



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

**Robotics exploration of Mars: landing and
construction/deployment of initial ground
habitats**

Jesús Caballero Herranz

Tutor: Michele Armano, PhD

Diciembre 2023

Índice

1. Introduction	2
2. Lugar de amortizaje y asentamiento	3
2.1. Experiencia previa en Marte. Exploración y misiones con robots	3
2.1.1. Primeras misiones en las décadas de 1960 y 1970	3
2.1.2. Programa Viking y Mars Pathfinder	4
2.1.3. Misiones marcianas del siglo XXI	4
2.2. Entrada y amortizaje	6
2.2.1. Métodos usados hasta ahora	6
2.2.2. Tipos de entrada	8
2.2.3. Ecuaciones principales	10
2.2.4. Análisis de los métodos de entrada atmosférica	11
2.2.5. Contacto con el suelo	12
2.3. Elección del emplazamiento de la misión	12
3. Creación de un hábitat en Marte	13
3.1. Diferentes opciones	13
3.1.1. Cuevas	13
3.1.2. Tubos de lava	15
3.1.3. Mars Ice Home	16
3.1.4. Estructura protectora exterior + Módulos inflables	20
3.2. Estructura protectora exterior + Módulos inflables	20
3.2.1. Estructura protectora exterior inicial	20
3.2.2. Módulos inflables	29
3.2.3. Sistemas auxiliares	33
4. Creación y análisis de la estructura protectora exterior	42
5. Estudio de factibilidad, posibles problemas y siguientes pasos	48
5.1. Factibilidad tecnológica	48
5.2. Factibilidad económica	48
5.3. Problemas a encontrar, siguientes pasos y mirada a futuro	49
6. Referencias	51

1. Introduction

El instinto de exploración y conquista de nuevos territorios es algo que ha acompañado a los seres humanos desde el inicio de los tiempos y que a lo largo de los años ha seguido estando presente. Desde las conquistas de nuevos pueblos o países adyacentes a otros continentes y la exploración de nuestro planeta Tierra. Pero esa ansia por el descubrimiento y la exploración nos ha llevado a nuevos horizontes fuera de nuestro propio planeta, hasta la Luna, donde ya ha estado el ser humano, y otros planetas y cuerpos celestes en nuestro sistema solar a través de sondas y rovers. El siguiente paso es, y no está muy lejano en el tiempo, poner pie en otro planeta y no hay mejor opción para ello que Marte. La llegada de personas a Marte se viene preparando desde hace ya muchos años, aunque fuese indirectamente, con la llegada de las primeras sondas y robots para explorar el planeta vecino. Y con esa llegada de personas, ya sea para establecer una colonia o realizar experimentos científicos (o ambas), deberá ir acompañada de la creación de un hábitat y lugares de trabajo para poder albergar a dichas personas y proteger y facilitar la obtención de recursos tanto para estudio como para el uso humano en el día a día. El uso y aprovechamiento de los recursos locales será en esta misión y futuras de extrema importancia, ya que el coste en dinero, combustible y tiempo además de las limitaciones de peso son factores muy a tener en cuenta. Por lo tanto, la exploración previa con robots y sondas para saber de qué materiales se dispondrá y la investigación en la Tierra de cómo usar estos para su mayor beneficio hará que las probabilidades de éxito y viabilidad tanto económica como científica crezcan exponencialmente.

Esa necesidad humana de conquista y exploración de lo desconocido llega ahora a otros planetas como Marte motivada tanto por esa curiosidad innata del ser humano, como por factores de necesidad. Cada vez es más patente que nuestro tiempo en la Tierra como especie no es infinito, y que si seguimos con el ritmo actual de aumento de población y de uso de recursos naturales, nuestros días en la Tierra tienen fin y desgraciadamente, este fin no está tan lejano en el tiempo y dicha fecha se va acercando inexorablemente. La mejor opción tanto a corto como a medio e incluso largo plazo pasa por encontrar formas de aprovechar los recursos naturales terrestres sin agotarlos y destruir el planeta, pero son muchos los que ya abogan por la búsqueda de nuevos mundos que puedan ser habitables en el caso de que nuestros esfuerzos no sean suficientes y la Tierra se nos quede inservible o pequeña.

Es evidente que el traslado de población desde la Tierra a cualquier otro lugar es enormemente costoso y complicado, además de que tiene que venir con un estudio meticuloso del lugar de destino y unas mínimas condiciones de seguridad y habitabilidad previas a la llegada. Es por eso que las numerosas misiones que se han llevado a cabo durante años para el estudio de Marte brindan un gran punto de inicio del estudio de este planeta para una posible misión tripulada y de habitabilidad.

La tesis esta estructurada en varios capítulos: en primer lugar, en el capítulo 2, analizaremos los posibles lugares de amartizaje y seleccionaremos la mejor opción para la misión propuesta. Este capítulo está dividido a su vez en una parte a modo de historial, una parte más técnica que valora el problema de la entrada en una atmósfera gaseosa y la elección de los mejores landing sites en concreto. El capítulo 3 se enfrenta al problema de la creación de un hábitat. De alguna forma este capítulo se puede leer de forma independiente del segundo capítulo, y en eso tomamos un corte más ingenieril analizando las diferentes opciones de habitat y su inspiración técnica, concentrándonos en los casos existentes de estructura de protección externa. El núcleo técnico de la tesis revuelve alrededor de este último tema y a eso dedicamos el capítulo 4, donde el lector puede encontrar un estudio preliminar de una estructura protectora exterior, optimizada numéricamente a partir de consideraciones de presión y frecuencia de micrometeoritos. Acabamos nuestro análisis con el capítulo 5, en el cual estudiamos la factibilidad de nuestro estudio con consideraciones de carácter tecnológico y económico.

2. Lugar de amartizaje y asentamiento

Uno de los puntos críticos a tener en cuenta en una misión tripulada a Marte tanto para estudio del planeta como para habitabilidad de este es el lugar elegido. Más que los posibles hallazgos y descubrimientos, valen las vidas humanas y el futuro de la misión, por lo tanto la seguridad de esta y de los tripulantes será siempre el primer y máximo requisito.

El lugar de amartizaje y posterior localización del asentamiento humano tienen que ser meticulosamente elegidos en base a diversos parámetros. Primeramente debe ser un lugar en el que las condiciones de seguridad para el amartizaje se maximicen, es decir, un lugar al que sea factible llegar y del que salir en cualquier momento. Conectado con esto, también debe ser un lugar en el que la vida sea lo más segura posible. De este modo, lugares en los que las tormentas marcianas sean poco o nada frecuentes deben ser prioridad.

Otro punto de grandísima importancia al elegir el sitio para el asentamiento es el cómo hacer el asentamiento en sí. Como se verá más adelante, el proyecto que se estudiará en este trabajo es la realización de una estructura protectora utilizando los recursos locales, en este caso el material del suelo marciano. Por lo tanto la composición del suelo es clave a la hora de elegir el posible lugar de amartizaje y asentamiento.

Pero no hay que olvidar tampoco el objetivo de estudio científico, por lo tanto la elección de una zona rica en posibles hallazgos interesantes, tanto del pasado como del posible futuro del planeta, también es de tener en cuenta.

Teniendo en cuenta estos y otros factores, la elección de una zona ya conocida pero con potencial de estudio es la que ofrece mayor retorno. Así que haciendo un pequeño estudio de las misiones marcianas hasta la fecha podremos encontrar el sitio idóneo para realizar nuestra misión.

2.1. Experiencia previa en Marte. Exploración y misiones con robots

Primero vemos una breve historia de las misiones realizadas a Marte (hasta ahora ninguna de ellas tripulada) para discernir el mejor lugar posible para el amartizaje.

2.1.1. Primeras misiones en las décadas de 1960 y 1970

Desde la década de 1960 se llevan haciendo misiones de exploración a Marte para conocer más de nuestro planeta vecino. Estas misiones son de especial importancia para la misión que tenemos entre manos, pues dan información veraz y de primera mano de los sitios más propicios para el amartizaje y de lo que se puede encontrar en Marte una vez los astronautas lleguen allí. Las primeras misiones fueron llevadas a cabo por la Unión Soviética, en ellas, lanzaron una serie de sondas para explorar el Planeta Rojo desde una órbita alrededor de este y tomarían fotos, información sobre radiación cósmica y en el ambiente, información sobre la atmósfera y campo magnético, etc. De todas las sondas que se lanzaron como parte de este programa solo una consiguió establecer y mantener una comunicación estable con la Tierra pero no logró su objetivo de recabar información de Marte y transmitirla de vuelta a la Tierra.

En este mismo período, el programa Mariner del Jet Propulsion Laboratory si logró hacer las primeras fotos cercanas al planeta, mostrando una superficie con impactos similares a los de la Luna. En 1969, tanto sondas de la NASA (Mariner 9) como sondas soviéticas (Mars 2 y Mars 3) entraron en la órbita marciana encontrando, como ya se ha dicho antes, grandes tormentas de polvo.

A finales de los 60 y principios de los 70 se siguieron enviando sondas para recolectar más información, cada vez en órbitas más cercanas y adentrándose en la atmósfera marciana. El primer vehículo de exploración fabricado por el ser humano en posarse sobre la superficie de Marte fue un rover controlado a distancia por la Mars 3 (misión de la Unión Soviética), pero poco después de enviar las primeras imágenes desde la superficie se perdió el contacto.

2.1.2. Programa Viking y Mars Pathfinder

El Programa Viking de la NASA, que consistió en dos misiones conocidas como Viking 1 y Viking 2 consiguió poner dos vehículos en la superficie de Marte en 1976. Consistían cada una, en una sonda orbital diseñada para fotografiar la superficie desde la órbita y una sonda de aterrizaje (lander). Estas dos misiones fueron un completo éxito y han proporcionado mucha información acerca del planeta, entre ellas imágenes, experimentos biológicos, información de la atmósfera, de las propiedades y composición del suelo. Estos dos landers amartizaron en las Planicies de Chryse y Utopía. La primera de ellas muestra evidencias de erosión acuática en el pasado y es el fondo de muchos canales, llevando a algunas teorías sobre si la cuenca de Chryse fue un antiguo gran lago o mar.

Otras misiones exitosas que se han llevado a cabo para conocer más de Marte fueron la Mars Pathfinder, que llevaba el rover autopropulsado Sojourner que realizó nuevamente experimentos para analizar la atmósfera, climatología, geología y composición del suelo marciano. El lugar en el que Sojourner amartizó era una antigua llanura aluvial conocida como Ares Vallis. Este lugar está al final de uno de los canales de salida que finalizan en la planicie Chryse, donde se encuentra el Viking 1. Este lugar fue elegido por su potencialidad de gran variedad de rocas, ya que como se ha dicho es la desembocadura de un gran canal de evacuación y dichas rocas podrían haber sido arrastradas desde tierras más altas en el pasado. Aquí es donde las misiones pasadas tuvieron un gran impacto pues este sitio para llevar a cabo la misión se eligió gracias a los datos que habían sido obtenidos por las Viking.

2.1.3. Misiones marcianas del siglo XXI

Ya en el siglo XXI, la misión de la NASA Mars Odyssey llega a su órbita marciana y descubre la existencia de hielo. Esto desata las teorías de la existencia de agua en Marte y provoca un nuevo resurgir en cuanto a la exploración de Marte, sobre todo desde un punto de vista de la búsqueda de agua y condiciones que puedan probar la existencia de vida (actualmente o en el pasado) en Marte. Este descubrimiento se juntó además con el de pequeñas cantidades de metano en la atmósfera marciana como ya se dijo anteriormente, lo que multiplicó aún más estas teorías.

En 2003, la ESA lanza la primera misión interplanetaria europea con el Mars Express, que consistió en dos partes, el Mars Express Orbiter y el Beagle 2, que era un lander previsto para investigar en temas de exobiología y geoquímica en la superficie marciana pero que desafortunadamente falló al intentar amartizar. Sin embargo, el orbitador sí que ha estado realizando investigaciones muy satisfactorias desde entonces y ha permitido conocer con mucho más detalle información por ejemplo de la atmósfera marciana.

A la par, Estados Unidos y la NASA envían dentro de la misión Mars Exploration Rover, al Spirit y al Opportunity que realizan investigaciones que apoyan las teorías de que en el pasado hubo un ambiente habitable.

Más recientemente, en 2011, se lanzó la misión Mars Science Laboratory, también conocida como Curiosity. Esta estaba orientada a, como se ha dicho anteriormente, investigar la capacidad de Marte para alojar vida y contaba con equipos mucho más avanzados tecnológicamente. A pesar de

que la duración prevista inicialmente para esta misión era de un año marciano, aún esta operativa. De los sitios estudiados para llevar a cabo esta misión, finalmente se eligió el Cráter Gale, que se cree pudo haber sido un antiguo lago que pudo albergar vida.

Y en 2021, llegó a la superficie marciana el rover Perseverance, con un diseño muy parecido al Curiosity, con algunos rediseños y mejoras con respecto a este gracias a los datos recogidos. El objetivo, otra vez, es la búsqueda de habitabilidad en Marte, búsqueda de bioformas, almacenamiento de muestras y finalmente, allanar el camino para una futura llegada de humanos al Planeta Rojo, probando la generación de oxígeno en la superficie marciana a partir del CO_2 . Este rover amartizó en el cráter de Jezero, cerca de la desembocadura del canal Neretva Vallis y gracias al helicóptero explorador Ingenuity, que también forma parte de esta misión y estaba integrado en el rover, podrá ayudar a elegir los sitios más interesantes a explorar.

Todas estas misiones han permitido crearnos una imagen clara de la geografía de Marte y saber la distribución de las características físicas alrededor de Marte y sus representaciones cartográficas, poder observar los fenómenos que ocurren tanto en la superficie como en la atmósfera del planeta y hasta poder hacer un mapa topográfico de Marte.

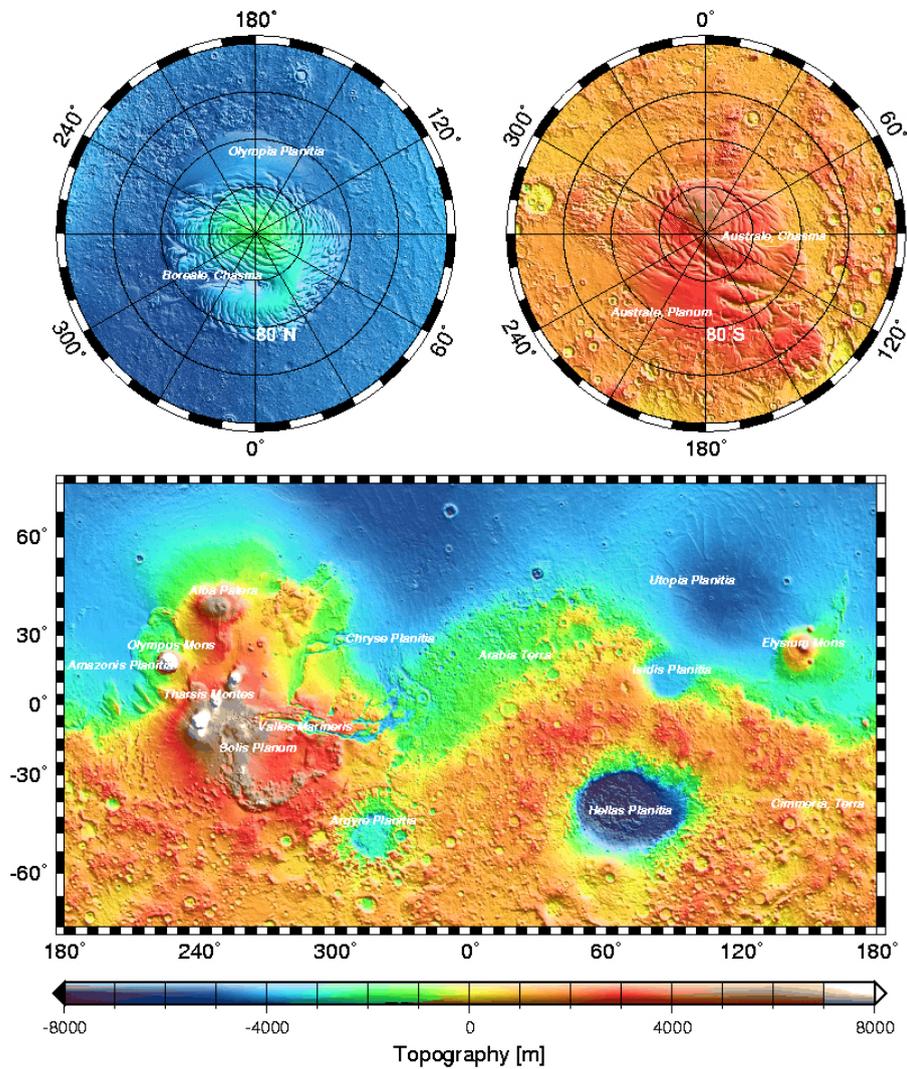


Figura 1: Mapa topográfico de Marte [1]

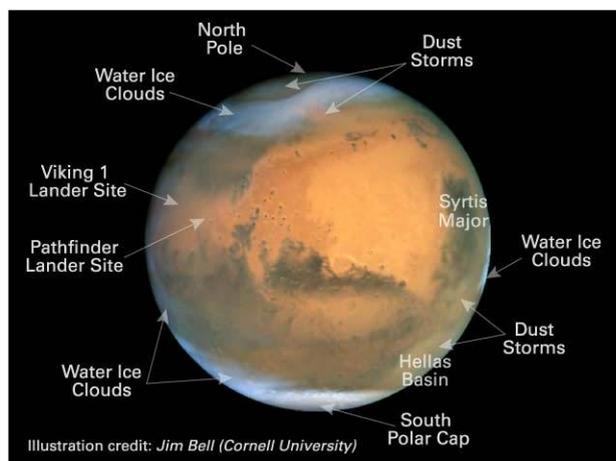


Figura 2: Imagen de Marte y características marcianas identificadas [2]

2.2. Entrada y amortizaje

2.2.1. Métodos usados hasta ahora

Para poder elegir el método de reentrada en Marte más eficaz para nuestra misión, se deben conocer los usados hasta ahora y si podrían ser usados en una misión tripulada. [3]

Al llegar a Marte, se debe entrar en órbita, para luego poder hacer la reentrada y para ello hay dos opciones disponibles: usar sistemas propulsivos para decelerar la nave o usar la aerocaptura. La técnica de aerocaptura usa la fuerza de resistencia aerodinámica de la atmósfera de un planeta o luna para posicionarse en la órbita deseada usando nada o casi nada de combustible. Esto permitiría aumentar la carga de pago para misiones significativamente. Aunque hay estudios realizados en los que se demuestra que este método es viable y efectivo [4], aún no se han probado en una misión planetaria y siendo fieles al hecho de poner la seguridad de las vidas humanas y la misión por delante, este método deberá esperar a ser probado con éxito.

Una vez en la órbita, los métodos usados por los diferentes landers son distintos, no solo por las diferencias de tamaño y peso, también por las tecnologías disponibles.

Las Viking utilizaron un sistema que involucraba un aeroescudo que les sacaba de la órbita, luego desplegaban unos paracaídas de 16 metros de diámetro y usaban unos retropropulsores en el propio lander para aminorar la velocidad de bajada y amortizar a una velocidad tolerable para las patas.

La Mars Pathfinder usó un sistema que involucraba una cápsula de entrada, después un paracaídas supersónico, retropropulsores sólidos para desacelerar y un conjunto de airbags que protegían del impacto con la superficie. Una vez que el vehículo dejó de rodar, los airbags se desinflaron y el lander se posicionó correctamente.



Figura 3: Sistema de airbags utilizados por el Mars Pathfinder [5]

La mejor experiencia de la que disponemos para basarnos en nuestra misión son las maniobras utilizadas por el Mars Science Laboratory (Curiosity) y el Perseverance. Estas suponían un gran cambio con las misiones previas por su gran masa, unos 900 kg en el caso del Curiosity y más de 1000 kg en el del Perseverance. Una atmósfera como la marciana es demasiado ligera para que el uso en solitario de paracaídas y aerofrenado sea eficiente teniendo en cuenta estas masas pero es lo demasiado densa como para crear inestabilidades al decelerar con retropropulsores. También su elevado peso hacía imposible el uso de un sistema de airbags como el usado con el Pathfinder.

El sistema utilizado por el MSL (y que posteriormente fue mejorado para el Perseverance gracias a los datos obtenidos durante el amartizaje del Curiosity) difiere de sus predecesores en que el vehículo actúa durante la fase de amartizaje de manera autónoma. No requiere de ningún tipo de plan de misión interactivo generado desde tierra. Consistió en una fase de entrada guiada, seguida por un descenso con paracaídas, luego un descenso propulsado y finalmente un sistema denominado “sky crane” para la última fase. En este caso, un sistema de contacto con la superficie con patas quedó descartado por problemas de diseño y tuvieron que buscar esta alternativa. Toda esta maniobra les permitió utilizar una elipse de aterrizaje mucho más pequeña que en ocasiones anteriores y resultando en un proceso de amartizaje mucho más preciso.

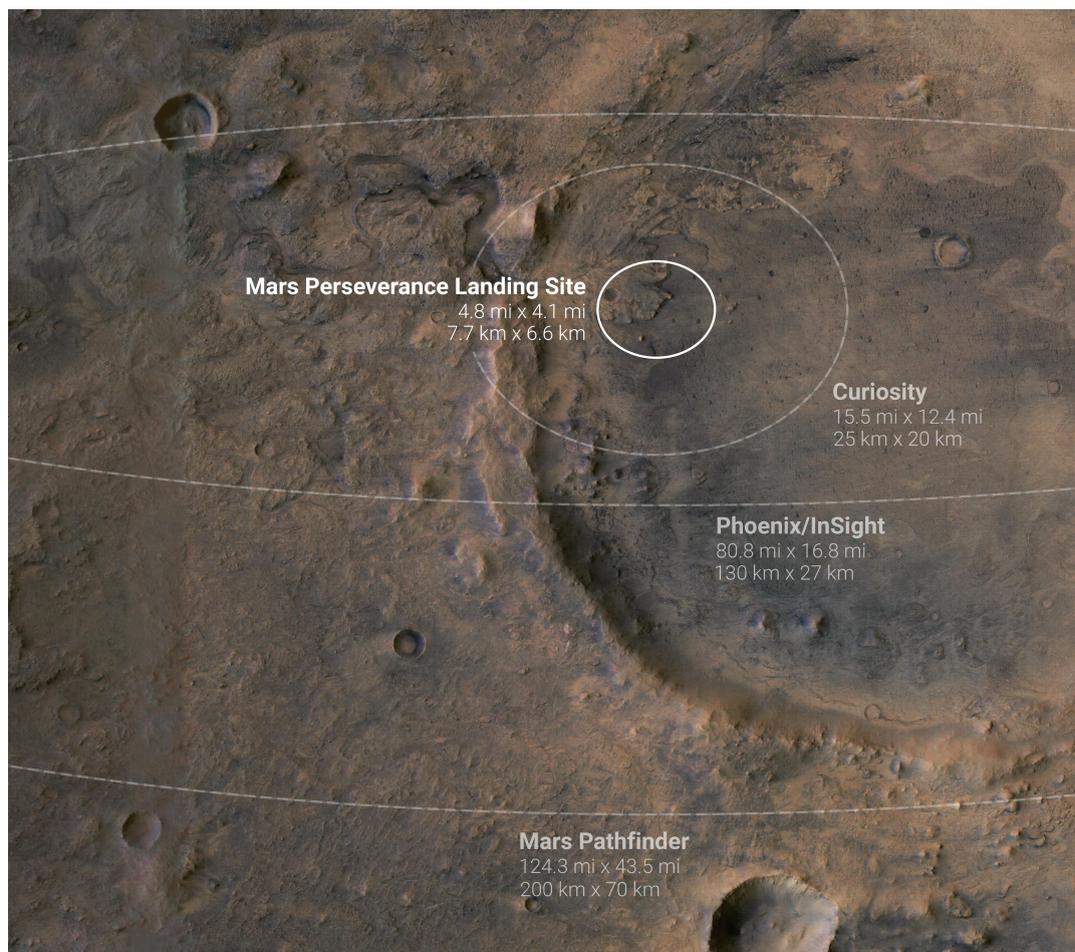


Figura 4: Elipses de las sondas amortizadas en la superficie marciana [6]

2.2.2. Tipos de entrada

El problema de la reentrada atmosférica (o en este caso entrada) es un problema complejo dominado por muchos factores, algunos de los cuales hemos visto anteriormente, como la composición de la atmósfera, el lugar escogido para realizar el aterrizaje y también el tipo de entrada a realizar. A grandes rasgos se pueden distinguir cuatro grandes tipos de entrada atmosférica dependiendo de las velocidades y ángulos que entran en juego y los sistemas utilizados para controlar la dinámica del vehículo durante toda la fase. Las misiones vistas con anterioridad se aproximan al momento de la entrada en la atmósfera marciana y al amortizaje con ya gran experiencia por las misiones precedentes (tanto en Marte como en la Luna o la Tierra), gran capacidad de cálculo computacional que permite elegir la trayectoria óptima tanto para los equipos a bordo como desde el punto de vista del coste y mezclando varios de estos tipos de entrada.

Las cuatro grandes maniobras para la entrada atmosférica que podemos distinguir son:

- Reentrada balística (Steep ballistic reentry)
- Reentrada balística orbital (Ballistic orbital reentry)
- Skip reentry
- Aerofrenado (Aerobraking)

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas e inconvenientes y para decidir cuál de estos usar no solo habrá que tener en cuenta los aspectos antes descritos sino también las fuerzas y temperaturas ejercidas en los equipos y tripulación abordo del vehículo.

La trayectoria típica de entrada atmosférica se puede dividir en varias fases y puede apreciarse en la siguiente imagen:

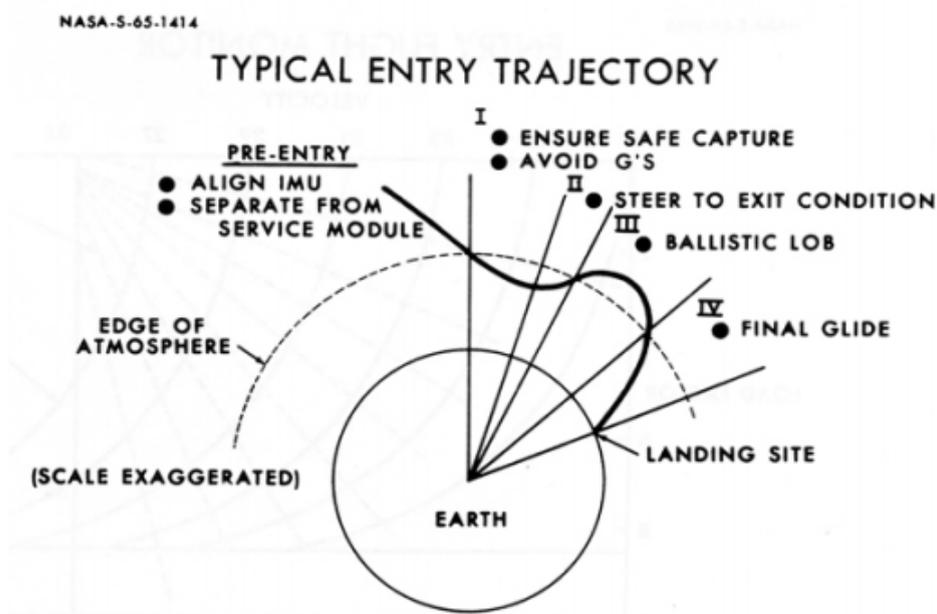


Figura 5: Trayectoria típica para entrada atmosférica [7][8]

También es imprescindible para realizar una maniobra de entrada atmosférica satisfactoria definir el corredor de entrada. Esto es, el ángulo de incidencia necesario para acceder a la atmósfera, en este caso marciana, y realizar el amortizaje sin riesgo para la seguridad de la nave y la tripulación.

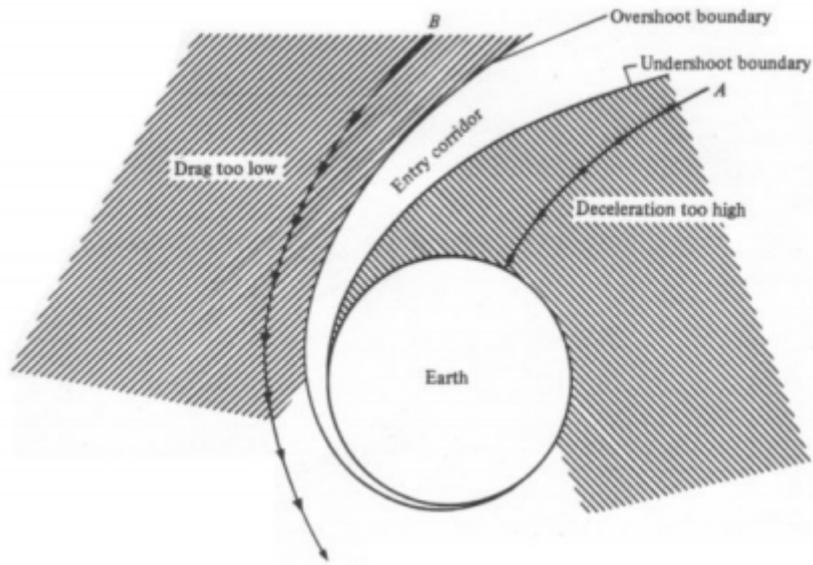


Figura 6: Corredor de entrada para aterrizaje [8]

Como se puede ver en la Figura 6, si el ángulo de entrada es mayor que el necesario, la nave no decelerará lo suficiente y no podrá aterrizar. Por el contrario, si es demasiado pequeño, la desaceleración sufrida será mayor de la requerida y el aterrizaje se producirá en un punto no deseado o se podrá sufrir incluso un accidente fatal chocando contra la superficie del planeta en cuestión.

2.2.3. Ecuaciones principales

Las ecuaciones principales que dominan el problema en cuestión son:

$$a_{\parallel} = \dot{v} = -g_{\text{eff}} \sin \gamma - \frac{F_{\text{drag}}}{m} \quad (1)$$

$$a_{\perp} = v\dot{\gamma} = -g_{\text{eff}} \cos \gamma + \frac{F_{\text{lift}}}{m} \quad (2)$$

$$g_{\text{eff}} = g - \frac{\dot{x}^2}{R_{\text{Marte}} + z} \quad (3)$$

$$\dot{x} = v \cos \gamma \quad (4)$$

$$\dot{z} = v \sin \gamma \quad (5)$$

Y los diferentes métodos antes vistos difieren en las suposiciones y aproximaciones que hacen para resolver estas ecuaciones.

Como se ha dicho, el proceso de entrada atmosférica es complejo y su estudio y determinación de la trayectoria óptima puede ser muy complicado. Pero se puede realizar un análisis cualitativo

y a grandes rasgos de los cuatro grandes métodos previamente introducidos y así poder sacar conclusiones de cuál podría ser la opción más óptima desde este punto de vista.

2.2.4. Análisis de los métodos de entrada atmosférica

Desde la perspectiva de la misión que se busca en este trabajo, que es la de un viaje tripulado a Marte, hay algunos de estos métodos que se pueden descartar. En cuanto a la reentrada balística (steep ballistic reentry) es demasiado violenta y genera demasiada temperatura como para ser usada en una misión tripulada y con una nave como la usada en este proyecto. La entrada balística puede ser empleada por misiles balísticos, cuyo objetivo es reentrar rápidamente en la atmósfera y llegar a su destino con gran velocidad y un ángulo elevado de aproximación o en misiones no tripuladas, aunque el coste en sistemas de escudo térmico puede ser muy elevado en este caso, pero para misiones tripuladas queda totalmente descartado.

La técnica de aerofrenado también puede ser descartada como se dijo anteriormente ya que todavía no ha sido probada con suficiencia en misiones tripuladas y se pretende primar la seguridad tanto de la nave como de las vidas de la tripulación, pero es algo en lo que puede valer la pena investigar en un futuro.

De las dos restantes, la escogida en este caso es la de Skip Reentry, como también se escogió en las misiones Apollo [7]. El método de reentrada balística orbital (Orbital Ballistic Reentry) ofrece unos grandes resultados como el hecho de que es independiente del coeficiente de resistencia aerodinámica (c_{drag}) y que el factor de deceleración es el mismo para todos los vehículos a la misma velocidad. Sin embargo, el valor de deceleración máxima $\dot{v}_{max} = 8,3g$ está muy próximo al límite que puede ser soportado por un cuerpo humano e impone unos requerimientos estructurales muy grandes en las cápsulas de reentrada. Este \dot{v}_{max} puede ser disminuido introduciendo un factor de sustentación pero eso haría que el tiempo que dura la maniobra de reentrada se viera incrementado.

El método de Skip Reentry es una clase de trayectoria de reentrada que utiliza la sustentación aerodinámica en capas altas de la atmósfera. Aumenta el rango sobre las trayectorias puramente balísticas reduciendo así la carga térmica ejercida en el vehículo y también las fuerzas ejercidas sobre la tripulación haciendo que este método sea adsequible para el cuerpo humano.

Se basa en el uso de trayectorias balísticas elevadas, siguiendo el principio de “caer como un cohete y sustentarse como un avión”, haciendo que los términos gravitatorios sean menos relevantes que las fuerzas aerodinámicas de sustentación y resistencia. De este modo, las ecuaciones principales vistas anteriormente quedan de la siguiente forma:

$$\dot{v} = -\frac{F_{drag}}{m} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{F_{lift}}{mv} \quad (7)$$

$$\dot{x} = v \cos \gamma \quad (8)$$

$$\dot{z} = v \sin \gamma \quad (9)$$

De estas ecuaciones y sabiendo las expresiones de la fuerza de resistencia aerodinámica ($F_{drag} = \frac{1}{2}\rho v^2 c_{drag} A$) y sustentación ($F_{lift} = \frac{1}{2}\rho v^2 c_{lift} A$), se pueden derivar las ecuaciones de la altitud, velocidad y distancia horizontal con respecto del ángulo de vuelo:

$$\frac{dz}{d\gamma} = \frac{dz}{dt} \frac{dt}{d\gamma} = v \sin \gamma \frac{mv}{F_{\text{lift}}} = \frac{2m}{c_{\text{lift}} A \rho_0} \sin \gamma e^{\frac{z}{z_0}} \quad (10)$$

$$\frac{dx}{d\gamma} = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{d\gamma} = v \cos \gamma \frac{mv}{F_{\text{lift}}} = \frac{2m}{c_{\text{lift}} A \rho_0} \cos \gamma e^{\frac{z}{z_0}} \quad (11)$$

$$\frac{dv}{d\gamma} = \frac{dv}{dt} \frac{dt}{d\gamma} = -\frac{F_{\text{drag}}}{m} \frac{mv}{F_{\text{lift}}} = -\frac{c_{\text{drag}}}{c_{\text{lift}}} v \quad (12)$$

Al integrar estas ecuaciones se puede sacar la evolución de x , z y v con respecto a un γ deseado. Al realizar un plot de z vs x para una serie de γ se puede evaluar el corredor de entrada necesario sabiendo la distancia vertical y horizontal a viajar durante la fase de entrada. Así pues, sabiendo la órbita de parking desde la que se va a realizar la entrada y sabiendo el lugar en el que se pretende amortizar, se puede diseñar la trayectoria requerida.

2.2.5. Contacto con el suelo

Como último apunte, para el sistema de contacto con la superficie de Marte, la aproximación sería la de un sistema con patas que se pudiera asemejar al utilizado en el Módulo lunar o a lo que todos tendríamos en mente. Las grandes dimensiones y peso del vehículo en cuestión harían complicado y costoso implementar el sistema “sky crane”. Además este sistema de patas no supondría ningún problema de diseño como en los casos del *Curiosity* y *Perseverance* que es por lo que se buscó esta alternativa ya que este módulo o vehículo quedaría en el suelo marciano.

2.3. Elección del emplazamiento de la misión

Una vez conocidas las misiones llevadas a cabo y los lugares en las que se han llevado (o están llevando) a cabo, podemos elegir un lugar para amortizar la misión con humanos. Desde un punto de vista de seguridad de la misión y sobre todo de las vidas de los astronautas, lo más sensato sería diseñar la reentrada para amortizar en un lugar conocido, en el que sepas los peligros que te puedes encontrar y estos sean los mínimos posibles. La ventaja de haber realizado previamente misiones a Marte con rovers es que conoces las características del suelo, clima, características locales de la atmósfera y además, son localizaciones que ya se eligieron en su día por ser interesantes desde el punto de vista experimental. Así pues, con la mirada actual puesta en la búsqueda de la posibilidad de vida (pasada, presente o futura) en Marte y lo dicho anteriormente, un sitio ideal para amortizar la misión con tripulación sería en el cráter de Jezero, cerca del rover *Perseverance* y apoyar sus experimentos con otros realizados por humanos in situ. Además, las características y composición del suelo en esta zona son propicias para el aprovechamiento de recursos locales como por ejemplo a la hora de construir el hábitat humano como se verá más adelante.

3. Creación de un hábitat en Marte

Una vez tenemos el sitio del asentamiento elegido, es hora de crear un hábitat. La atmósfera marciana es débil y no respirable para el ser humano. Además, no ofrece protección contra la radiación solar como tenemos en La Tierra, por eso es necesario algún tipo de hábitat o espacio en el que los astronautas puedan tanto vivir como trabajar. Preferiblemente la construcción de este asentamiento, o al menos los primeros preparativos, debe empezar antes de que la misión tripulada encargada de vivir en Marte llegue al planeta rojo, así facilitará el éxito de la misión y aumentará considerablemente la seguridad de esta al ofrecer resguardo de manera inmediata.

3.1. Diferentes opciones

En este punto, se deben exponer las distintas soluciones ante el problema del hábitat y debatir su idoneidad en términos de factibilidad tecnológica, factibilidad económica, aprovechamiento o uso de recursos (tanto locales como importados), comodidad para los integrantes de la misión o posibilidad de adelantar el trabajo antes de la llegada de humanos.

Durante los últimos años, cuando ya se venía viendo que la posibilidad y el interés de llevar una misión tripulada a Marte crecían, numerosas propuestas han sido lanzadas con mayor o menor grado de aceptación. Algunas de las más sonadas y tenidas en cuenta son:

3.1.1. Cuevas

El uso de cuevas para alojar hábitats humanos en Marte es una de las soluciones más propuestas y que en principio ofrecería grandes posibilidades. Proporcionarían a dichos humanos cobijo frente a la gran variedad de peligros y condiciones duras que puedes encontrar en la superficie mientras mantiene de igual manera un microclima relativamente estable. Dado que la atmósfera marciana es muy fina y además el planeta no cuenta campo magnético, muchos peligros como la radiación solar y de rayos cósmicos y partículas alfa, tormentas de arena, posibles impactos de meteoritos o micrometeoritos o las grandes diferencias de temperatura hacen casi imposible la vida orgánica como la conocemos en la superficie. [9] [10] [11] [12]

Aún sin ser la opción elegida en este caso para albergar el primer hábitat humano en Marte, las cuevas pueden ser de gran importancia para la futura exploración del planeta rojo, pues de otra forma los exploradores deberían transportar consigo los refugios o construirlos en cada parada.

Un punto positivo en cuanto al uso de cuevas es que se existe un catálogo de cuevas llamado Mars Global Candidate Catalog (*MGC³*). En él, además de un breve comentario de cada cueva candidata, se dan las coordenadas de latitud y longitud, el tipo de cueva y una valoración de prioridad en términos de confianza de que sea aceptable para uso humano. El tipo de cueva además, es una cualidad muy útil de saber a priori pues permite elegir y descartar según las necesidades.

En la siguiente imagen se pueden apreciar el gran número de cuevas candidatas detectadas, en este caso en la región de Tharsis.

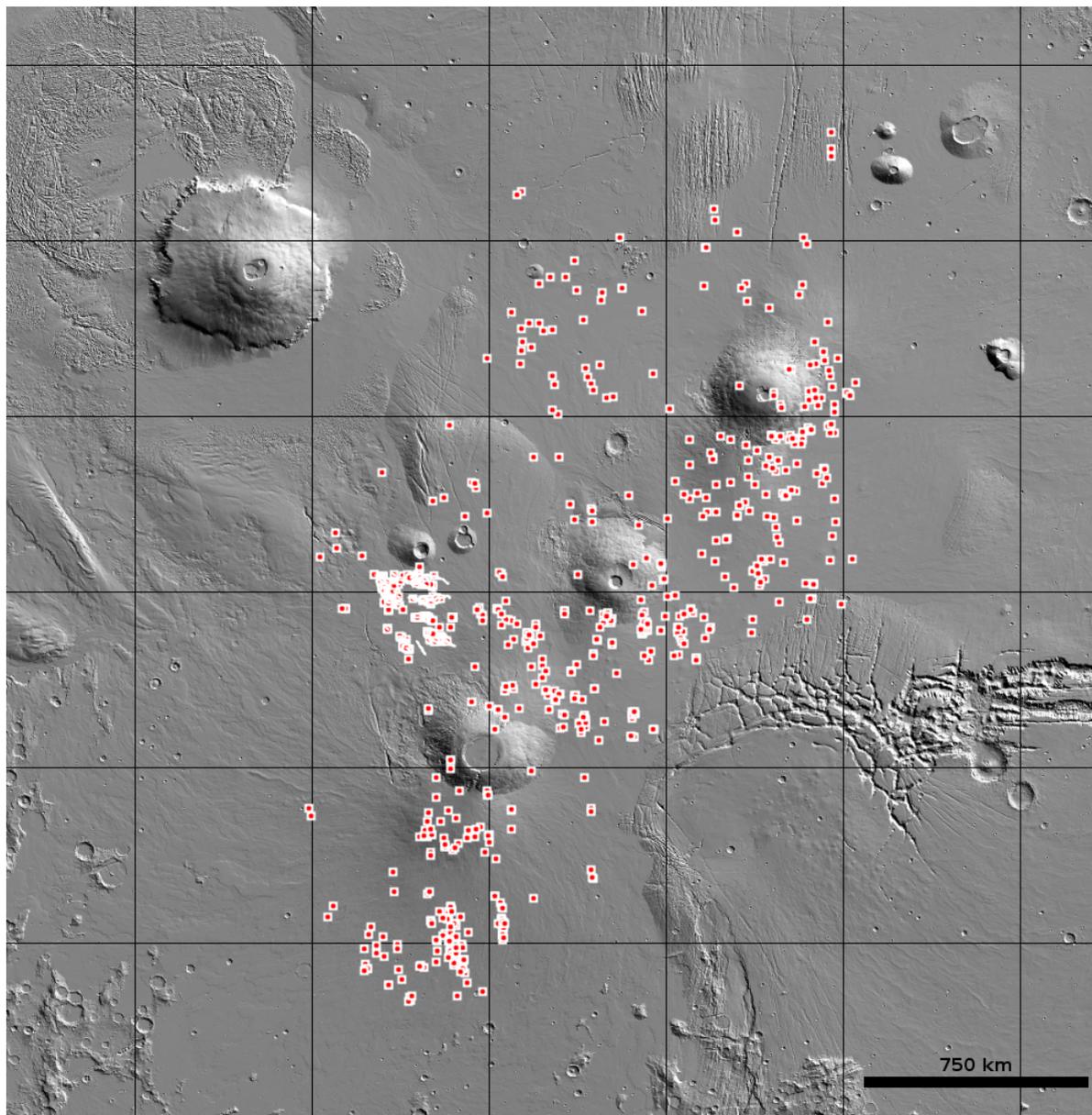


Figura 7: Candidatas de cuevas en la región de Tharsis [9]

La mayoría de las entradas de este catálogo fueron identificadas gracias a imágenes conseguidas por orbitadores de antiguas misiones a Marte. Esto, nos presenta con la dualidad de, a pesar de tener un gran catálogo y muchas posibilidades, al ser candidatas identificadas por un orbitador a unos 400 km de la superficie marciana, es imposible saber cuanto se extienden bajo la superficie.

Este último motivo es la razón por la que, pese a ser una gran solución y muy prometedora, se descarta en este caso. Habría que destinar una misión con robots a investigar dichas entradas o modificar una de las misiones actuales para poder ver si hay candidatas realmente óptimas para la utilización como hábitat humano.

Sin embargo, una vez la primera misión haya llegado y se haya asentado en la superficie marciana o incluso en paralelo con el uso de robots, la exploración de estas cuevas es una opción muy interesante para el futuro de la vida humana en Marte.

3.1.2. Tubos de lava

Gracias a la fotografía orbital y a estudios remotos, se ha evidenciado la existencia de tubos volcánicos en Marte. Estas cuevas se forman como resultado del costrado que van dejando cuando fluyen ríos de lava formados en el subsuelo. Cuando estos ríos se secan, dejan tras de sí conductos o “túneles” bajo la superficie. [13] [14]

En la siguiente imagen 8 se puede apreciar la similitud entre las cuevas o tubos volcánicos existentes en la Tierra y formaciones presentes en Marte observadas gracias a la fotografía orbital

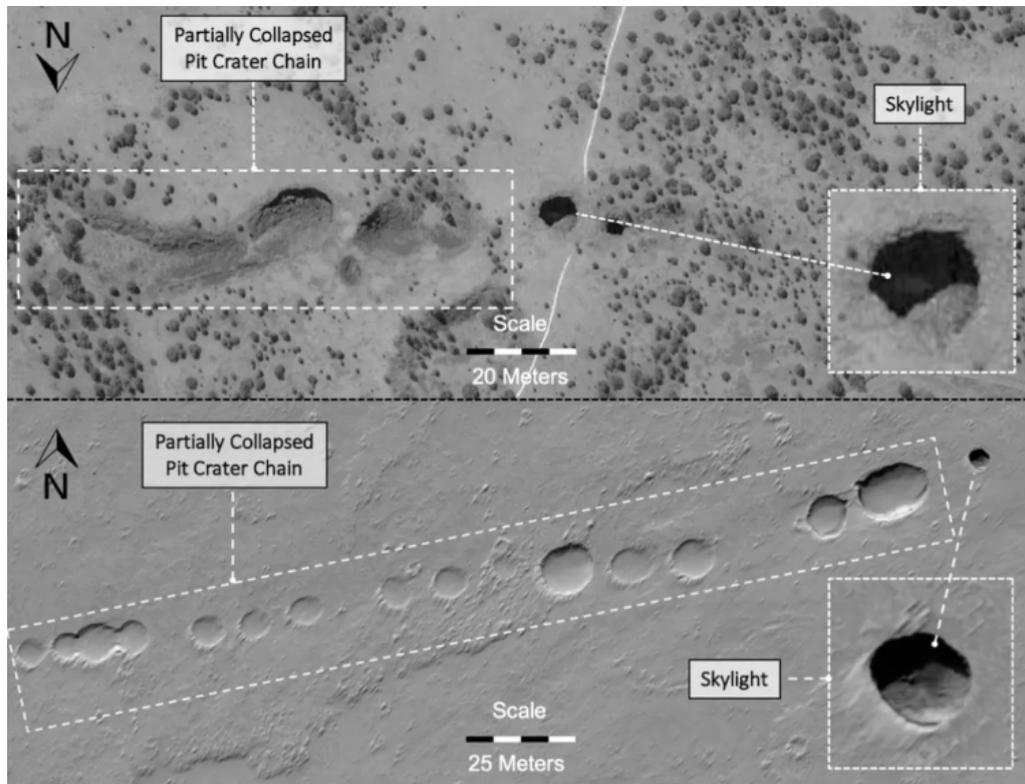


Figura 8: Comparación de tubos volcánicos en Marte y la Tierra [14]

La solución de usar antiguas cuevas volcánicas o tubos de lava está muy relacionada con la anterior de las cuevas. De hecho, los tubos volcánicos son el tipo de cuevas candidatas del catálogo que mejor retorno o posibilidades ofrece. Como la gravedad marciana es menor que la de la Tierra, los tubos volcánicos pueden ser considerablemente mayores que en nuestro planeta de origen, permitiendo así que puedan ser consideradas como potenciales lugares de cobijo y alojamiento.

Tiene las mismas ventajas y desventajas ya expuestas, y por las mismas razones son descartadas al menos en el caso expuesto en este trabajo y para un asentamiento inicial. Sin embargo, la exploración de los tubos de lava, además, es de gran interés, no solo en este sentido de alojamiento y futura exploración marciana, sino también para el estudio y construcción de teorías sobre la termodinámica y dinámica de fluidos en las condiciones marcianas. También pueden suponer una oportunidad de recursos minerales por la protección que ofrecen y que en la superficie no estarían disponibles.

Además, el descubrimiento de tubos volcánicos puede tener implicaciones de vida pasada o presente en Marte y que ofrecen una gran oportunidad de estudio. La historia de Marte es muy distinta a

la de la Tierra, y eso no es diferente en aspectos climáticos y magnéticos. Existen teorías de que en el pasado pudo haber grandes océanos en la superficie marciana donde pudo haber existido vida, pero tras la pérdida del campo magnético que permitía la protección contra partículas solares, la atmósfera se pudo ir haciendo cada vez más fina causando la pérdida del agua líquida en la superficie. Las formas de vida en este punto, pudieron buscar refugio contra dichas radiaciones y los peligros que la superficie ahora ofrecía sin esa protección por parte de la atmósfera en el subsuelo, como en tubos volcánicos.[15]

Un gran número de microorganismos pudo haber sobrevivido en el subsuelo, como microbios encontrados en la Tierra que se descubrieron prosperando en entornos con casi nulo oxígeno y temperaturas gélidas. Esto ofrece esperanzas de poder encontrar organismos que puedan vivir en situaciones extremas similares como las que se dan en Marte. Asimismo, el estudio de los tubos volcánicos marcianos es de gran interés para los investigadores porque puede dar un nuevo enfoque al origen de la vida en la Tierra ya que el registro geológico está mejor preservado en Marte.[16]

Sin embargo, la posible existencia de estos microorganismos o vida en estos lugares, también hace que, paradójicamente, estos no sean el perfecto lugar para un asentamiento humano. Primero porque el propio asentamiento podría interferir con la vida autóctona. Y segundo, los microorganismos o bacterias que los astronautas pudieran transportar consigo, interferirían de igual modo con el medio y la vida existente.[13]

3.1.3. Mars Ice Home

El Mars Ice Home fue un estudio de factibilidad realizado en el Centro de Investigación de la NASA en Langley (NASA Langley Research Center) en colaboración con SEArch+ y CloudsAO. Uno de los más grandes desafíos a los que se enfrentarán los astronautas que vaya a habitar Marte, como ya se ha dicho antes, será la exposición a altos grados de rayos cósmicos y ultravioleta. Por lo tanto, este es uno de los aspectos clave a tratar para la seguridad de los astronautas y la misión. Debido a las restricciones económicas y de peso, las soluciones más sensatas son la utilización de recursos locales, como ya se ha visto en el caso de las cuevas o tubos de lava. En este caso, los investigadores propusieron otra solución de uso de recursos in situ: el uso de hielo como agente protector de radicación y también como componente estructural. [17][18]

Este concepto de Ice Home, ofrece una gran ventaja también frente a otras alternativas. Todo los materiales seleccionados son translúcidos, lo que permitiría el paso de la luz al interior, haciendo que los ocupantes puedan estar conectados con los ciclos diurnos y a su vez aliviar la posible carga psicológica que puede acarrear el estar en un hábitat enterrado bajo la superficie.

El estudio ofrece propuestas y diseños para: la estructura inflable, el sistema de despliegue y el acceso y entrega del hábitat en conjunto.

El hábitat estaría formado por módulos inflables, que ofrecen una gran ventaja respecto a otros tipos de módulos de habitabilidad. Primero porque están ampliamente probados y testados con éxito, algo fundamental para esta misión. También son ideales debido a su gran relación entre espacio ocupado, volumen que posteriormente ofrecen y peso. Al tener que transportarlos desde la Tierra, el peso y volumen ocupados son dos aspectos limitantes realmente importantes. Un mayor peso requeriría una mayor cantidad de carburante, lo que a su vez vuelve a aumentar el peso total de la nave y también supone un aumento considerable del coste de la misión.

El espacio ocupado por estos módulos respecto al que luego más adelante ofrecen también los hacen ideales para este tipo de misión. El espacio disponible será muy reducido, ya que un mayor espacio requeriría una mayor nave con su consiguiente aumento de peso y coste como hemos visto

anteriormente. Por lo tanto, es una enorme ventaja el poder llevar estos módulos desinflados, ocupando poco espacio y luego una vez en el lugar de asentamiento, poder inflarlos y tener un gran espacio habitable sin necesidad de llevar una nave de dimensiones desproporcionadas ni de tener que realizar un trabajo de construcción en el lugar.

El sistema en el que este estudio previó el funcionamiento de este hábitat propuesto es: el agua helada llena y se congela dentro de unos bolsillos celulares de la membrana inflable. A su vez, y para mantener la temperatura, el interior del hábitat estaría aislado del hielo con una capa celular de dióxido de carbono, que puede extraerse fácilmente de la atmósfera marciana.

Sin embargo, este proyecto también encuentra algunas dificultades. La elección de los materiales que puedan conseguir estos objetivos es una gran desafío y uno bastante costoso. Estos materiales tendrían que soportar muchos años de uso en un ambiente hostil como el marciano, con radiación ultravioleta o tormentas de arena por poner algunos ejemplos.

Más allá del tema de identificar los materiales potenciales, uno de los factores limitantes más grandes es la cantidad de agua que se puede extraer de Marte y el ritmo al que lo puedes hacer. Algunos expertos que trabajan desarrollando sistemas de extracción de recursos en Marte indican que sería posible rellenar el hábitat a un ritmo de un metro cúbico por día, lo que permitiría que el diseño completo del Ice Home estuvieran relleno en 400 días.

Esto es un gran tiempo de espera para la misión y aunque teóricamente se podría empezar antes de la llegada humana con el uso de robots, esto añadiría los costes que supuestamente se podrían ahorrar con este diseño. Además de los robots para el “montaje” del hábitat, sería necesario otro enjambre encargado de extraer y procesar el agua para su uso en el llenado del hábitat.

Sin embargo, de la estructura propuesta de Ice Home se pueden sacar conclusiones muy interesantes para un hábitat y vamos a profundizar un poco en ellas.

En la siguiente imagen 9 podemos ver un esquema de lo comentado anteriormente. La mayoría de la radiación se recibiría de forma cenital y por lo tanto será aquí donde deberá haber un mayor aislamiento y una mayor capa de hielo, mientras en el ángulo horizontal es mucho menor esta necesidad.

Cabe también destacar la presurización de los habitáculos para poder vivir y trabajar sin la necesidad de un traje y la capa de aislamiento térmico de CO_2 que es una gran solución para el mantenimiento de la temperatura.

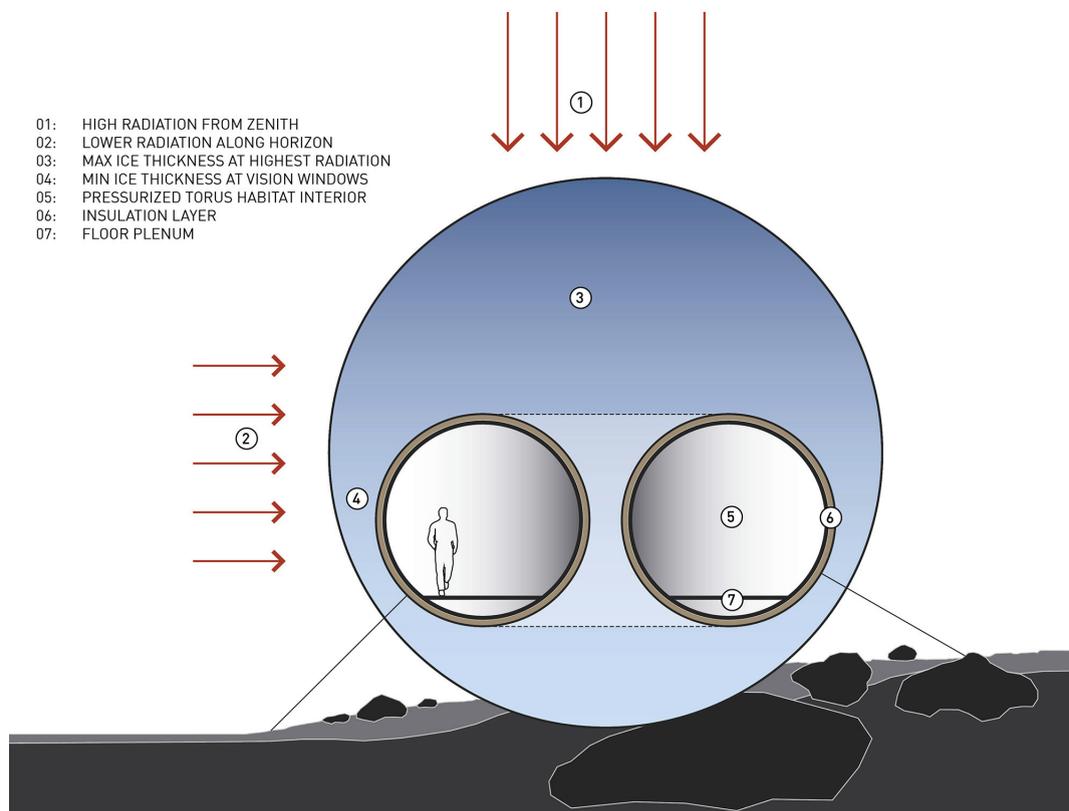


Figura 9: Esquema de la recepción y disipación de radiación por parte del Mars Ice Home [19]

En las imágenes 10, 11 y 12 se puede ver la distribución del hábitat en forma de toroide. Con la capa de hielo aislante bien demarcada y las diversas habitaciones necesarias para la misión. Además de los alojamientos de la tripulación y la esclusa de aire, se pueden observar espacios tan necesarios como invernaderos (para el cultivo y crecimiento de vegetales), espacios para trabajar, ejercitarse (que será un área tremendamente importante como también lo será en el viaje o lo puede ser en la ISS), unidad de higiene, etc.

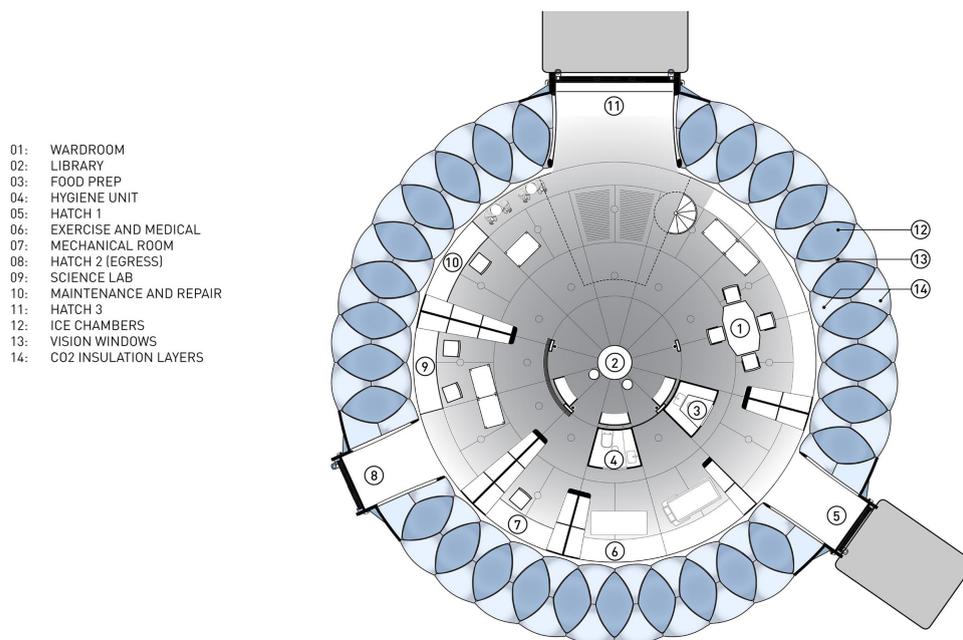


Figura 10: Vista de planta de Mars Ice Home con las distintas estancias [19]

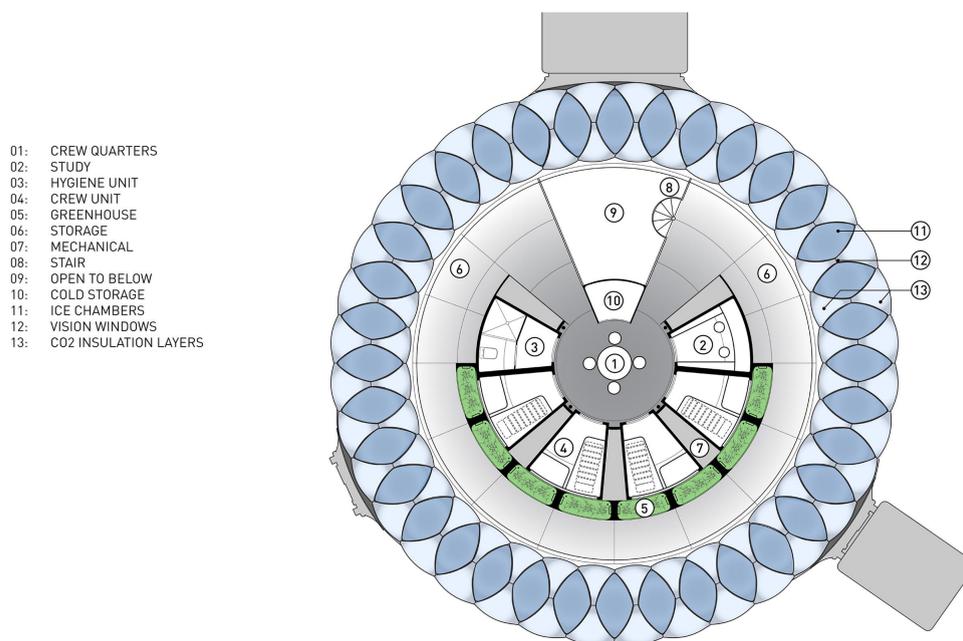


Figura 11: Plano de las distintas dependencias dentro del Mars Ice Home [19]

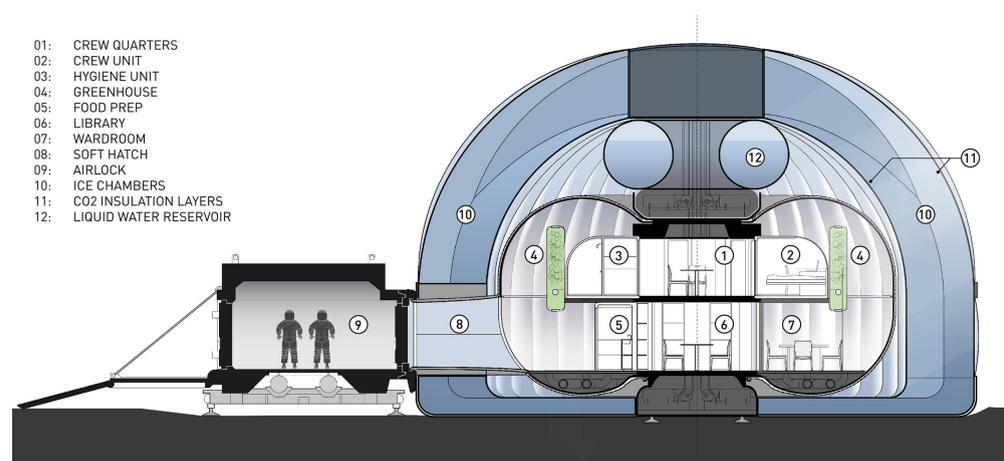


Figura 12: Vista de alzado de Mars Ice Home [19]

En la imagen 12 se puede observar algo tremendamente útil e interesante como puede ser unos depósitos de agua líquida. No solo para el consumo humano y el riego de los cultivos, sino que el agua que se extraiga de la superficie de Marte también se podrá usar como ingrediente para el carburante del futuro viaje de vuelta a casa como se verá más adelante.

3.1.4. Estructura protectora exterior + Módulos inflables

Tras haber visto algunas opciones muy interesantes y de incluso gran potencial para el futuro de la exploración marciana, podemos llegar a la solución elegida en este trabajo y que combina algunos aspectos que las anteriores tenían. Por un lado, la idea de la protección contra los elementos y radiación y rayos cósmicos que te pueden ofrecer las cuevas, usando además material local de fácil acceso. Y por otro lado el uso de módulos inflables, que en términos de habitabilidad y zona de trabajo ofrecen la mejor garantía debido al estudio y trabajos hechos hasta la fecha, la relación entre el espacio disponible, el volumen ocupado y el peso (muy a tener en cuenta para poder transportarlo hasta Marte) y la viabilidad económica (también enlazado con la carga de pago).

Esta opción, es la de la creación (previa a la llegada humana a Marte) de una estructura exterior protectora usando el regolito del suelo marciano y dentro el uso de módulos inflables para determinar las zonas de habitabilidad y trabajo establecidas.

3.2. Estructura protectora exterior + Módulos inflables

3.2.1. Estructura protectora exterior inicial

El diseño de este hábitat se basa, como ya se ha dicho, en la creación de una estructura protectora exterior que permita la protección contra los elementos peligrosos que la superficie marciana ofrece y dentro de esta, para la habitabilidad y el trabajo de la tripulación, el uso de módulos inflables.

La clave de este diseño es, por un lado, el uso de recursos locales y por otro la disponibilidad del hábitat a la llegada de los seres humanos. Para ello, se deberán desplegar un enjambre de robots previamente en la superficie de Marte que sean capaces de extraer, recoger y tratar el regolito marciano para luego construir la estructura como si de impresión 3D se tratara.

Recolección del regolito

Para el éxito de la misión y la viabilidad económica de esta es importante la máxima utilización de recursos locales posibles, y el regolito ofrece una oportunidad buenísima en términos de material de construcción y también para obtención de agua y material para combustible.

Para conocer más el alcance de las posibilidades de este material y ensayar la tecnología a utilizar en Marte para la recolección y tratamiento del regolito, se ha desarrollado lo que se llama "Martian regolith simulant." simulante de regolito marciano. Este es un material terrestre que se utiliza para simular las propiedades químicas y mecánicas del regolito marciano para investigación, experimentos y pruebas de prototipos de actividades relacionadas con el regolito marciano, como la mitigación del polvo en el equipo de transporte, soporte vital avanzado y utilización de recursos in situ.

A la llegada de las sondas Viking y el Pathfinder a la superficie de Marte, usaron sus equipos para medir las características del suelo marciano y así poder recrear una especie de simulante aquí en la Tierra para su estudio. Ha habido varias variantes de simulante de regolito marciano con los años [20] :

- JSC-Mars 1: Fue el primer simulante desarrollado por la NASA en el Centro Espacial Johnson. Contiene un tipo de ceniza volcánica vítrea alterada a baja temperatura.
- JSC-Mars 1A: Es la segunda iteración de simulante de regolito marciano, similar a la primera. Después de molerlo se puede geopolimerizar formando un material sólido que tiene gran potencial para formar "ladrillos".
- Mojave Mars Simulant (MMS): se desarrolló en 2007 para solucionar varios problemas. Aunque el JSC Mars-1 simulaba el color del regolito marciano, su rendimiento era deficiente en muchos aspectos, como sus tendencias higroscópicas, ya que atraía el agua y lo hacía más arcilloso. El MMS, sin embargo, era higroscópicamente inerte debido a su mínima meteorización y a la forma en que era triturado, lo que le permitía simular mejor esa característica del regolito marciano. El MMS se encontró de forma natural como rocas enteras en una formación volcánica en el desierto occidental de Mojave. Tras su trituración, las arenas basálticas fueron procesadas y clasificadas en tamaños particulares, "MMS Coarse" y "MMS Fine". El "MMS Dust" (polvo) consiste en partículas de basalto más pequeñas que se corresponden con la distribución granulométrica del polvo marciano.
- Mars Global Simulant (MGS-1): se desarrolló a partir de 2018 como el primer simulante de regolito marciano mineralógicamente preciso. Se basa en el suelo rocoso del cráter Gale en Marte que ha sido analizado por el rover Curiosity de la NASA. El MGS-1 no incluye percloratos por defecto, por lo que no puede utilizarse para probar los efectos de ese aspecto del regolito marciano hacia los astronautas. Sin embargo, se pueden añadir sales de perclorato u otras especies de superóxido para así poder investigar esta situación.

La exposición a los simulantes de regolito puede plantear algunos riesgos para la salud debido a las partículas finas y a la presencia de sílice cristalina. Aunque los percloratos no fueron descubiertos en Marte hasta 2008 por el módulo de aterrizaje Phoenix, ninguno de los simulantes (ni los anteriores a dicho descubrimiento, ni el más contemporáneo MGS-1) incluye percloratos. Esto reduce el riesgo para la salud que suponen en comparación con el suelo marciano real, lo cual es de gran ayuda en la investigación de este material para su uso en cuanto a aprovechamiento de recursos, pero deja de lado el posible efecto en la salud de los astronautas.

Una vez que tenemos un material en la Tierra similar al que nos podemos encontrar en el suelo marciano, podemos investigar el posible uso que tendrá para proporcionar recursos in situ. El regolito ofrece una oportunidad de recursos muy valiosa en un entorno en el que no se tiene acceso a agua, combustible, oxígeno o incluso materiales de construcción. Su obtención y tratamiento pues,

es de extrema importancia para aprovechamiento de recursos y aligerar el peso de la nave en el viaje hasta Marte.

El proyecto RASSOR (Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot) [21] [22] [23] de la NASA busca el poder llevar a cabo esta labor de recolección y tratamiento del regolito marciano para un posterior uso que facilite la vida humana en Marte y además lo hace de manera autónoma, antes incluso de que los humanos hayan llegado al planeta vecino.

RASSOR es una plataforma robótica móvil teleoperada con una capacidad única de excavación de regolito espacial. Su diseño incorpora una fuerza de reacción neta nula, lo que le permite cargar, transportar y verter regolito espacial en condiciones de gravedad extremadamente baja con gran fiabilidad. Con unos costes de transporte espacial que rondan los 4.000 dólares por libra y unas restricciones muy estrictas de la cubierta del vehículo de lanzamiento, esta unidad compacta y ligera permite el lanzamiento de una excavadora robótica eficiente, robusta y versátil en misiones de aterrizaje precursoras con un coste mínimo.

Como ya se ha dicho, la excavación del regolito es un objetivo de las futuras misiones espaciales para el aprovechamiento in situ de los recursos (ISRU, por sus siglas en inglés) con el fin de fabricar recursos con materias primas locales, como combustibles y aire respirable, y llevar a cabo operaciones de construcción. La excavación de regolito en la superficie de otro cuerpo planetario, como en este caso en Marte, es extremadamente difícil debido a la alta densidad aparente del regolito a bajas profundidades. Además, debido a la baja gravedad en estos entornos, la masa del vehículo excavador no proporciona suficiente fuerza de reacción para permitir que la cuchilla de excavación penetre en el regolito si se utilizan métodos terrestres tradicionales. RASSOR utiliza tambores de cuchara contrarrotatorios en brazos opuestos (como se puede ver en las Imágenes 13 y 14) para proporcionar una fuerza de reacción neta horizontal casi nula y vertical mínima, de modo que la excavación no dependa de la tracción o el peso del sistema de movilidad para proporcionar una fuerza de reacción que contrarreste la fuerza de excavación en entornos de baja gravedad. La excavadora puede atravesar pendientes pronunciadas y terrenos abruptos, y su diseño simétrico le permite funcionar marcha atrás para que pueda recuperarse de un vuelco continuando la excavación en la nueva orientación.

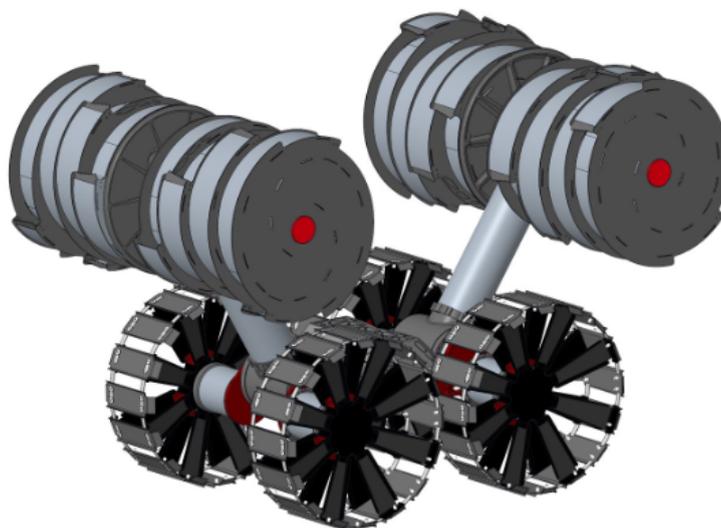


Figura 13: Imagen CAD del robot RASSOR [24]



Figura 14: Imagen de RASSOR en una prueba sobre el terreno en la Tierra [23]

El sistema es capaz de levantarse en posición vertical para descargar en un contenedor sin necesidad de utilizar una rampa, eliminando así la necesidad de tener una estación de descarga a bordo y reduciendo la complejidad y el peso del conjunto. Durante la carga, los tambores de cuchara excavan tierra/regolito mediante cucharas montadas en el exterior de los tambores (Imagen 15) que secuencialmente toman múltiples cortes de tierra/regolito mientras giran a aproximadamente 20 revoluciones por minuto. Durante el transporte, los tambores de cuchara se elevan girando los brazos para dejar espacio libre sobre la superficie que se está excavando. Así, el robot es capaz de desplazarse mientras el regolito permanece seguro elevado. Cuando la excavadora llega al lugar de vertido, se ordena a los tambores de cuchara que inviertan su sentido de giro, lo que provoca la expulsión del regolito.

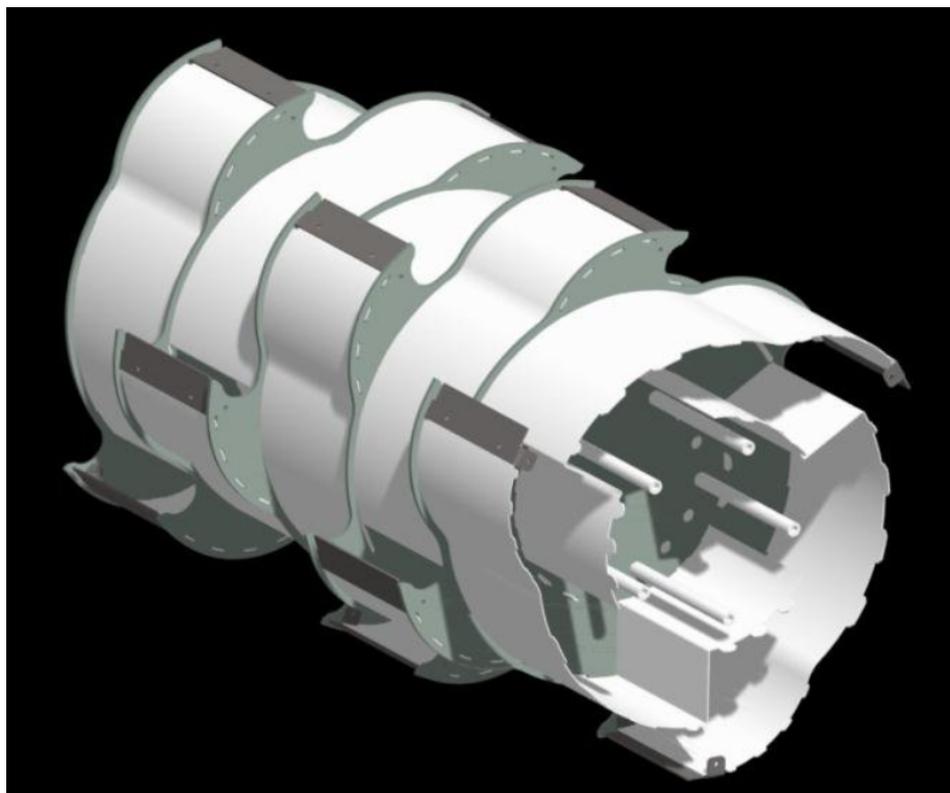


Figura 15: Detalle de las cucharas extractoras de regolito [22]

RASSOR dispone de control inalámbrico, telemetría y cámaras de transmisión a bordo, lo que permite la teleoperación con conocimiento de la situación y además, también puede programarse para funcionar de forma autónoma, lo que supone un gran plus ya que este trabajo de recolección del regolito se puede hacer previo a la llegada de la misión tripulada y así tener el hábitat listo para cuando los seres humanos lleguen a Marte.

Algunas de las ventajas que el proyecto RASSOR proporciona son:

- Eficiencia peso/espacio: los materiales ligeros y el diseño plegable reducen el peso de lanzamiento y las dimensiones de la carga útil.
- Capacidad de funcionar en condiciones de baja gravedad: Su diseño proporciona una fuerza de reacción neta horizontal casi nula y vertical mínima, lo que permite su funcionamiento en condiciones de gravedad extremadamente baja.
- Versatilidad: la plataforma puede atravesar pendientes pronunciadas y terrenos abruptos, y su diseño reversible permite seguir funcionando incluso si la unidad vuelca. El control inalámbrico, la telemetría y las cámaras a bordo proporcionan teleoperación y conocimiento de la situación.
- Fiabilidad: el diseño minimalista reduce la complejidad y el número de piezas para aumentar la fiabilidad y la facilidad de mantenimiento.
- Escalable: el diseño de la plataforma puede ampliarse o reducirse para satisfacer los requisitos del proyecto. Los tamaños más pequeños son adecuados para misiones espaciales.

Una vez que se ha obtenido el regolito marciano y está almacenado, mucho se puede extraer de

él. No solo como material para la construcción de una cubierta externa protectora, de la que se hablará más adelante, sino que también el tratamiento del regolito puede suponer un gran paso para la obtención de agua, que se puede usar tanto para disfrute humana (tras tratarla) o para cultivos, como también para obtención de hidrógeno y oxígeno tanto para respirar como para formar combustible para el viaje de vuelta.[23]

Los sistemas biorregenerativos de soporte vital (BLSS por sus siglas en inglés) se conciben y desarrollan con el fin de proporcionar fuentes de alimento a las misiones tripuladas a la Luna o Marte. El enfoque de utilización de recursos in situ (ISRU) pretende reducir la aportación terrestre a un BLSS utilizando regolitos nativos y residuos orgánicos reciclados como recursos primarios. La combinación de BLSS e ISRU puede permitir la producción sostenible de alimentos en Marte. Esta tarea plantea varios retos, como los efectos de la gravedad parcial, la disponibilidad limitada de oxígeno y agua, y la gestión autosostenible de los recursos. El regolito marciano no están disponibles en la Tierra, pero como hemos visto anteriormente los estudios de investigación espacial se realizan con simulantes de regolito que reproducen las propiedades fisicoquímicas de los regolitos extraterrestres (evaluados in situ por misiones anteriores). Esta revisión ofrece una visión general de las propiedades fisicoquímicas y la composición mineralógica de los simulantes de regolito lunar y marciano disponibles en el mercado. Posteriormente, se describen posibles estrategias y prácticas sostenibles para crear simulantes de regolito similares al suelo terrestre, que es un entorno altamente dinámico en el que la microbiota y la materia orgánica humificada interactúan con la fracción mineral. Estas estrategias incluyen la enmienda de simulantes con residuos orgánicos compostados, que pueden convertir rocas trituradas pobres en nutrientes y alcalinas en sustratos eficientes para el mantenimiento de la vida, dotados de propiedades físicas, hidráulicas y químicas mejoradas. A este respecto, existen diversos trabajos y estudios científicos recientes centrados en la explotación de sustratos basados en simulantes de regolito como medios de crecimiento vegetal.[25]

Un buen conocimiento de las propiedades fisicoquímicas e hidráulicas de los simulantes de regolito lunar y marciano es de vital importancia para desarrollar y construir BLSS fuera del planeta basados en un enfoque ISRU, en el que los sustratos nativos se explotan como medios de crecimiento vegetal. Evaluar cómo las propiedades de los simulantes pueden influir en el crecimiento, la fisiología y la salud de las plantas puede ayudar a superar las deficiencias y los problemas críticos de una manera sostenible y eficaz. Los niveles de macro y micronutrientes, la porosidad y la disponibilidad de agua son parámetros fundamentales para evaluar la capacidad de un sustrato para sostener el crecimiento de las plantas.

Para integrarse con la producción de cultivos, un buen simulador de regolito debe tener ciertas características físicas, entre las que se incluyen las siguientes: 1) capacidad óptima de retención de agua para mantener un nivel efectivo de humedad después del riego; y 2) circulación óptima de aire en el medio poroso para permitir un intercambio eficiente de gases y la respiración radicular y microbiana. Las plantas suelen absorber nutrientes de la solución del suelo, ya sea en forma disuelta, por intercambio o por fácil liberación en la interfase sólido-agua. Los flujos de agua, aire y nutrientes en un sustrato de crecimiento están estrechamente ligados a sus propiedades fisicoquímicas. Por lo tanto, las interacciones o agregación de partículas y la consiguiente formación de un sustrato estructurado son fundamentales para un mejor crecimiento de las plantas. Para la agricultura extraterrestre, está bien establecido que varias propiedades de los simulantes (como un pH alcalino, una alta disponibilidad de sodio, el predominio de macroporos frente a microporos y una escasa capacidad de retención de agua) pueden influir en el crecimiento, la salud y el vigor de las plantas. Así pues, es esencial evaluar si estos simulantes de suelo pueden aprovecharse para sustentar futuras colonias. Sin embargo, el suelo marciano (y, por tanto, los sustratos basados en simulantes de regolito) se ha observado que son potencialmente deficientes en todos los macro y micronutrientes, que se derivan exclusiva (N), mayoritariamente (P, S) o parcialmente (K, Ca, Mg,

Fe, Zn, Cu, Mn, B, Cl y Ni) de la degradación de componentes orgánicos. Así pues, los simulantes de regolito no pueden soportar una ISRU sostenible para la producción de cultivos sin aportaciones exógenas de fertilizantes inorgánicos o materia orgánica.

Se pueden aplicar varias estrategias y tratamientos para mejorar la deficiencia de nutrientes de los simulantes y mejorar su rendimiento como sustratos de crecimiento vegetal. La primera solución consiste en utilizar una composición orgánica estable, no sólo como aporte de carbono orgánico, sino también para mejorar las características físicas del regolito. El uso de esta composición y el labrado del suelo también pueden ayudar a mitigar los efectos de la microgravedad sobre la infiltración del agua. Además, se pueden cultivar inicialmente plantas pioneras seleccionadas para mejorar la zona de las raíces durante el cultivo y proporcionar residuos vegetales para la humificación al final de su ciclo de vida.

La selección de las especies de plantas pioneras candidatas es un aspecto clave a tener en cuenta. Las plantas producen O_2 y absorben CO_2 , sirven de alimento a las tripulaciones espaciales, tienen un papel en el reciclaje del agua y participan activamente en la formación de la estructura del suelo. Para mejorar la ISRU, varios investigadores han propuesto el desarrollo de consorcios microbianos que podrían mejorar la absorción mineral de las plantas.

Otra aplicación muy interesante del regolito marciano es su posible uso para la extracción de agua y combustible para la vuelta. Tras la recolección del regolito y su tratamiento para la construcción (que se verá posteriormente), se puede extraer el agua en forma de vapor almacenada como humedad entre el regolito al compactarlo y calentarlo. Este vapor de agua, cuando la tripulación de la misión ya esté en Marte, podrá ser posteriormente utilizado para tres usos principales: agua, oxígeno y combustible.

Este vapor de agua, al condensarse podrá ser utilizada para regar cultivos y también, tras ser tratada, para el consumo humano. También, a partir del H_2O se puede separar estas moléculas de agua en moléculas de H_2 y O_2 que pueden ser usadas tanto para combustible (ambas) como para respirar (el oxígeno).

Una vez que se han visto las distintas aplicaciones y recursos que se pueden extraer del regolito para maximizar el uso de las materias primas locales disponibles, vemos la aplicación del regolito para la construcción, en la que hay varias propuestas y métodos que se han investigado y muy interesantes.

Una de ellas, desarrollada por Ingenieros de la Universidad de San Diego [26] que intentaban reducir la cantidad de polímeros necesarios para convertir el suelo marciano en ladrillos, descubrieron por casualidad que no se necesitaba ninguno. Para fabricar ladrillos a partir del simulante de suelo marciano, sin aditivos y sin calentar ni hornear el material, eran fundamentales dos pasos. Uno era encerrar el simulante en un recipiente flexible, en este caso un tubo de goma. El otro era compactar el simulante a una presión suficientemente alta.

El proceso produce pequeñas paletas redondas de tierra de unos dos centímetros de alto que luego pueden cortarse en forma de ladrillo. Los ingenieros creen que el óxido de hierro, que confiere al suelo marciano su característico tono rojizo, actúa como aglutinante. Investigaron la estructura del simulante con varias herramientas de escaneado y descubrieron que las diminutas partículas de hierro recubren las partículas rocosas de basalto más grandes del simulante. Las partículas de hierro tienen superficies limpias y planas que se unen fácilmente entre sí bajo presión.

Los investigadores también investigaron la resistencia de los ladrillos y descubrieron que, incluso sin barras de refuerzo, son más fuertes que el hormigón reforzado con acero.

Los investigadores afirman que su método puede ser compatible con la fabricación aditiva. Para construir una estructura, los astronautas podrían extender una capa de tierra, compactarla, extender otra capa y compactarla, y así sucesivamente.

El siguiente paso lógico de la investigación sería aumentar el tamaño de los ladrillos.

El problema que se ve con este método es que es necesario la intervención humana para llevar a cabo la construcción. Sin embargo, se pueden sacar conclusiones muy interesantes que aplicar en otro posible método de construcción que es el que se desarrollará en este trabajo.

Ese método de construcción de la cubierta exterior usando el regolito marciano es el de la impresión 3D de esta usando como material extruido el regolito tratado gracias a un enjambre de robots autónomos que pueden construir esta estructura previa a la llegada humana, proporcionando así la necesaria protección contra la radiación y los peligros que la superficie de Marte atañe.

Impresión 3D de la estructura

Con el material obtenido del regolito anteriormente se puede construir por medio de impresoras 3D un ‘shelter’ que sirva así mismo como protección contra la radiación. Es impreso por 3D con un enjambre de robots que serían capaces de recoger este material y trasladarlo al sitio deseado y luego extruirlo para ir formando la estructura. Este enjambre de robots se lanzaría hasta Marte mucho antes de la llegada de humanos (junto con los robots capaces de recolectar el regolito y procesarlo) para ir formando el refugio. [27] [28]

Esta propuesta como se ha dicho, consiste en dos fases: En la primera fase un ecosistema de robots impresoras 3D llegan meses antes de la llegada humana junto con los robots capaces de recolectar el regolito. Estos robots son capaces de tener roles intercambiables, como recolectores, transportadores o almacenamiento de baterías. También se pueden combinar y anclar unos a otros para ser capaces de transportar o construir grandes cantidades en menor tiempo. Todo esto además son capaces de hacerlo autónomamente gracias al uso de la telemetría, sensores y cámaras equipadas a bordo de estos robots.

Incluso después de las fases iniciales de construcción, son de gran ayuda para transporte de muestras o equipos y exploración del terreno, con lo que permite un aprovechamiento mayor de la vida útil y una mayor eficiencia en términos de coste-utilidad del equipamiento.

La configuración más simple (Imagen 16) de estos robots es una unidad simple monorueda capaz de escanear el suelo para la obtención del mejor regolito posible por medio de escáneres ultrasónicos. Otra tarea de este enjambre de robots será el refinamiento del regolito una vez recogido a un tamaño de grano adecuado para la “impresión”. Cuando el regolito está procesado al tamaño deseado, es transportado al lugar deseado para la construcción. Allí, gracias a microondas concentradas, el regolito es fundido y después extruido por las boquillas de impresión 3D, como se puede ver en la Imagen 17.



Figura 16: Unidad simple de robot monorueda [27]



Figura 17: Impresión capa a capa de la estructura protectora [27]

Así, el refugio es construido capa a capa autónomamente a lo largo de meses por el sistema de robots, permitiendo así que los humanos a su llegada dispongan ya de algo que les proteja de las inclemencias de la superficie marciana y las radiaciones. Pudiendo así aprovechar al máximo su estancia en el planeta rojo para los fines deseados y minimizando al máximo posible las consecuencias malignas para su salud.

Al usar el regolito como material de construcción y hacerlo además por medio de extrusión e “impresión 3D” sería una estructura que funciona bien a compresión pero no a tracción de modo que esta funcionaría bien como refugio anti radiación y demás inclemencias marcianas pero las zonas habitables y de trabajo, que deben soportar además cargas a tracción, serían por medio de módulos inflables que se llevarían junto con los humanos y ahí sería cuando entra en juego la segunda fase.

3.2.2. Módulos inflables

Ya cuando vaya la misión humana se enviaría también los módulos de habitabilidad y trabajo que formarían el hábitat humano en Marte. Teniendo además la estructura protectora contra radiación, vientos, etc ya formada, los tripulantes podrían empezar a vivir en el hábitat y trabajar y estudiar el planeta poco después de su llegada. Tras completar su misión de construcción del refugio, los robots podrían pasar a desempeñar funciones de transporte de muestras, material o incluso personas al unirse unos con otros, por lo que se podrían seguir utilizando y reutilizando aumentando así su ciclo de vida y su eficiencia económica.(Imagen 18)



Figura 18: El enjambre de robots puede ser utilizado posteriormente para transporte de carga [27]

La característica única de este viaje a Marte, y sobre lo que gira el resto de sistemas de nuestra nave espacial, es el transporte de seres humanos. Todos los sistemas de la nave que se explicarán a continuación se centran en hacer la nave lo más eficiente posible para garantizar la supervivencia de la tripulación viviendo en su interior durante, previsiblemente, alrededor de 1000 días. Por ello, para este largo viaje lo mejor es diseñar un espacio apto para la vida y el trabajo de los futuros exploradores.

Esencialmente, el hábitat que albergue a los astronautas debe afrontar las siguientes particularidades:

- Transformación del Dióxido de Carbono expulsado durante la respiración en Oxígeno respirable.
- Transformación del agua no potable en agua apta para el consumo humano.
- Almacenamiento y manipulación de los alimentos que se van a consumir durante el viaje.
- Solución de los posibles problemas médicos que surjan.
- Garantizar espacios para el ejercicio físico y el descanso adecuado de los astronautas

Todos estos aspectos ya se tienen actualmente en cuenta en la Estación Espacial Internacional (ISS), pero con una peculiaridad: la vida útil de todos los sistemas que solucionan estos problemas es de 2-3 años, por lo que si se considera una misión en Marte, la mayor parte de estos sistemas habrían superado su vida útil antes de que la misión finalizase y por lo tanto no sería del todo rentable (teniendo además en cuenta el tiempo del viaje). Por ello, habrá que diseñar componentes y sistemas con una confiabilidad y una vida tales que les permitan seguir operativos a lo largo de un mayor período de tiempo para así rentabilizar al máximo la misión.

Por tanto, el diseño de un módulo de habitabilidad que satisfaga todos los requerimientos de una tripulación humana durante una misión a Marte debe consistir en:

- Sistema de renovación del aire: la renovación del aire, en términos de transformar el Dióxido de Carbono en Oxígeno, es esencial para la supervivencia de la tripulación. Por ello, se integra en el Sistema de Soporte de Vida (ECLSS por sus siglas en inglés). Actualmente, el ECLSS de la ISS es capaz de renovar el CO_2 en O_2 con un 42 % de eficiencia. Sin embargo, la NASA planea aumentar esta eficiencia para los viajes a Marte hasta alcanzar el 75 % [29], evitando o reduciendo así el tamaño de los tanques de oxígeno y, por consiguiente, el peso de la nave.
- Sistema de renovación del agua: se debe reciclar tanto la condensación del ambiente en el interior como el agua residual para crear agua potable para los astronautas. Actualmente, la ISS renueva el 90 % del agua, pero para las misiones interplanetarias se quiere alcanzar el 98 % [30].
- Instalaciones y tecnología médica: se deben integrar una serie de módulos con tecnologías para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades durante el viaje y una vez allí, sobre todo las relacionadas con episodios de exposición a radiación prolongada o fenómenos asociados a la ingravidez. Además, hay que tener en cuenta que no se puede producir el retorno a la Tierra de los astronautas ante una posible emergencia, por lo que los equipos deben ser lo suficientemente sofisticados como para hacer frente a cualquier contingencia.
- Módulos de descanso y ejercicio para astronautas: los astronautas también deben tener sus propias instalaciones que aseguren tanto su correcto descanso como la realización de la actividad física diaria necesaria para combatir el entorno de microgravedad en el caso de no contar con un Sistema de Gravedad Artificial durante el viaje, así como de la menor gravedad que

se experimenta en la superficie de Marte. También se debe garantizar su acceso a alimentos, que en este caso tienen que tener la característica de ser “no perecederos” dado el tiempo de la misión. En este sentido, la comida a bordo de la ISS tiene una caducidad limitada a un año. Sin embargo, consumir solo alimentos no perecederos puede conllevar a un déficit de nutrientes que puede afectar a la salud de la tripulación. Por ello, la NASA, junto al ejército de EEUU, están llevando a cabo investigaciones sobre la creación de alimentos con una fecha de caducidad mayor a 3 años que mantengan unos niveles de nutrientes adecuados [30]. Además, debido a la naturaleza de la misión, los astronautas tendrán que cultivar y crear sus propios alimentos para poder sobrevivir.

- **Laboratorios:** El hábitat de la tripulación que viaje a Marte debe contar con instalaciones para laboratorios de investigación. En una misión de estas características es muy importante para los astronautas tener un hábito de trabajo y vencer temporalmente la sensación de soledad y aislamiento. Además, una vez allí, el entorno marciano ofrece innumerables nuevas oportunidades de investigación en campos como la biología, geología, estudio de la atmósfera marciana, la adaptación del cuerpo humano al viaje y las condiciones de Marte, etc.

Como hemos dicho anteriormente, los módulos de habitabilidad, trabajo, descanso, almacenamiento, etc., estarán compuestos por módulos inflables. Estos presentan grandes ventajas a la hora de usarlos en misión extraplanetarias, pero también algunos aspectos a tener en cuenta [31].

A diferencia de las estructuras espaciales metálicas, los módulos hinchables se componen de tejidos de alta resistencia que se apilan para formar la cubierta exterior y el casco de presión de un hábitat. Un módulo inflable a gran escala está formado por más de 60 capas, con un grosor total de entre 30 y 50 centímetros cuando está completamente desplegado. El apilamiento de capas de material proporciona la protección estructural y medioambiental necesaria para el hábitat. En proyectos como el TransHab [32], el conjunto completo se divide en cinco subconjuntos principales: 1) capa de revestimiento interior, 2) capa de vejiga, 3) capa de contención, 4) capa de protección contra micrometeoritos y desechos orbitales (MMOD) y 5) capa de protección térmica (MLI).

Algunas de estas capas son necesarias en nuestro diseño de hábitat, sin embargo otras no, debido al uso de la cubierta exterior de regolito mencionada anteriormente, que ya ejerce de protección contra la radiación y fenómenos como tormentas o impactos de polvo y partículas contra el hábitat. Por este hecho, en el ejemplo de TransHab, la cuarta capa no sería necesaria y algunas de las otras serían modificadas.

- **Capa de revestimiento interior:** La capa de revestimiento interior es la capa orientada hacia la tripulación en la pared más interna de la estructura. Esta capa se conoce como capa de rozamiento y actúa como barrera para la tripulación. Debe ser ignífuga, fácil de limpiar, duradera, resistente a los pinchazos y proporciona amortiguación acústica.
- **Capa de vejiga:** La capa de vejiga es la barrera de gas (aire) del módulo. Se considera la capa más crítica. Debe constar de varias capas para proporcionar redundancia y mayor seguridad. La vejiga debe ser duradera, flexible y tener una baja permeabilidad tanto a altas como a bajas temperaturas. La vejiga está diseñada para ser sobredimensionada, en comparación con la capa de contención, con el fin de garantizar que la fuerza de presión se transfiere completamente a esta y que la vejiga no soporta ninguna carga. Los materiales de la vejiga suelen ser poliméricos y deben someterse a diversas pruebas, como las de permeabilidad, flexión a bajas temperaturas, durabilidad y facilidad de fabricación.
- **Capa de contención:** La capa de contención es la capa estructural del inflable. Soporta las elevadas cargas de la membrana y las tensiones impartidas por la presión interna del módulo. Los materiales de la capa de contención deben ser fuertes y rígidos, pero también

flexibles, plegables y capaces de embalarse en tierra y desplegarse en órbita (y en otro planeta como Marte en este caso) sin degradarse. En función de la presión de funcionamiento de la estructura textil, existen varias opciones de diseño de la capa de retención. Una patente de Bigelow Aerospace [33] muestra una capa de sujeción hecha de cintas de aro que se apoyan y se cosen de extremo a extremo longitudinalmente, lo que reduce los posibles puntos de tensión en un tejido de correas. Con este diseño, también hay menos correas longitudinales, o axiales, lo que reduce el peso total del módulo. Aunque hay una gran variedad de opciones de diseño, cada diseño de capa de contención debe cumplir los requisitos para la certificación de vuelo. La norma de diseño estructural de la NASA, NASA-STD-5001, establece que las estructuras de materiales blandos de seguridad crítica 1 ó 2 (posible pérdida de vidas humanas o del vehículo) deben diseñarse con un factor de seguridad de 4,0 a la presión de funcionamiento y a lo largo de su vida útil [34]. Esto significa que un hábitat debe diseñarse para aguantar una presión 4 veces mayor que la presión de funcionamiento, así como también debe demostrarse que el módulo sobrevive a la presión de funcionamiento durante cuatro veces la vida útil prevista de la misión.

- **Capa de protección térmica:** La capa principal más externa del módulo es el sistema de protección térmica pasiva (TPS) que se utiliza para ayudar a mantener un control térmico adecuado de la cubierta del módulo y la atmósfera interna. El TPS es una estructura textil similar a un traje espacial para actividades extravehiculares (EVA), que utiliza un aislamiento multicapa (MLI) diseñado por la NASA. El MLI se compone de láminas muy finas de material reforzado doblemente aluminizado que se intercala con una capa interior y otra exterior de película de poliamida doblemente aluminizada. Las capas interiores están perforadas, lo que permite la ventilación, y separadas por una capa de malla. El número de capas depende del entorno térmico de la misión. El apilamiento total del MLI es muy fino y extremadamente flexible.

La ventaja fundamental de las estructuras por módulos inflables en la industria espacial es el menor volumen de lanzamiento. Esto permite reducir el tamaño del carenado, la resistencia y la masa del vehículo o, en su defecto, la posibilidad de carga adicional en un vehículo de mismo tamaño. La comparación entre un módulo inflable y uno metálico depende en gran medida de la misión y sus requisitos (equipamiento, duración, entorno, tamaño, materiales, vehículo, etc.), por lo tanto es complicado realizar una comparación de estructuras inflables y metálicas que se han usado en el pasado. Sin embargo, cualquier comparación debería enfatizar el posible ahorro en términos de masa debido a su gran resistencia específica a tracción, especialmente para estructuras de mucho mayor volumen. Tejidos de alta resistencia como el Kevlar o Vectran por ejemplo, ofrecen una resistencia específica de un orden de magnitud superior a las de las aleaciones de aluminio o titanio (Tabla 1).

Material	Densidad (g/cm^3)	Resist máx. tracción (MPa)	Resist Esp (KNm/kg)
Vectran HT	1.4	3200	2330
Kevlar 49	1.44	3600	2500
Aluminio 7075-T6	2.81	572	204
Titanio Ti-6 Al-4V	4.4	950	220

Cuadro 1: Tabla comparativa de la resistencia específica de tejidos de alta resistencia y metales usados frecuentemente

Sin embargo, los tejidos también presentan el inconveniente de necesitar por norma [34] un factor de seguridad de 4.0 comparado con el 1.4 de materiales metálicos, por lo que ahí se pierde algo

de ventaja comparativa en lo que a peso se refiere. Como se muestra en la Tabla 2, la ventaja de masa para las estructuras inflables es mayor para mayores volúmenes de estructura, debido al mayor porcentaje de tejido de mayor resistencia específica en relación con una estructura de núcleo metálico.

	Módulo	Masa (kg)	Volumen (m^3)	M/V (kg/m^3)
Inflable	TransHab	13200	340	39
	BEAM	1415	16	88
Metálico	Cygnus PCM	1700	19	90
	Columbus (ESA Lab)	10275	75	137
	Skylab Orbital Workshop	28300	302	94

Cuadro 2: Comparativa de masa y volumen de distintos módulos [32] [35] [36] [37]

Una vez que tenemos claras las ventajas que los módulos inflables ofrecen y que son el tipo óptimo de hábitat para este tipo de misión, podemos hacer un análisis de los espacios o recursos que los astronautas que vayan a Marte van a necesitar. Como hemos dicho necesitarán de diversos espacios diferenciados para cada tarea, lo suficientemente espaciosos y con la mayor versatilidad posible por si las necesidades cambian con el tiempo. Así, una propuesta de diseño de hábitat para una misión marciana se puede ver en la siguiente imagen 19.

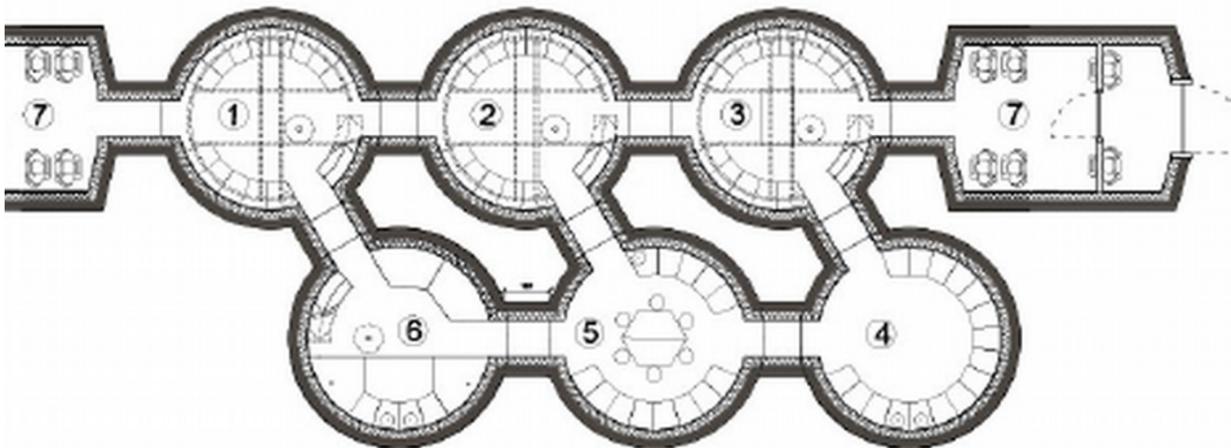


Figura 19: Diseño de hábitat para una misión en Marte [38]

En la Imagen 19, se pueden ver distintos espacios que se corresponden con: laboratorio, taller, dependencias de la tripulación, cocina, área de ocio y dos esclusas de aire a cada lado de la base. Un detalle importante de este diseño es el hecho de que los módulos están separados pero interconectados. Así, en caso de incendio, hay dos posibles vías de evacuación y el módulo en cuestión se puede aislar, sacar el aire de su interior y extinguir el incendio. [39]

3.2.3. Sistemas auxiliares

También cabe destacar algunos de los sistemas auxiliares que harán posible la vida de los astronautas en Marte. Algunos sistemas tan importantes como los sistemas de generación de energía,

comunicación de los astronautas con la Tierra, tecnologías para la conversión de gases o comida y bebida.

Sistema de energía

Las misiones espaciales de larga duración o los puestos avanzados extraterrestres ocupados de forma continua requieren un suministro energético y químico independiente de la Tierra, y por tanto, el aprovechamiento de los recursos in situ que estos lugares pueden ofrecer es fundamental. Las principales alternativas para alimentar los sistemas de soporte vital y las instalaciones de producción química en Marte son los reactores de fisión nuclear miniaturizados y las placas fotovoltaicas (FV). Mientras que se espera que los reactores de fisión se comporten de forma similar independientemente de su ubicación, los límites de productividad de los dispositivos fotovoltaicos y fotoelectroquímicos no están bien caracterizados para la superficie marciana, debido principalmente a las diferencias en la temperatura de la superficie y en la intensidad y el espectro solares con respecto a las condiciones típicas en la Tierra o en el espacio. [27] [40] [41]

Precisamente en la zona del cráter de Jezero, que es donde nuestro asentamiento marciano tendría lugar, un estudio liderado por investigadores de la Universidad de California Berkeley, ha concluido que para una misión de 6 astronautas y un año y medio de duración aproximadamente, el uso de paneles solares es más eficiente que el de reactores nucleares. Analizando las necesidades energéticas para tal misión y contraponiendo los costes en términos de dinero, espacio, peso, etc., de cada una de las alternativas, el aprovechamiento de la energía del Sol en esta zona de la superficie de Marte ofrece grandes ventajas comparado con el uso de minirreactores de fisión nuclear.

Un problema muy grande y a tener en cuenta en cuanto al uso de paneles solares es la acumulación de polvo en estos, algo que ya se comprobó con el rover Opportunity en 2018 tras una tormenta de polvo. Sin embargo, esto se puede evitar fácilmente, pues los astronautas podrían realizar labores de limpieza para mantenerlos en óptimas condiciones de captación de energía.

Aún así, el ejército del aire de los Estados Unidos está investigando una tecnología de placas solares que se autolimpian, lo que liberaría a los astronautas de estas tareas y aumentarían su disponibilidad para otros trabajos.



Figura 20: Placas solares que se autolimpian desarrollada por USAF

Haciendo un modelo por ordenador con varios escenarios para el suministro de energía y la posible demanda de la misma, para el mantenimiento de los hábitats, control de temperatura, presión, producción de fertilizantes y hasta fabricación de combustible para los cohetes que regresen a la Tierra, se encontró que siempre y cuando la misión se ubique cerca del ecuador marciano (como es el caso), donde hay una mayor intensidad del Sol y temperaturas más altas, serán mucho más efectivos los paneles solares que un sistema de fisión nuclear, tanto en términos de masa necesaria como de energía generada.

Este modelo considera también que la energía podría almacenarse en el sitio utilizando un sistema de energía de hidrogeno comprimido, que se puede extraer directamente de la superficie marciana sin problema. Esta situación cambia completamente si la misión se ubicara en los polos, un entorno mucho más extremo con menor luz solar y cambios de temperatura más grandes.

Los factores ambientales también juegan un papel muy importante en cuanto a la elección de la forma de suministro de energía óptima para esta misión. Como la forma en que las partículas en la atmósfera marciana absorben o dispersan la luz y así calcular cuanta radiación solar llega a la superficie y saber cuál es el mejor lugar para colocar la granja solar.

A pesar de la eficiencia que la tecnología de energía fotovoltaica ofrece para la conversión de luz solar en electricidad, los mejores paneles todavía siguen teniendo un costo y peso elevados, por lo que es esencial que los nuevos desarrollos generen paneles más ligeros y flexibles que sean más fáciles de transportar en un cohete, reduciendo así el coste de su transporte.

Si bien es verdad que una planta de energía nuclear es capaz de proporcionar una mayor cantidad de electricidad, si una de estas fuentes falla, la colonia podría perder una proporción significativa de su producción. Sin embargo, con el uso de paneles solares, este contratiempo se puede afrontar de una mejor manera, pues por su menor peso se pueden transportar una mayor cantidad al planeta rojo y así servir de repuesto en caso de fallos técnicos.

Sistema de comunicación

El Sistema de Comunicación permite el envío de datos de situación y de control desde la nave hacia las estaciones en tierra y viceversa, por lo que constituye un sistema crucial en el desarrollo de la misión.

Actualmente, el envío y la recepción de parámetros de todas las naves realizando misiones interplanetarias (y algunas cercanas a la Tierra) es mediante la Deep Space Network (DSN). La DSN es un sistema de grandes antenas colocadas estratégicamente en tres puntos equidistantes cada 120° de Longitud: California (EEUU), Canberra (Australia) y Madrid (España). Esta colocación exacta responde a que siempre una de ellas está disponible para recibir datos mientras la Tierra gira (como se puede ver en la Imagen 21) [42].

Sin embargo, como estos enlaces de datos se envían mediante ondas electromagnéticas que viajan a la misma velocidad que la luz, las largas distancias de los viajes espaciales hacen este tipo de comunicaciones bastante lenta y vulnerable a fluctuaciones provenientes de la radiación cósmica. Además, los sistemas de comunicación actuales preparados para viajes interplanetarios están equipados en sondas, de tal manera que las dimensiones del equipo deben ser muy reducidas. Esto provoca que las señales emitidas por las sondas de exploración sean bastante débiles, lo que acarrea la constante renovación y/o construcción de antenas terrestres cada vez más grandes. Relacionado con las largas distancias interplanetarias, en las actuales misiones en Marte existe la gran diferencia de distancias cuando la Tierra y el Planeta Rojo están más cerca y cuando están más alejados, con distancias que varían entre los 50 y los 400 millones de kilómetros. Por ello, en el caso más favorable, cuando los planetas están en sus puntos más cercanos el uno al otro, el tiempo que tarda una comunicación en llegar a Marte es de 3 minutos, mientras que en el punto más alejado el tiempo puede ascender a los 24 minutos.

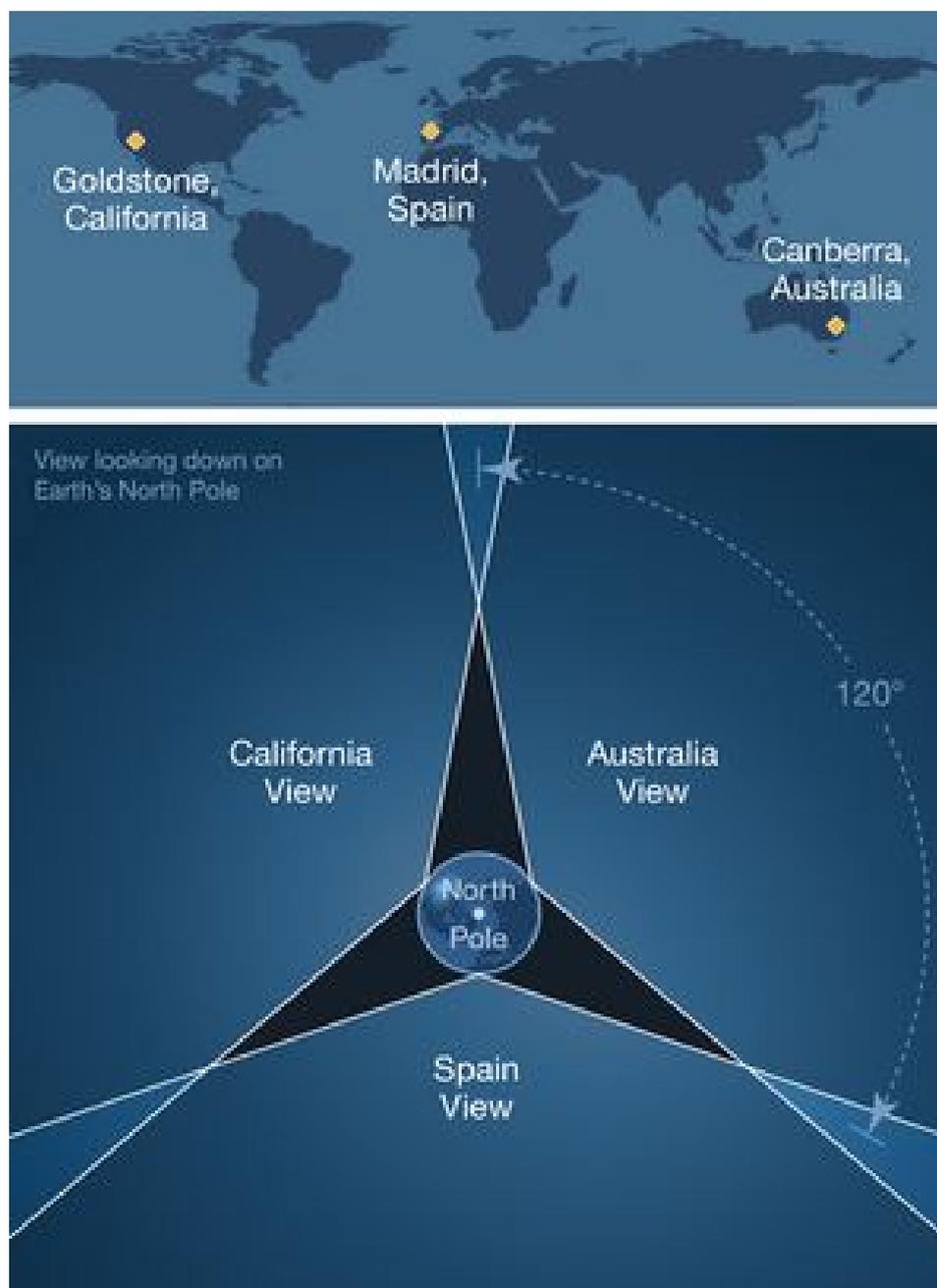


Figura 21: Estaciones de la Deep Space Network [42]

Por las razones anteriormente descritas, la NASA está construyendo una nueva antena de 34 metros para incorporar al DSN enlaces mediante láser (ópticos). Los enlaces mediante láser permiten comunicar una mayor cantidad de información en cada onda, llegando a aumentar hasta 10 veces la capacidad de comunicación que las ondas de radio usadas hasta ahora [43]. Por tanto, puede hacer frente tanto al retardo en la recepción de información como a las posibles interrupciones o generación de señales espurias procedentes de la influencia de la radiación electromagnética y el Sol.

En consecuencia, el Sistema de Comunicación que se utilizará para esta misión a Marte debe tener un mayor tamaño para facilitar y aumentar el envío y la recepción de los datos provenientes de las estaciones de control terrestres, mediante un sistema láser (óptico) que incremente la velocidad y

capacidad de la señal. Esto, a pesar de aumentar el volumen ocupado y el peso de la nave para el viaje, es una necesidad para maximizar las posibilidades de éxito de la misión.

Tecnología de conversión de gases

La atmósfera de Marte está compuesta en un 96 % de dióxido de carbono, mientras que el de oxígeno es de apenas un 0,13 %. Estas condiciones atmosféricas hacen imposible la vida en Marte tal y como la conocemos en la Tierra, por lo tanto, si queremos mandar una misión tripulada al planeta rojo, o debemos mandar grandes cantidades de oxígeno (con el coste que ello conlleva) o debemos hallar la manera de sintetizarlo con las condiciones de la atmósfera marciana. Aquí es donde entra en juego MOXIE, un modelo de prueba de la NASA para convertir CO_2 en O_2 que se está ya probando in situ en Marte a bordo del rover Perseverance. Esta síntesis de oxígeno no solo será clave para el uso de la tripulación para respirar sino también para la fabricación de combustible. [44]

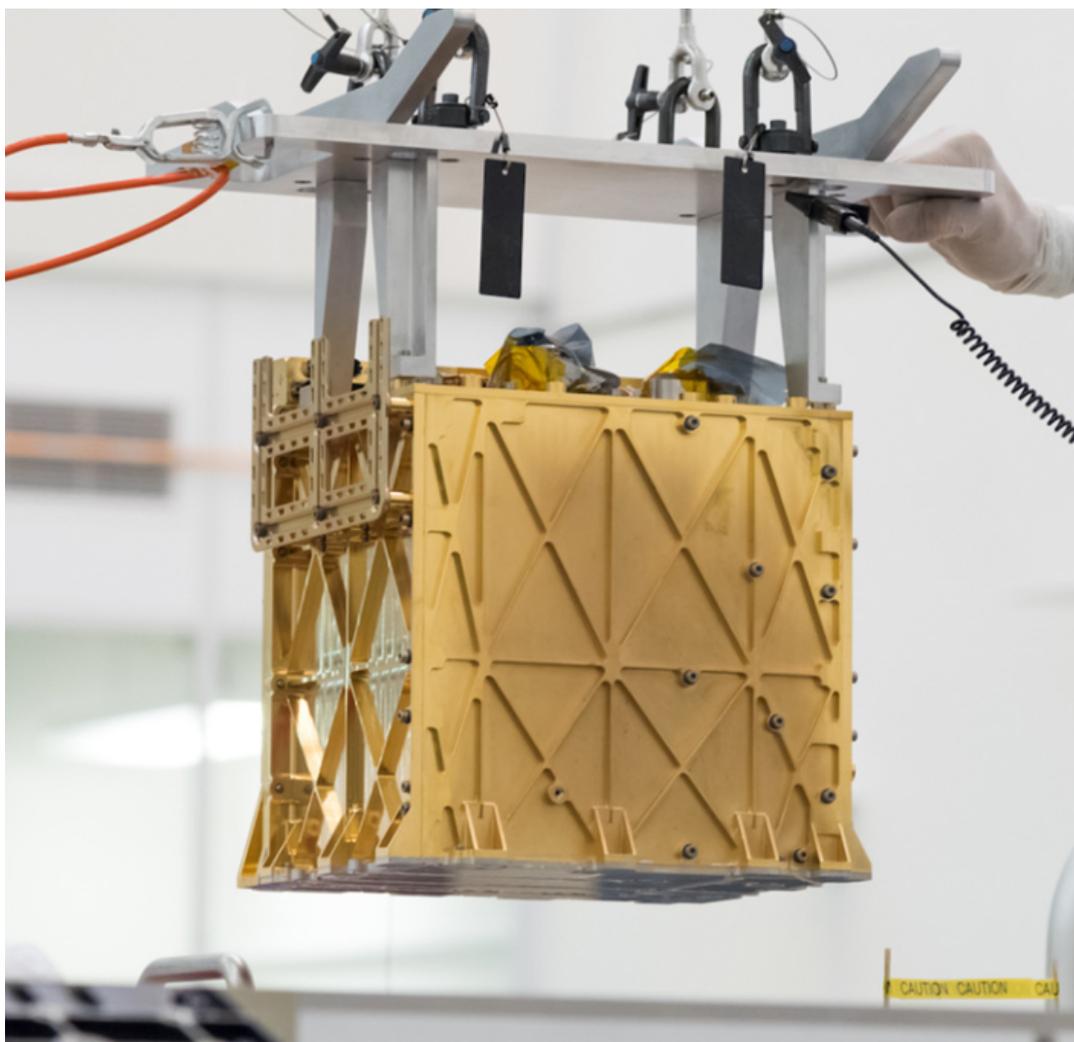


Figura 22: Imagen del MOXIE instalado a bordo del Perseverance [44]

MOXIE es un ejemplo de "pila electrolítica de óxido sólido", que es una pila de combustible que funciona a la inversa. En una pila de combustible, el combustible y el oxígeno reaccionan para producir energía (electricidad) y un producto químico estable. El ejemplo más común es la pila de combustible de hidrógeno, utilizada en algunos automóviles, que combina hidrógeno y oxígeno para

producir agua y electricidad. Una pila de hidrógeno de este tipo, por el contrario, empezaría con el agua y utilizaría electricidad para volver a convertirla en hidrógeno y oxígeno. Ambos dispositivos, la pila de combustible y el electrolizador, son casi idénticos, pero funcionan de forma muy diferente.

Utilizar agua para producir oxígeno en Marte es una gran idea si tuviéramos fácil acceso al agua. Como ya hemos visto podemos conseguir acceso a agua desde el regolito recolectado para la creación de la cubierta del hábitat. Sin embargo, la cantidad de agua que se obtendría de esta forma, aunque interesante y aún así valdría la pena para usarla en otras aplicaciones o como apoyo, es insuficiente para lo que se necesita. Afortunadamente, tenemos otra fuente de oxígeno a nuestro alrededor en Marte y mucho más abundante: el dióxido de carbono, que constituye la mayor parte del aire marciano. En lugar de utilizar hidrógeno, MOXIE es un ejemplo de célula electrolítica de óxido sólido que utiliza dióxido de carbono para producir monóxido de carbono y oxígeno.

El MOXIE integrado en el Perseverance es una versión en miniatura de la que se mandará un día a Marte. Está diseñado para producir como mínimo 6 gramos de oxígeno por hora, pudiendo llegar a un máximo de 12. Esto es una muy baja cantidad de oxígeno producido para una misión (una persona leyendo consume unos 10 g/h), pero el Perseverance tan solo tiene una potencia de unos 100W y separar moléculas de CO_2 requiere una gran potencia. Con el sistema de energía por placas solares que hemos visto anteriormente y la planta MOXIE grande, seríamos capaces de producir el oxígeno necesario para la misión.

Hablando del oxígeno necesario, los cálculos son que la tripulación usaría en torno a 2 o 3 toneladas de oxígeno. Pero, sin duda, la mayor parte (unas 25 a 30 toneladas) del oxígeno necesario sería para su uso como combustible para la vuelta.

La idea es mandar una MOXIE grande en la primera ronda previa a la llegada de humanos a Marte, junto con los robots para crear la cubierta y las placas solares para proporcionar energía. Así, podría ponerse en funcionamiento desde su llegada e ir produciendo oxígeno para cuando los tripulantes lleguen. El objetivo de un MOXIE grande sería fabricar y almacenar todo el oxígeno que los astronautas y su cohete necesitarían para su misión antes incluso de la salida de estos hacia Marte. Esto significa que se tendrían que producir entre 2 y 3 kilogramos de oxígeno por hora, frente a los 6-10 gramos que produce el MOXIE actual. No solo esto, sino que lo tendría que hacer durante todo el día sin parar durante un gran período de tiempo de muchos meses. Es por eso que los experimentos actuales abordo del Perseverance son de gran importancia para evaluar la viabilidad y probar que la tecnología no falle.

Tecnología de comida y bebida

Para que la misión humana sea un éxito y pueda estar por un periodo de tiempo razonable, la tripulación debe ser capaz de generar u obtener agua y comida lejos del planeta Tierra, tanto para consumo como para poder regar cultivos (que será la forma más factible de comida que se pueda obtener).[45]

En la Estación Espacial Internacional (ISS), los astronautas pueden recibir suministros de la Tierra desde naves espaciales de carga que visitan la estación espacial y tardan sólo seis horas en llegar. Pero la duración del viaje a Marte hace imposible esta dependencia en recibir recursos de la Tierra.

Los científicos han estado trabajando para resolver este problema. Han estado buscando formas de que los astronautas produzcan su propia agua potable y cultiven sus propios alimentos. Y lo que es igual de importante, se están asegurando de reducir cualquier riesgo de contaminación, para mantener a los astronautas lo más seguros y sanos posible en misiones de larga duración.

El agua potable es algo que muchos de nosotros damos por sentado en la Tierra, pero en las misiones espaciales es más difícil de conseguir. La ISS recicla gran parte de su agua mediante

productos químicos, pero sigue dependiendo de considerables envíos de agua desde la Tierra para que sus astronautas tengan acceso a agua limpia.

Un proyecto de la Comisión Europea llamado BLOWYSE [46] [47] esperaba encontrar una solución al problema del agua para las misiones largas. El proyecto buscaba formas de almacenar agua durante largos periodos de tiempo, controlarla en tiempo real para detectar la contaminación por microbios y dispensar agua potable limpia cuando fuera necesario descontaminándola con luz ultravioleta en lugar de productos químicos.

La intención de los investigadores era hacer un sistema que cubriese todas las etapas, desde almacenar el agua hasta ponerla a disposición de quien quiera beberla. Esto significa que se almacena el agua, se controla la biocontaminación, se desinfecta si es necesario y, por último, se suministra al vaso para beber. El resultado final fue una máquina totalmente automatizada capaz de realizar todas estas tareas. El agua se comprueba, se descontamina si es necesario y se suministra, como un dispensador de agua al que podemos estar acostumbrados en la Tierra.

La máquina está también diseñada para permitir el análisis de muestras de superficies húmedas dentro de una nave espacial para ver si han sido contaminadas y son peligrosas para los astronautas. Dentro de un hábitat cerrado, la humedad empieza a acumularse y puede haber rincones o zonas que no estén limpios.

El proyecto desarrolló un prototipo de esta máquina en la Tierra, de aproximadamente un metro de largo, con la idea de poder utilizar una versión más pequeña en algún lugar como la ISS. En última instancia, sin embargo, se pensó que un sistema como BLOWYSE podría ser útil para futuras exploraciones, y el prototipo sigue estando disponible para cualquier misión aplicable en el futuro.

El sistema se ha diseñado pensando en futuros hábitats, como por ejemplo, una estación espacial en la Luna o un laboratorio de campo en Marte en las próximas décadas. Se trata de lugares en los que el agua puede haber estado asentada algún tiempo antes de que llegue la tripulación.

Como hemos visto, el agua en Marte, aunque de difícil manera, se puede obtener. Sin embargo, más difícil es la autosuficiencia alimentaria: cualquier alimento para los astronautas debe llevarse desde la Tierra.

Hay algunas ideas en desarrollo sobre cómo cultivar alimentos sin constantes misiones de reabastecimiento. En la ISS, los astronautas llevan varios años utilizando máquinas como el Sistema Europeo de Cultivo Modular (EMCS), lanzado en 2006, para investigar el crecimiento de plantas como el berro. El ECMS fue sustituido por una máquina similar llamada Biolab en 2018.

Un nuevo proyecto, también financiado por la Comisión Europea llamado TIME SCALE [48] y llevado a cabo por investigadores del Centro de Investigación Interdisciplinaria en el Espacio (CIRiS) de Noruega, buscaba formas de desarrollar un nuevo sistema para cultivar plantas que sean seguras para comer en el espacio.

El objetivo de TIME SCALE era crear un método para reciclar el agua y los nutrientes dentro de una futura máquina de cultivo, así como controlar la salud de las plantas con mayor facilidad, para desarrollar una idea de invernadero.^{en} el espacio.

Se tomó el ECMS como punto de partida para definir conceptos y tecnologías que permitiesen aprender más sobre el cultivo de cosechas y plantas en microgravedad. Así, se diseñó una máquina mayor que el ECMS (que tiene el tamaño de una maleta) y con más funcionalidades. Un prototipo capaz de reciclar y controlar los nutrientes del agua y así cultivar y producir alimentos con éxito. Al igual que el Biolab y el ECMS, el prototipo se diseñó para utilizar una centrifugadora giratoria

que simulara la gravedad en la Luna y Marte para medir la absorción de nutrientes o agua por parte de las plantas.

Para viajar a mundos como la Luna y Marte, e incluso vivir en ellos, serán cruciales tecnologías como éstas, que permitirán a los astronautas ser autosuficientes cuando estén lejos de la Tierra. No habrá una tripulación constante todo el tiempo, sino que habrá periodos de tiempo en los que el laboratorio estará vacío y no habrá tripulación hasta que llegue el siguiente turno. El agua y otros recursos se quedarán allí, y es posible que se acumulen microorganismos. Es ahí donde TIME SCALE y BIOWYSE aúnan fuerzas para asegurar la descontaminación, potabilidad y edibilidad de los recursos hasta ese momento producidos.

4. Creación y análisis de la estructura protectora exterior

Para el análisis y la modelización de la estructura exterior, se optó por un diseño abovedado similar a una cúpula con varias entradas para mayor optimización del espacio así como simplificación de los cálculos y modelizaciones.

El diseño, que se puede ver en las siguientes Figuras 23 24, consta de una bóveda circular de 35 metros de radio con 1 metro de grosor de pared en la base y 5 en la parte alta. Dejando un espacio para los módulos de habitabilidad de 34 metros de diámetro y 30 metros de altura en la parte central.

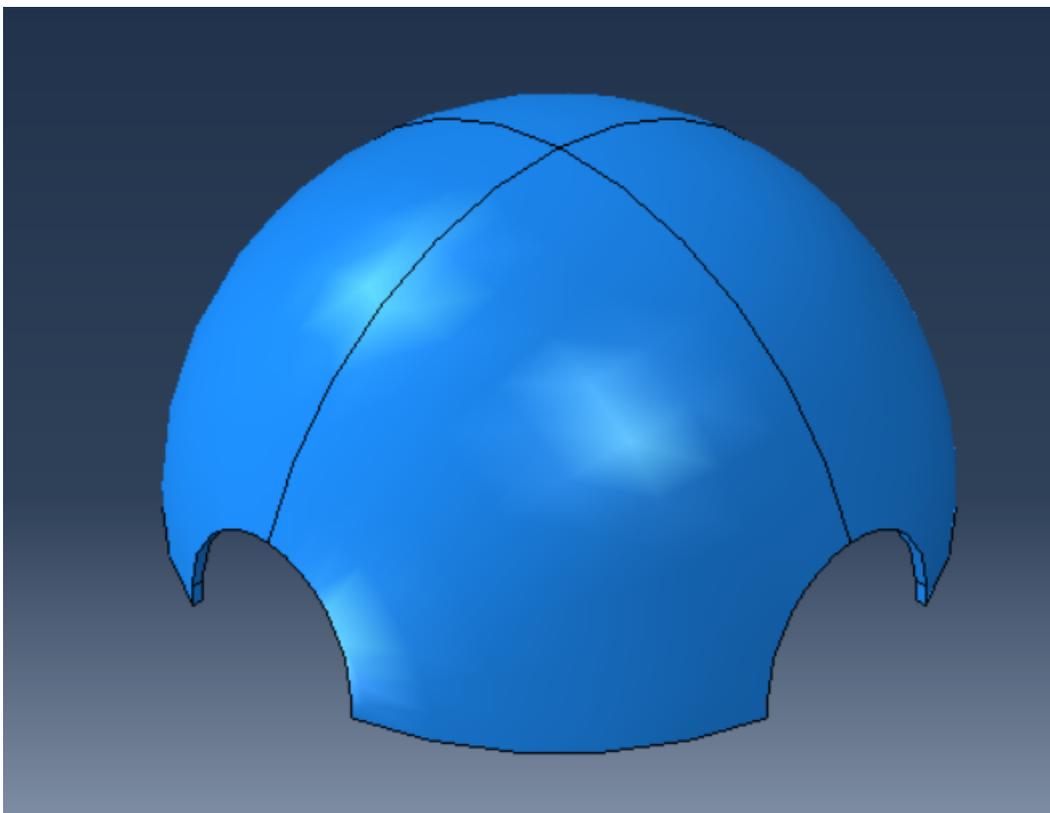


Figura 23: Modelo de la estructura protectora exterior

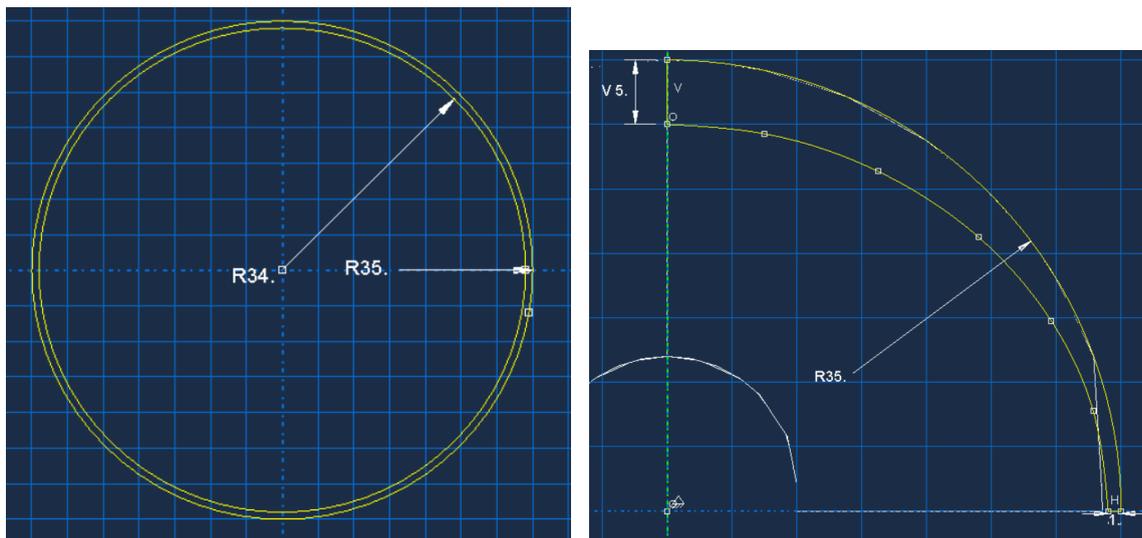


Figura 24: Esquema de la estructura

Tanto para crear el modelo como para analizarlo, se usó el software *Abaqus* en versión estudiante, por lo que llegado el momento, se tuvo la limitación de 1000 elementos que, aunque no permiten un análisis y resultado detallados, si permiten hacerse una idea de si tanto el diseño como el material son aptos para la tarea requerida.

El primer paso fue la creación de la parte. Al ser una estructura con forma esférica, se optó por formarla a través de la revolución alrededor del eje vertical del boceto que se puede observar a continuación.

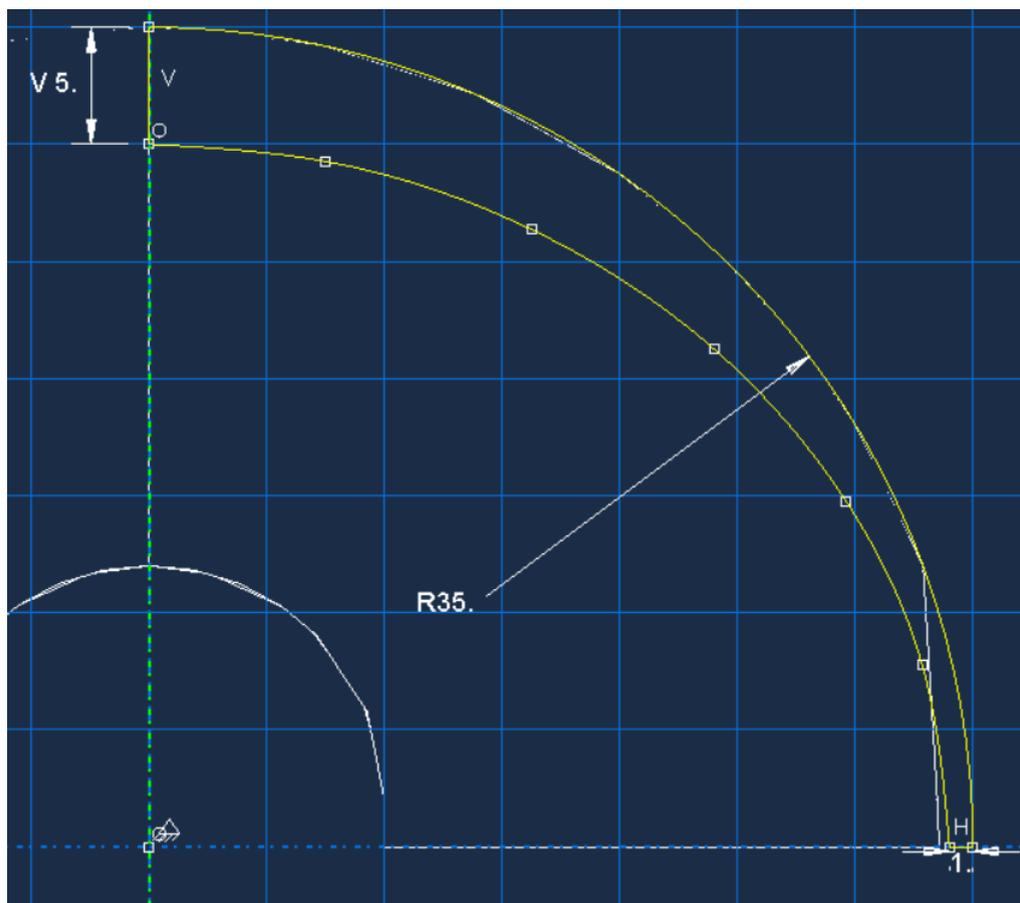


Figura 25: Boceto por el que se forma la estructura por revolución

A continuación se procedieron a dar los cuatro cortes laterales a modo de “puertas” que sirven para poder ingresar al interior y para introducir los materiales, módulos de habitabilidad, etc. Quedando la estructura como se vio anteriormente en la Figura 23.

El siguiente paso es la creación del material y su asignación a la pieza. Para ello, se tuvieron en cuenta diversos estudios en los que se recogen propiedades físicas y mecánicas del regolito marciano y simulantes de regolito marciano, así como simulaciones de ladrillos formados por impresión 3D de mezclas de materiales encontrados en la Tierra que daban composiciones muy similares al suelo marciano [49], [50], [51], [52], [53].

Las características necesarias finalmente ingresadas a la hora de la creación del material se pueden ver en la siguiente Tabla 3:

σ [MPa]	E [MPa]	ρ [kg/m^3]	ν
2.75	127.37	1989	0.4

Cuadro 3: Propiedades del material

El siguiente paso es introducir los esfuerzos, las cargas y las fuerzas a las que se verá expuesta la cubierta. En este caso vamos a someter a la cúpula a una carga de presión constante correspondiente a la atmósfera marciana. Los vientos en Marte varían entre los 4 y 10 m/s con velocidades máximas que pueden alcanzar los 25.

Por lo tanto para hallar la presión usaremos la siguiente fórmula:

$$q = \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 25 = 6,25 \text{ Pa} \quad (13)$$

Calculamos la presión con la velocidad máxima del viento para hallar la presión máxima media que deberá soportar la estructura, que nos sale alrededor de los 6 Pa. La densidad del aire en la superficie es de unos $0,02 \text{ kg/m}^3$, obtenida de Williams, 2018 [54].

También en este caso se modela el posible impacto de micrometeoritos, para evaluar las posibilidades de la estructura en caso de que se produciese este suceso.

Se supone una velocidad de impacto de micrometeorito de 7 km/s , la masa de estos puede variar entre 1 mg y 1g, en este caso se seleccionará el valor más severo, y un diámetro máximo de 3 mm, de acuerdo con estudios y papers [55]. Suponiendo también que el tiempo de impacto es de 0.001 s, la fuerza que debería soportar la estructura ante el impacto de un micrometeorito sería de:

$$F = \frac{2mv}{t} = \frac{2 \cdot 0,001 \cdot 7000}{0,001} = 14000 \text{ N} \quad (14)$$

En la Figura 26, se pueden observar las cargas correspondientes a la presión atmosférica y al impacto de un micrometeorito y las condiciones de contorno en el suelo.

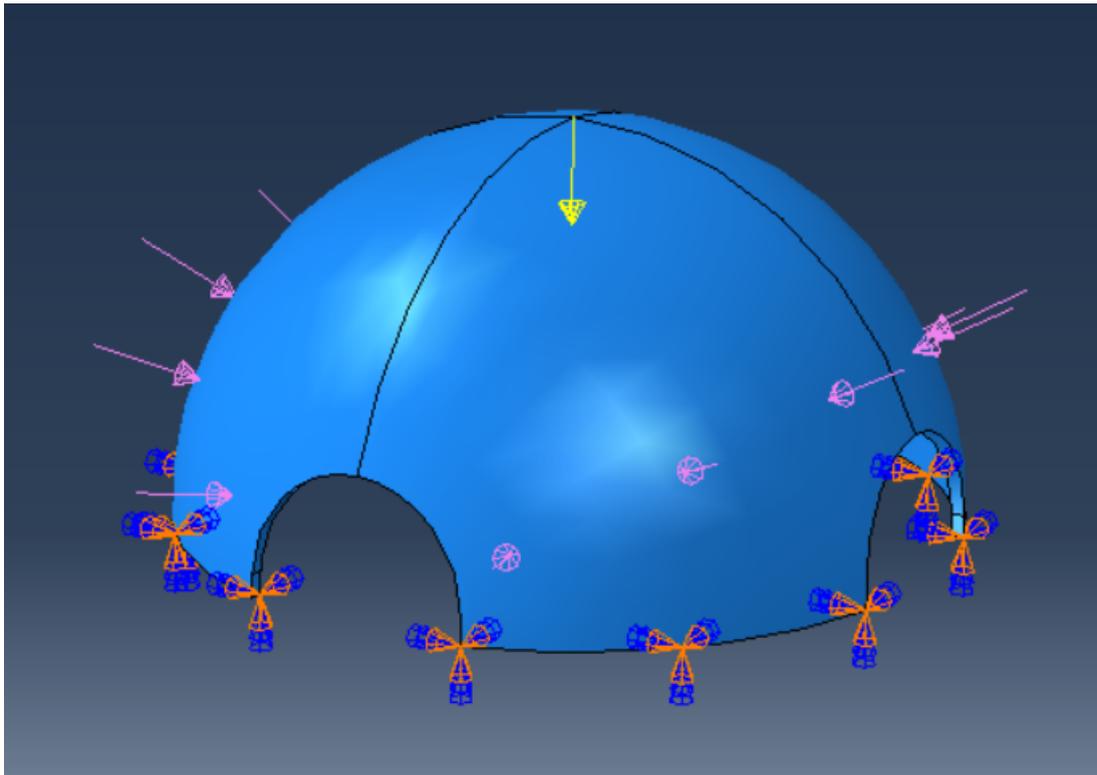


Figura 26: Cargas y condiciones de contorno aplicadas

Una vez añadidas las cargas anteriores y las condiciones de contorno de anclar la estructura al suelo, llega el turno de mallar la estructura. Como se explicó anteriormente, para este estudio se ha dispuesto de la versión de estudiante del software *Abaqus*, que tiene una restricción de 1000

elementos. Esto hace que el resultado que se vaya a obtener, al ser un mallado no tan refinado, no sea el mejor, pero aún así es válido para evaluar si la estructura es capaz de subsistir en el entorno marciano.

El resultado del mallado se puede visualizar en la siguiente imagen 27:

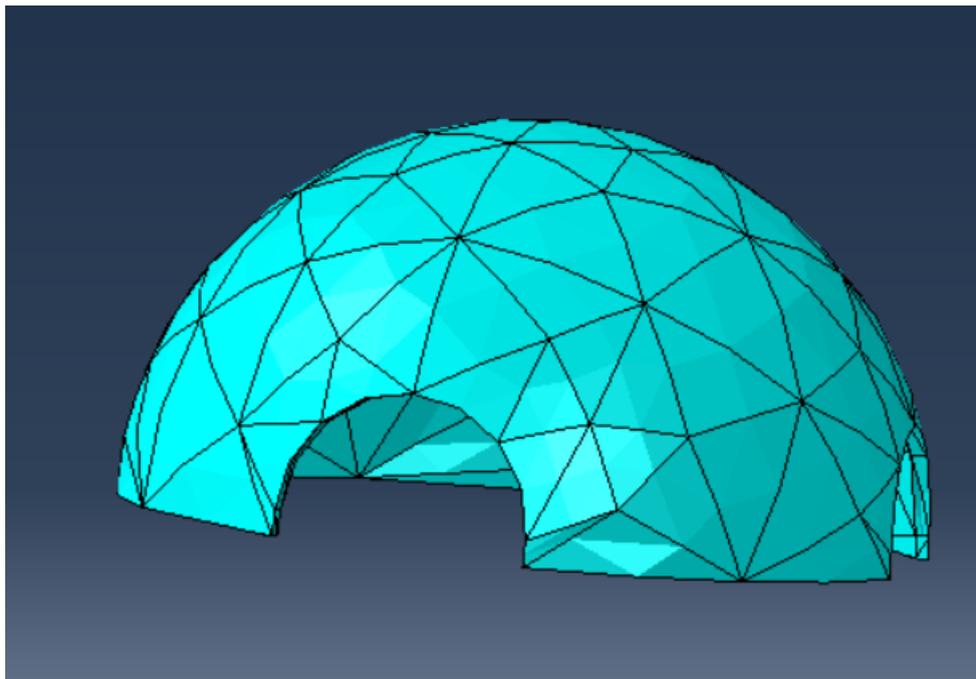


Figura 27: Mallado de la estructura

Una vez finalizado el mallado es el turno de correr la simulación y obtener los resultados.

Los resultados obtenidos en el ensayo fueron satisfactorios lo que supone que bajo las condiciones asumidas de presión atmosférica y posibles impactos, la estructura sería capaz de aguantar al estar construida por impresión 3D con regolito marciano como se puede ver a continuación.

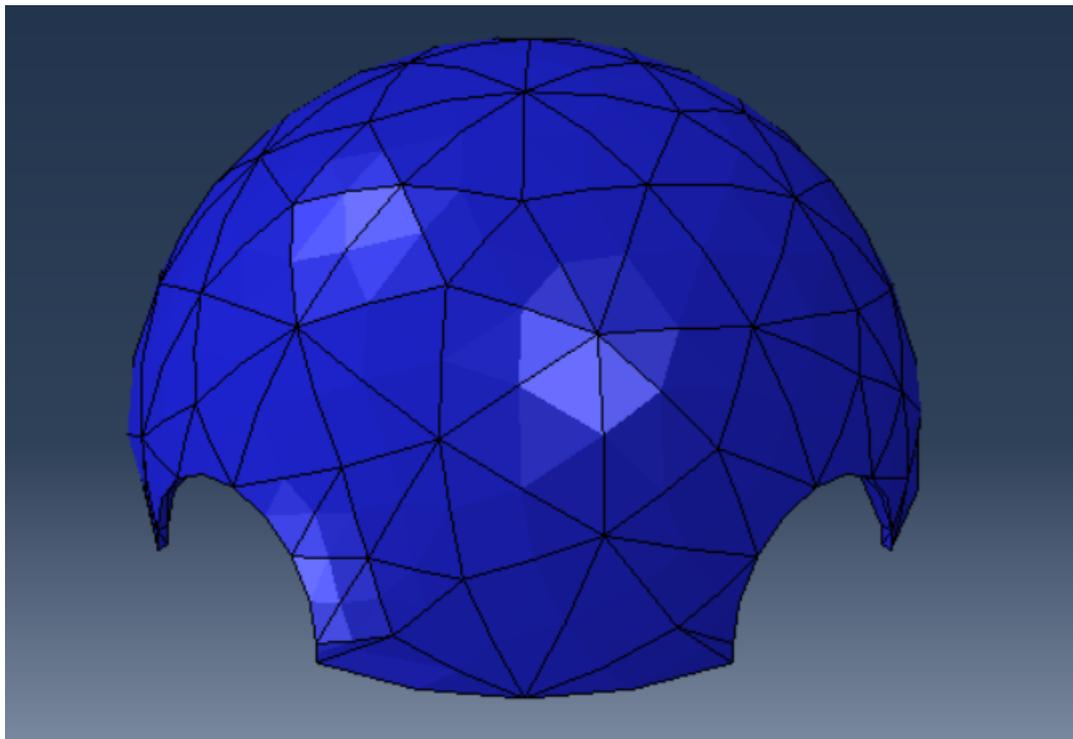


Figura 28: Deformaciones en la estructura

La imagen anterior (Figura 28) se corresponde a las deformaciones sufridas por la cubierta antes estas cargas. Podemos observar que no hay ningún valor anormal y que es perfectamente capaz de soportarlas. Si bien, como ya se ha comentado, los resultados no son exactos y un análisis más exhaustivo y con mayor número de nodos y elementos daría una mejor distribución de las deformaciones sufridas por la cubierta y un valor más exacto de ellas, pero si da una idea de que esta es perfectamente capaz de aguantar las condiciones marcianas a las que se verá expuesta.

5. Estudio de factibilidad, posibles problemas y siguientes pasos

Por último, y no menos importante, es interesante realizar un estudio de factibilidad de este proyecto, tanto en términos tecnológicos como en monetarios.

5.1. Factibilidad tecnológica

En cuanto a la tecnología, como hemos ido viendo a lo largo del trabajo, muchas de las propuestas o ya se han probado o están siendo probadas en Tierra. Los estudios de BIOWYSE y TIME SCALE, se desarrollaron con éxito, MOXIE está consiguiendo grandes avances en Marte con el Perseverance y los ensayos en Tierra de la máquina excavadora para recoger el regolito son muy prometedores. En cuanto a la tecnología de los robots capaces de recoger el material e imprimir la cubierta, no se han realizado pruebas con el material, pero es una tecnología disponible y ampliamente usada en otros proyectos y con otros materiales, por lo que no son esperables grandes inconvenientes en este aspecto.

Los módulos inflables se vienen estudiando desde la década de los 60 del siglo pasado y no solo hay innumerables pruebas realizadas con éxito sino que es una tecnología en uso hoy en día en el espacio.

El mayor problema en cuanto a factibilidad tecnológica podría venir en cuanto al cohete o el modo de llegar hasta Marte. El viaje espacial tripulado lleva muchos años sin ser realizado más allá de la Estación Espacial Internacional (ISS) y nunca antes se había propuesto un objetivo tan ambicioso como Marte y lo que ello conlleva. Haría falta un cohete de proporciones y características nunca antes desarrollado, dada la duración y longitud del viaje.

Afortunadamente, este mismo año en el mes de abril, se hizo la primera prueba de vuelo del cohete Starship de la compañía SpaceX, que tiene como objetivo el llevar a personas a Marte. A pesar de que el cohete acabó explotando tras un fallo en el intento de separación de los dos grandes cohetes de los que está formado, los empleados de SpaceX tomaron esta primera prueba como un éxito y de la que podrían extraer muchas lecciones para el futuro. Esta primera prueba de vuelo nos acerca a tener un transporte hasta Marte en un futuro bastante próximo.

5.2. Factibilidad económica

Una vez que hemos visto que, o ya disponemos de la tecnología o esta está bastante cerca de ser probada con éxito, queda el sempiterno problema de la financiación.

Durante la guerra fría se hicieron innumerables avances en la conquista del espacio durante la carrera espacial debido a que ambos bandos (Estados Unidos y la URSS) veían la inversión en esta carrera espacial como algo necesario para demostrar su superioridad tecnológica frente al bando contrario. Pero desde la caída del comunismo y disolución de la URSS, el gasto en el sector espacial se ha desplomado en el mundo. La mayoría de proyectos fueron viendo reducir sus fondos disponibles y los programas tripulados se abandonaron (excepto a la ISS) ya que no era rentable ni práctico mandar astronautas al espacio y los proyectos que permanecieron fueron en su mayoría relativos a satélites (comunicación, meteorología, estudio del universo, etc.).

Sin embargo, la llegada al mercado de compañías privadas como SpaceX, ha hecho que el interés por los viajes espaciales vuelva a estar de actualidad, no solo en el público general, sino también entre los Estados y Agencias Espaciales.

La NASA lleva ya unos años muy interesada en la idea de retomar los viajes espaciales tripulados, con proyectos que están destinados primero en volver a la Luna para más tarde poner sus miras

en Marte para la década de 2030. La Administración Espacial Nacional de China (CNSA) también ha estado realizando estos últimos años misiones encaminadas a viajes espaciales tripulados (como el aterrizaje en la cara oculta de la Luna, la creación de su propia estación espacial o el envío de satélites orbitadores de Marte). Incluso la Agencia Espacial Europea (ESA) abrió en el 2021 una nueva convocatoria de reclutamiento de astronautas por primera vez desde el 2008.

Pero sin duda alguna, es una compañía privada, SpaceX, la que mayor ambición y financiación ha estado poniendo en la llegada de humanos a la Tierra. La intención de Elon Musk, su fundador y CEO, es llevar humanos a Marte en 2024. Aunque quizá esta cifra pueda ser muy ambiciosa, dadas las magnitudes de un proyecto así y el poco tiempo que queda, SpaceX está haciendo todo lo posible por llegar a este objetivo, si no en 2024, lo antes posible. Y como prueba de ello, tenemos todos los avances realizados por ellos en materia de viajes espaciales, culminando en la anteriormente comentada primera prueba de vuelo de la Starship.

Por lo tanto, podemos concluir que tanto tecnológica como económicamente, el proyecto de creación de un hábitat humano en Marte es no solo factible, sino que lo será en un futuro cercano.

5.3. Problemas a encontrar, siguientes pasos y mirada a futuro

Aunque pueda parecer que la llegada a Marte de seres humanos está próxima en el tiempo, lo cierto es que todavía quedan muchos pasos por dar y mucho que investigar para que esto se de. Como ya se ha mencionado anteriormente en este mismo trabajo, al ser un proyecto en el que entra en juego un elevado coste económico y además agregando el componente de poner vidas humanas en riesgo, los factores de seguridad, el testing y la preparación previa deben ser de la más alta prioridad.

Los principales problemas que tanto los equipos en Tierra que están actualmente trabajando como los propios astronautas que un día llegarán a la superficie marciana se van a encontrar serán muchos y muy variados, y sus ámbitos van desde lo tecnológico, hasta lo fisiológico o lo psicológico.

La fortaleza psicológica y la sensación de clausura y soledad son aspectos a los que cualquier astronauta ha de hacer frente, pero en un viaje de estas características se eleva exponencialmente con respecto a cualquier misión que se haya llevado a cabo anteriormente. No solo el viaje hasta el destino es unas 100 veces más duradero que lo que tardaron en su momento los astronautas de las misiones Apolo, sino que una vez allí y para que dicho viaje y sus experimentos valgan la pena, deberán permanecer allí entre 1 y 2 años (de 2 a 4 veces más de lo que suele durar una estancia en la ISS actualmente).

Fisiológicamente los cuerpos también sufrirán muchísimo, estarán expuestos a radiación del Sol y rayos cósmicos de los que se tendrán que proteger gracias a escudos en la propia nave o a la cubierta que se ha desarrollado en este trabajo. Durante el viaje deberán mantenerse activos para evitar la atrofia muscular y una vez en Marte además deberán luchar contra la falta de luz y los posibles problemas de salud que vivir en Marte por un período prolongado de tiempo les puede acarrear.

El impacto para los astronautas de la vida en Marte (para el cuerpo y para la mente) es un aspecto crucial que se debe investigar y en el que todavía hay muchos avances que se pueden hacer y una gran forma de complementar y seguir avanzando para llegar al planeta rojo.

La mirada a futuro en cuanto a la llegada humana a Marte y la creación de un hábitat en el planeta rojo pasa por muchos frentes, y en primer lugar, por desarrollar la tecnología para poder llegar de forma segura hasta allí. En este trabajo no se ha hablado del tema de la nave que llevará a los astronautas hasta Marte y es sin duda uno de los aspectos claves a investigar y a tener en cuenta si se quiere profundizar. Desde los cohetes, el combustible propulsor, sistemas que puedan hacer la

nave o los sistemas abordo más livianos, cualquier avance por pequeño que pueda parecer, puede ser de una importancia suprema en términos de dinero, confort o prosperidad de la misión.

Los otros grandes desafíos son la producción de energía y de agua y comida en Marte. Para el éxito y la viabilidad de la misión, es imprescindible que los astronautas puedan producir alimento en forma de bebida y comida in situ y no tener que depender de recursos llevados desde la Tierra. También el hecho de generar energía en Marte, no solo para llevar a cabo los experimentos científicos sino para que los sistemas de apoyo a la vida estén operativos. En este trabajo se han propuesto algunas ideas y teorías respecto a estos aspectos, pero es algo que incluso antes de enviar el enjambre de robots a empezar a construir la cubierta protectora, que es algo que se haría bastante antes de llevar a las personas, debería estar como mínimo encauzada y testeada la idea que se llevará a cabo. A fin de cuentas, sin agua, comida o energía, la vida de seres humanos en Marte sería imposible, y sin personas, la creación de un hábitat en Marte es de total inutilidad.

En cuanto a este estudio en concreto, los pasos a seguir en el futuro pasan por un estudio real y más exhaustivo para verificar la viabilidad de la estructura protectora. Más en concreto, estudio de los materiales de fabricación. Un estudio de piezas con una curvatura similar a la de los puntos más críticos bajo tracción y torsión y también sería muy interesante un estudio de bombardeo de proyectiles (micrometeoritos). El tema de la radiación, que se ha tocado brevemente en esta tesis es un gran “siguiente paso”, con la posibilidad de hacer un estudio de materiales y capas aislantes.

Y por supuesto, el montaje de la estructura. En esta tesis se referencia por ejemplo la Mars Ice Home u otras misiones con las que se puede hacer un estudio comparativo del montaje de estructuras espaciales que ya tienen un arraigo o al menos una primera aproximación a nivel industrial.

6. Referencias

- [1] M. S. Team, *Global topographic map of Mars*. dirección: <https://attic.gsfc.nasa.gov/mola/images.html>.
- [2] J. B. (University), *Image of Mars and Martian features identified*. dirección: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2001/24/1091-Image.html?news=true>.
- [3] J. Caballero, A. Gómez y J. M. Calderón, *DAVE Proyecto Grupal: Journey to Mars*, Abr de 2021.
- [4] D. Vaughan, H. C. Miller, B. Griffin, B. F. James y M. M. Munk, “A Comparative Study of Aerocapture Missions with a Mars Destination,” 2005.
- [5] *Mars Pathfinder Airbags*. dirección: <https://mars.nasa.gov/MPF/mpf/mpfairbags.html>.
- [6] NASA/JPL-Caltech, *Mars Probe Landing Ellipses*. dirección: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA24377>.
- [7] R. R. Gilruth y col., *Apollo Lunar Landing Mission Symposium*, jun. de 1966. dirección: https://www.hq.nasa.gov/alsj/LunarLandingMissionSymposium1966_1978075303.pdf.
- [8] M. Armano, *Dynamics of Atmospheric Reentry*, mar. de 2021.
- [9] G. Cushing, *The Caves of Mars—US Geological Survey*, jul. de 2019. dirección: <https://www.usgs.gov/news/caves-mars>.
- [10] —, *Mars Global Cave Candidate Catalog (MGC³)*, jun. de 2017. dirección: https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Mars/MarsCaveCatalog/mars_cave_catalog.
- [11] K. Kornei, “House-Hunting on Mars Has Already Started,” *New York Times*, oct. de 2022.
- [12] NASA, PDS, JPL y USGS, *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)*. dirección: https://pds-imaging.jpl.nasa.gov/portal/mro_mission.html.
- [13] A. Daga, “Lunar and Martian Lava Tube Exploration as Part of an Overall Scientific Survey,” 2017.
- [14] A. J. Paris, “Prospected Lava Tubes at Hellas Planitia,” 2019.
- [15] A. G. Fairén y col., “Prime candidate sites for astrobiological exploration through the hydrogeological history of Mars,” 2005.
- [16] J. Didymus, “Scientists find evidence Mars subsurface could hold life,” *Digital Journal*, ene. de 2013.
- [17] E. Gillard, *A New Home on Mars: NASA Langley’s Icy Concept for Living on the Red Planet*. dirección: <https://www.nasa.gov/feature/langley/a-new-home-on-mars-nasa-langley-s-icy-concept-for-living-on-the-red-planet>.
- [18] SEArch+, *Mars Ice Home - Space Exploration Architecture*. dirección: <http://www.spacearch.com/mars-ice-home>.
- [19] C. AO, *Mars Ice Home - Clouds Architecture Office*. dirección: <https://cloudsao.com/MARS-ICE-HOME>.
- [20] *Martian regolith simulant*. dirección: https://en.wikipedia.org/wiki/Martian_regolith_simulant.
- [21] *Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR) Excavator*. dirección: <https://technology.nasa.gov/patent/KSC-TOPS-7>.
- [22] R. Mueller, R. Cox, T. Ebert y J. D. Smith, “Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR),” *ResearchGate*, dirección: https://www.researchgate.net/publication/261248231_Regolith_Advanced_Surface_Systems_Operations_Robot_RASSOR.
- [23] K. W. Leucht, “How NASA will use robots to create rocket fuel from martian soil,” *IEEE Spectrum*, dirección: <https://spectrum.ieee.org/how-nasa-will-use-robots-to-create-rocket-fuel-from-martian-soil>.
- [24] *RASSOR*. dirección: <https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/RASSOR>.

- [25] L. Duri y col., “The Potential for Lunar and Martian Regolith Simulants to Sustain Plant Growth: A Multidisciplinary Overview,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, ene. de 2022. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2021.747821/full>.
- [26] U. of California - San Diego, “Engineers investigate a simple, no-bake recipe to make bricks from Martian soil,” *Science Daily*, abr. de 2017. dirección: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/04/170427091723.htm>.
- [27] Hassell y EOC, *3D printed Mars Habitat*, 2018. dirección: <https://spacearchitect.org/portfolio-item/3d-printed-mars-habitat-3rd-phase-of-nasas-centennial-challenge/>.
- [28] *NASA 3D printed Habitat Challenge*. dirección: <https://www.hassellstudio.com/project/nasa-3d-printed-habitat-challenge>.
- [29] R. Gatens, *Evolution of the ISS ECLSS to the Exploration ECLSS*, sep. de 2016. dirección: <https://slideplayer.com/slide/12506099/>.
- [30] E. Linck y K. W. Crane, *Evaluation of Human Mission to Mars by 2033*, feb. de 2019. dirección: <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/e/ev/evaluation-of-a-human-mission-to-mars-by-2033/d-10510.ashx>.
- [31] G. D. Valle, J. J. Zipay, D. Litteken y E. Christiansen, “System Integration Comparison Between Inflatable and Metallic Spacecraft Structures,” mar. de 2019. dirección: https://www.researchgate.net/publication/333919095_System_Integration_Comparison_Between_Inflatable_and_Metallic_Spacecraft_Structures.
- [32] H. De la Fuente y et al, “TransHab: NASA’s Large Scale Inflatable Spacecraft,”
- [33] R. Bigelow y B. Aiken, *Flexible Structural Restraint Layer for Use with an Inflatable Modular Structure*, 2006.
- [34] *NASA-STD-5001, NASA Technical Standard: Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware*.
- [35] *European Columbus laboratory*. dirección: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Columbus/European_Columbus_laboratory.
- [36] *Cygnus*. dirección: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_(spacecraft)).
- [37] *Skylab*. dirección: <https://en.wikipedia.org/wiki/Skylab>.
- [38] *Center of Applied Space Technology and Microgravity*. dirección: <https://www.zarm.uni-bremen.de/en.html>.
- [39] O. Zivkovic, “A new base to enable human life on Mars,” Dic de 2019. dirección: <https://www.dw.com/en/work-and-live-on-mars-inside-a-new-base-developed-for-future-missions/a-51738228>.
- [40] A. Abel y col., “Photovoltaics-Driven Power Production Can Support Human Exploration on Mars,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, abr. de 2022. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2022.868519/full>.
- [41] J. S. Sia, “ISRU Part III: How to Generate Energy on Mars,” *Mars Society of Canada*, sep. de 2020. dirección: <https://www.marssociety.ca/2020/09/16/isru-part3/>.
- [42] NASA, *Basics of Space Flight - Solar System Exploration: NASA Science*. dirección: <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter18-1/>.
- [43] E. Press, *La NASA actualiza al láser sus comunicaciones de espacio profundo*, feb. de 2020. dirección: <https://www.notimerica.com/ciencia-tecnologia/noticia-nasa-actualiza-laser-comunicaciones-espacio-profundo-20200212144354.html>.
- [44] *MOXIE*. dirección: <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/moxie/>.
- [45] J. O’Callaghan, “The food and water systems astronauts will need to travel to places like Mars,” mayo de 2020. dirección: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/>

- horizon-magazine/food-and-water-systems-astronauts-will-need-travel-places-mars.
- [46] *BIOWYSE*. dirección: <https://biowyse.eu/>.
- [47] *Biocontamination Integrated cOntrol of Wet sYstems for Space Exploration*. dirección: <https://cordis.europa.eu/project/id/687447>.
- [48] *Technology and Innovation for Development of Modular Equipment in Scalable Advanced Life Support Systems for Space Exploration*. dirección: <https://cordis.europa.eu/project/id/640231>.
- [49] D. Karl, K. Cannon y A. Gurlo, “Review of space resources processing for Mars missions: Martian simulants, regolith bonding concepts and additive manufacturing,” *Open Ceramics*, mar. de 2022. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666539521001620#bib133>.
- [50] K. Grossman, “Regolith-Based Construction Materials for Lunar and Martian Colonies,” *University of Central Florida*, ene. de 2019. dirección: <https://stars.library.ucf.edu/etd/6165/>.
- [51] B. W. Kemmerer, “A Compositional Analysis of Artificial and Terrestrial Analog Martian Regolith Simulants,” *Florida Tech*, dic. de 2019. dirección: <https://repository.lib.fit.edu/handle/11141/3033#:~:text=The%20global%20Martian%20regolith%20composition,sulfates%2C%20carbonates%2C%20and%20clays..>
- [52] —, “Robust and Elastic Lunar and Martian Structures from 3D-Printed Regolith Inks,” *Scientific Reports*, mar. de 2017. dirección: <https://www.nature.com/articles/srep44931.pdf>.
- [53] A. Mintus, *Building with Martian Regolith*.
- [54] D. Williams, *Mars Fact Sheet*.
- [55] S. Sen, S. Carranza y S. Pillay, “Multifunctional Martian habitat composite material synthesized from in situ resources,” sep. de 2010. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117710002486?via%3Dihub>.