue Moon, un elemento clave del programa Artemis. Este módulo será responsable del transporte de astronautas entre la Plataforma Orbital Gateway y la superficie lunar.

Al tratarse de un contrato de tipo fijo, Blue Origin y sus empresas asociadas deberán cubrir con sus propios recursos cualquier costo que supere los 3.400 millones de dólares.

Con este contrato, el Equipo Nacional desarrollará y operará un módulo de alunizaje capaz de posarse con precisión en cualquier punto de la superficie lunar, así como un transportador cislunar. Ambos vehículos estarán propulsados por LOX-LH2 (oxígeno líquido e hidrógeno líquido), un propelente que ofrece ventajas para misiones de espacio profundo de alta energía. Sin embargo, previamente se deberá resolver la problemática de la evaporación del LOX-LH2 durante misiones de larga duración.

En este sentido, la empresa avanzará en la conversión del LOX-LH2 de alto rendimiento en un propelente almacenable. Como parte del marco del SLD (Sostenimiento del Desarrollo Lunar), se desarrollarán y volarán enfriadores criogénicos capaces de mantener temperaturas de 20 K (-253 °C), alimentados por energía solar y otras tecnologías necesarias para evitar la evaporación del LOX-LH2.

Las futuras misiones más allá de la Luna, así como tecnologías habilitantes como la propulsión térmica nuclear de alto rendimiento, se beneficiarán enormemente del desarrollo de LH2 almacenable. La arquitectura de Blue Origin también se prepara para un futuro en el que el hielo lunar pueda ser utilizado para fabricar propulsores de LOX y LH2 directamente en la Luna.

Al igual que en el caso de SpaceX, Blue Moon deberá realizar un vuelo de prueba no tripulado en 2027 antes de su uso por astronautas.



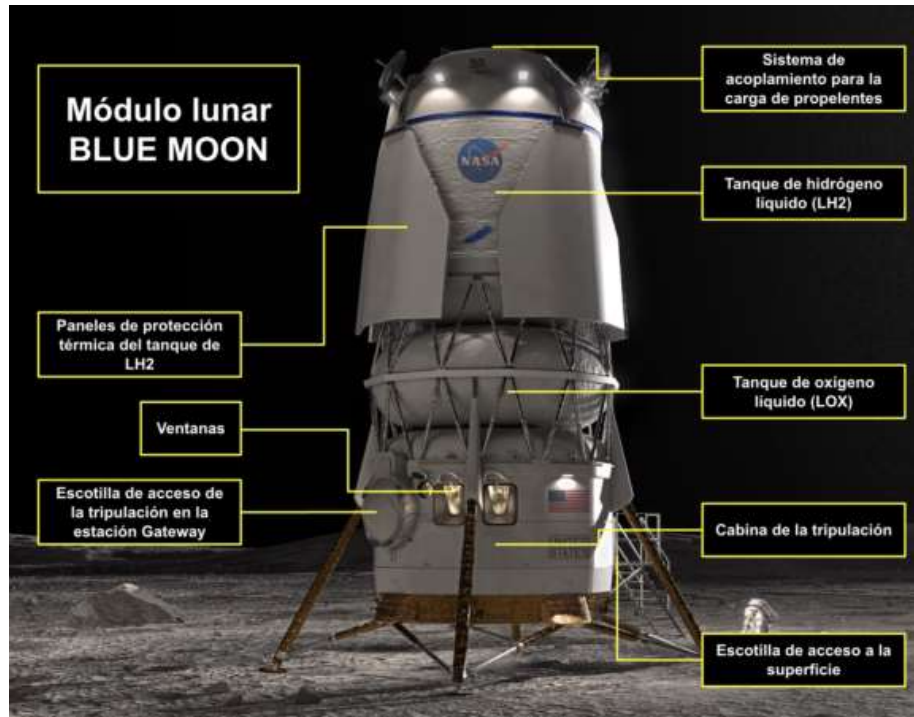
Una representación del módulo de aterrizaje Blue Moon de Blue Origin que devolverá a los astronautas a la Luna como parte del programa Artemis de la NASA.

Blue Moon Mark 2.

Blue Moon será una nave de 45 toneladas de 16 metros de alto, que usará hidrógeno y oxígeno líquidos por primera vez en una misión lunar. La capacidad de carga es hasta de 20 toneladas en el modo reutilizable y de hasta 30 toneladas en una misión de un solo uso, puede llevar hasta cuatro astronautas, con una duración de hasta 30 días en la superficie de la Luna. Utiliza motores BE-7 que funcionan con hidrógeno líquido y oxígeno líquido.

El contenido de esta publicación es de responsabilidad de sus autores y no necesariamente representa el pensamiento de la FACH

La cabina de la tripulación está en la parte inferior del módulo, bajo los tanques de oxígeno e hidrógeno líquidos. Así la tripulación podrá acceder fácilmente a la superficie.



Partes del Blue Moon Mark 2 tripulado. Fuente: Blue Origi/Eureka.

Vuelo a la Luna con Blue Moon Mark 2.

Para llegar a la estación Gateway, Blue Moon empleará el cohete New Glenn de Blue Origin, dotado de una cofia de siete metros de diámetro. De este modo, Blue Moon pasa a ser la carga principal del New Glenn.

El sistema requerirá de varios lanzamientos del New Glenn para cada misión, pero aún no se conoce actualmente cuantos se necesitarán. Estos lanzamientos son necesarios para colocar a Blue Moon Mark 2 en una órbita NRHO alrededor de la Luna y para llevar propelentes a bordo de un carguero que se acoplará con el módulo lunar Blue Moon Mark 2 en esta órbita antes de descender a la superficie lunar.

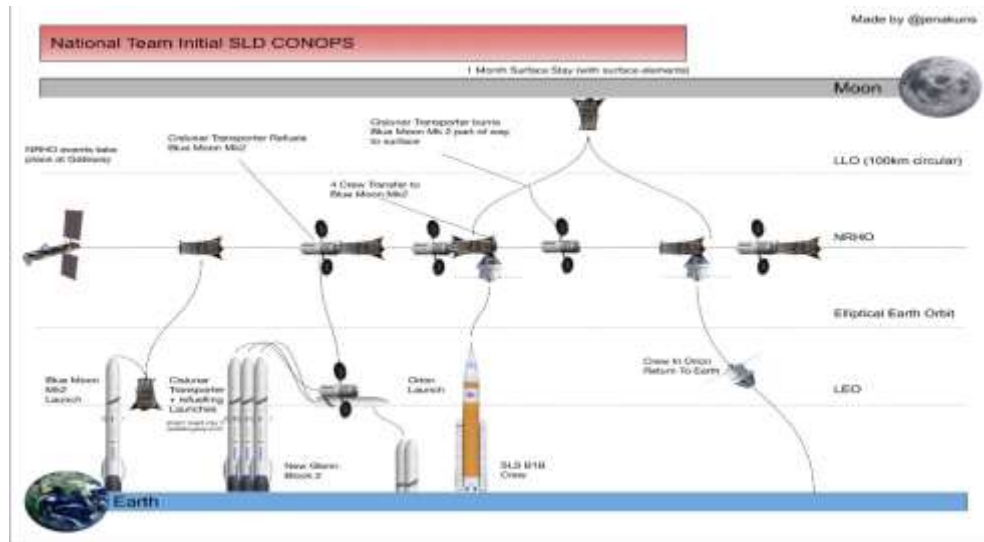
Además de este carguero, no está claro si Blue Moon podrá alcanzar la Luna en un único lanzamiento del New Glenn o si necesitará varios acoplamientos en LEO (Órbita baja) antes de partir hacia la Luna.

Algunas estimaciones establecen que podrían ser cuatro lanzamientos del New Glenn para cada misión no reutilizable del Blue Moon (uno para lanzar el Blue Moon a la órbita NRHO y otros tres para lanzar el carguero a LEO y misiones de carga de propelentes antes de que parta hacia NRHO para aprovisionar al Blue Moon).

Como en el caso de Artemisa IV, los cuatro astronautas de la misión Artemisa V viajarán a bordo de una nave Orión hasta la estación Gateway en órbita lunar y allí pasarán al módulo lunar Blue Moon,

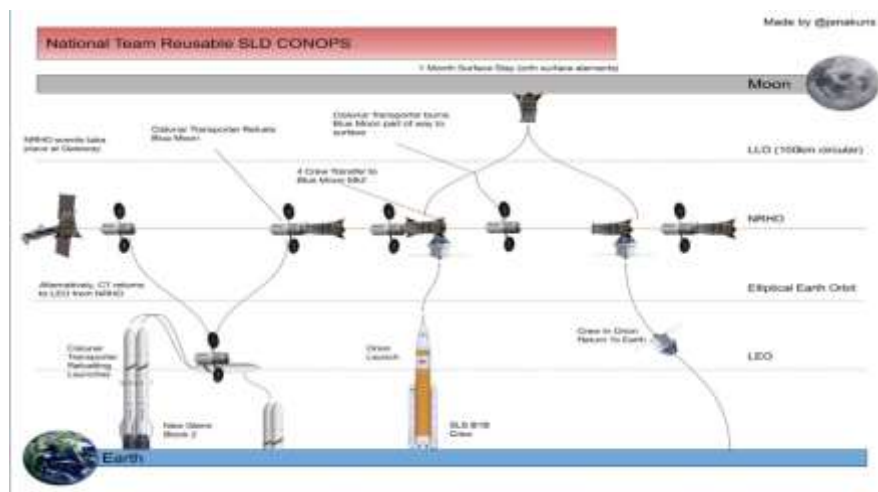
que se habrá acoplado previamente (en el caso de Artemisa III, la nave Orión se acoplará directamente con el módulo lunar), con el que descenderán al polo sur de la Luna.

Los cuatro astronautas pasarán al menos una semana en la superficie de nuestro satélite antes de regresar a la estación Gateway para abordar la Orión y volver a la Tierra.



Concepto de operaciones del Blue Moon no reutilizable, con cuatro lanzamientos del New Glenn (Barry Jenakuns / <https://twitter.com/jenakuns>).

En modo reutilizable serían necesarios solo dos lanzamientos del New Glenn para el carguero y una misión de recarga en LEO. Pero esto son solo estimaciones y podrían ser incluso más.



Concepto de operación del Blue Moon reutilizable, con solo dos lanzamientos (Barry Jenakuns / <https://twitter.com/jenakuns>).

DESAFÍOS Y DESARROLLOS.

El regreso de la humanidad a la Luna, impulsado por el programa Artemisa de la NASA, ha generado una competencia tecnológica sin precedentes entre empresas privadas de exploración espacial, principalmente SpaceX y Blue Origin. Ambos actores desarrollan sistemas de alunizaje humano (HLS, por sus siglas en inglés) que prometen revolucionar la presencia humana fuera de la Tierra, pero enfrentan desafíos críticos tanto técnicos como estratégicos.

Uno de los problemas más urgentes en esta carrera es la gestión del hidrógeno líquido, combustible clave en ambos sistemas. El hidrógeno tiene un punto de ebullición extremadamente bajo, cercano a los -253°C , lo que implica que su almacenamiento seguro es sumamente complicado. En el espacio, con variaciones térmicas significativas, el hidrógeno líquido puede evaporarse en apenas un día, lo que limita el tiempo de operación de las naves. Para Blue Origin, que planea mantener su módulo de aterrizaje Blue Moon en la Luna durante alrededor de una semana, la evaporación del combustible representa un desafío crítico que debe solucionarse para evitar dejar a los astronautas varados sin posibilidades de regresar.

El HLS Starship de SpaceX, por su parte, introduce otra complejidad: el reabastecimiento orbital. Este proceso requiere múltiples lanzamientos, acoplamientos repetidos y transferencias de combustible en tiempo real. Cada paso es un posible punto de falla que podría retrasar la misión. Además, la nave debe garantizar un alunizaje seguro en la superficie lunar, lidiando con el efecto del polvo lunar en sensores y motores, así como mantener sistemas de soporte vital y protección contra radiación durante estancias prolongadas, a diferencia del histórico Módulo Lunar del Apolo, diseñado para misiones breves.

La madurez tecnológica es otro factor diferenciador. Starship se desarrolla mediante un enfoque iterativo de prototipos y pruebas de vuelo que incluyen explosiones, fallas y rediseños. Aunque esta estrategia permite una mejora rápida, introduce incertidumbre frente a los plazos estrictos de Artemisa. En contraste, Blue Moon depende del cohete New Glenn, que se encuentra en desarrollo y su primer vuelo se realizó en enero de 2025, lo que añade un nivel adicional de riesgo técnico y logístico.

Los desafíos de Blue Moon incluyen la precisión en el aterrizaje lunar, la gestión de combustibles criogénicos en la superficie y la coordinación con estaciones en órbita para reabastecimiento. Superarlos representaría un hito en exploración lunar, demostrando que la cooperación público-privada puede abrir el camino hacia una presencia humana sostenible en el espacio.

CONCLUSIÓN.

Más allá de los aspectos tecnológicos, existe un componente estratégico que influye en la dinámica del programa. SpaceX domina actualmente la industria de lanzamiento orbital estadounidense, con un 79 % de la masa enviada al espacio en el segundo semestre de 2023. Esta ventaja otorga a Estados Unidos un liderazgo temporal en exploración espacial, pero también genera dependencia de un solo proveedor. En este contexto, la entrada de Blue Origin en el programa HLS permite a la NASA fomentar la competencia y diversificar riesgos, asegurando alternativas frente al dominio de SpaceX.



Tanto Starship HLS como Blue Moon enfrentan retos tecnológicos y logísticos enormes. La gestión del hidrógeno líquido, la complejidad de los sistemas de reabastecimiento y la necesidad de garantizar seguridad y soporte vital prolongado son desafíos compartidos, mientras que la estrategia y madurez tecnológica difieren significativamente. SpaceX posee la ventaja de experiencia y capacidad de iteración rápida, mientras que Blue Origin representa una alternativa competitiva crucial para la NASA. Resolver estos desafíos será determinante para la consolidación de la exploración lunar humana y la sostenibilidad de las misiones futuras.

AAW Información obtenidas de fuentes abiertas

<https://danielmarin.naukas.com/2023/05/19/el-modulo-lunar-de-blue-origin-llevara-astronautas-a-la-luna-en-la-mision-artemisa-v/>

Human Landing Systems - NASA

GAO-24-106256, NASA ARTEMIS PROGRAMS: Crewed Moon Landing Faces Multiple Challenges

Una órbita lunar perfecta para la puerta de entrada internacional - NASA

Artemis III: NASA's First Human Mission to the Lunar South Pole - NASA

El módulo lunar de SpaceX y el enfrentamiento con Blue Origin - Eureka (naukas.com)

SpaceX - Updates