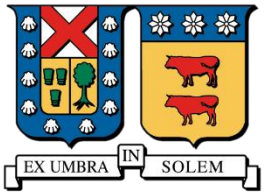
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

“BASE CIENTIFICA PARA EXPLORACION DE MINERALES EN PLANETA MARTE”

Elaborado por:

Cristian Casich Vargas

Profesor:

Víctor Encima

Santiago, 10 de abril de 2025

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: BASE CIENTIFICA PARA EXPLORACION DE MINERALES EN PLANETA MARTE

Nombre del candidato(a): Cristian Ignacio Casich Vargas

Carrera / Grado: Ingeniero civil de minas

Campus: Santiago San Joaquin **;** **Departamento**: Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20-08-2025 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06-08-2025 ; **Firma:** _____

Esteformulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Contenido

Resumen 4
Agradecimientos 5
Introducción 6
Antecedentes generales 7
Objetivos y Alcances 9
Objetivo general 9
Objetivos Específicos 9
Desarrollo 10
Contexto de la investigación 10
Caracterización de Marte 10
Producción elementos vitales 15
Oxígeno 16
Agua 18
Energía 19
Energía Solar 19
Energía eólica 19
Estructura 20
Cultivos 22
Conclusión 25

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta conceptual para la implementación de una base científica en Marte, abordando los principales desafíos asociados a la habitabilidad humana, el aprovechamiento de recursos locales y la sostenibilidad tecnológica. Se analizan las condiciones ambientales del planeta rojo, tales como su baja presión atmosférica, temperaturas extremas y altos niveles de radiación, y su impacto en la vida humana. Asimismo, se evalúan tecnologías actuales y emergentes para la producción de oxígeno, agua, energía y alimentos, considerando su aplicación en un entorno marciano. Se propone un modelo de base modular y autosuficiente, construido con recursos del propio planeta como el regolito, mediante impresión 3D y estructuras presurizadas. Finalmente, se integran soluciones de soporte vital y protección que permiten una instalación básica con las capacidades tecnológicas actuales, abriendo el camino hacia una futura presencia humana estable y segura en Marte.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que me acompañaron en este proceso universitario.

Partir con mis padres, Andrea Vargas y Alfonso Casich, ambos son pilares de mi vida y me ayudaron a ser la persona que soy hoy en día. Agradezco su apoyo incondicional siempre, por acompañarme en los momentos más difíciles de la universidad, por siempre motivarme, por siempre darme un consejo o simplemente por estar para mí. Los amo.

Agradecer a mi hermana, la cual siempre ha estado para mí a pesar de las diferencias que podamos tener, es alguien en quien siempre podré contar para el resto de mi vida, no se lo digo mucho, pero la quiero mucho. Alguien que trajo 2 personitas maravillosas a mi vida, mis dos sobrinas Emilia y Maite, son personas que quiero mucho y no me imagino mi vida sin ellas presentes.

Agradecerle a mi Polola, Paloma, ella me ha ayudado a crecer como persona, ella me acompaña en este proceso final, me acompaño en mis malos momentos y en los buenos, cuento con ella para todo.

No puedo no nombrar a mi grupo de la universidad, ellos me acompañaron casi desde el día 1 de la universidad, donde vivimos muchas experiencias entre universidad normal, online e hibrida. Gracias por las tardes de estudio que terminaban con un completo, por los trabajos hasta tarde que iban acompañados de risas y buenos recuerdos, gracias por ser amigos y no solo compañeros, cuento con ellos por mucho tiempo más, no quiero decir el nombre del grupo porque siempre cambia, pero agradecerle a Andrés, Jamiro, Allan, Jaime, Koke, Guille, Zaira, Lucas y Gonzalo, fueron pilares fundamentales en el tiempo de universidad.

También agradecerles a mis amigos de muchos años, los del colegio, me acompañaron desde el día 1 y se interesaron por mí, agradecerle especialmente a Juan Ignacio y Nicolas, mis amigos más cercanos que espero nunca me falten en mi vida.

También a mis tíos, mi tía Maggi y Tío Cristian, son personas que siempre han estado en mi vida y me han apoyado para que yo sea un gran profesional y persona, gracias también por traer a mi vida a mi Tío Juan y mi tía Andrea, y a sus familias, mis primos que los quiero mucho, espero poder ser un ejemplo para los menores.

Y para el final, unas personas que quiero mucho y admiro, Mis abuelos, agradecer a mi Mami, ella me regaloneo y me quiere tal como soy, por sus regalos, por sus cariños por todo lo que ha dado por mí, no tengo más palabras que de agradecimientos. Por otro lado, mi Tata, que lamentablemente no podrá acompañarme en este proceso final, pero sé que me está observando desde el cielo y me gustaría dedicarle todo mi esfuerzo de la universidad a él, una persona que a pesar de las adversidades salió adelante con su familia, crio una gran mujer como lo es mi madre, gracias Tata, lo amo y lo extraño.

Introducción

Desde los inicios de la exploración espacial, la humanidad ha buscado expandir sus fronteras más allá de la Tierra, con el objetivo de comprender el universo y asegurar su permanencia en él. Entre los cuerpos celestes de nuestro sistema solar, Marte se presenta como el candidato más atractivo para albergar futuras misiones tripuladas y establecer asentamientos humanos permanentes. Este interés surge no solo de su relativa cercanía a la Tierra, sino también de su potencial científico, sus similitudes geológicas y la posibilidad de encontrar recursos que permitan sostener la vida en un entorno extremo.

Sin embargo, Marte es un planeta hostil. Su atmósfera es cien veces más delgada que la terrestre, compuesta en su mayoría por dióxido de carbono, lo que limita la respiración y la protección contra la radiación solar y cósmica. Sus temperaturas promedio rondan los –60 °C y varían de manera extrema según la latitud y la estación. Además, las tormentas de polvo globales, la escasez de agua líquida en superficie y la baja presión atmosférica representan obstáculos significativos para cualquier intento de colonización o establecimiento de una base científica. A pesar de estas dificultades, los avances tecnológicos actuales han abierto la posibilidad de diseñar hábitats, sistemas de soporte vital y métodos de producción de recursos que podrían hacer viable la presencia humana en Marte, al menos en forma inicial y experimental.

En este contexto, el desarrollo de una base científica en Marte se plantea como un paso intermedio esencial entre la exploración robótica y la colonización permanente. Tal base tendría múltiples propósitos: servir como plataforma de investigación sobre el planeta, validar tecnologías de habitabilidad en condiciones extremas, y generar experiencias que permitan a la humanidad proyectar su expansión a otros mundos. Para lograrlo, se requiere una planificación integral que aborde diversos aspectos, desde la producción de oxígeno, agua, energía y alimentos, hasta la construcción de estructuras protectoras frente a la radiación y la creación de sistemas autosuficientes que minimicen la dependencia de suministros terrestres.

Este trabajo busca proponer un modelo conceptual de base científica en Marte, considerando los principales desafíos y soluciones tecnológicas disponibles en la actualidad. Se analizan las condiciones ambientales del planeta, se evalúan los métodos de aprovechamiento de recursos locales como el regolito y el hielo de agua, y se examinan tecnologías emergentes como la impresión 3D, la generación de oxígeno mediante procesos experimentales como MOXIE, y la agricultura en ambientes controlados. La propuesta también contempla aspectos de protección y sostenibilidad, integrando la seguridad de los astronautas, el reciclaje de recursos y la autonomía operativa como ejes centrales.

En conclusión, aunque hoy en día solo es posible concebir una base marciana básica y de carácter experimental, el desarrollo de este tipo de proyectos abre el camino para futuras instalaciones más complejas y autosuficientes. De este modo, la construcción de una base científica en Marte no solo representa un desafío tecnológico y científico sin precedentes, sino también un hito histórico en el camino de la humanidad hacia su expansión interplanetaria.

Antecedentes generales

La minería espacial representa un horizonte fascinante en la exploración del sistema solar, fusionando la ambición científica con la perspectiva económica. Se han presentado varios viajes espaciales durante la historia de la humanidad, siempre con primer foco científico, pero al paso del tiempo se realizaron viajes con el fin de poder realizar planes de extracción de minerales fuera del planeta tierra, hay varios casos sobre minería en el exterior como en asteroides en primera instancia y generando planes para extraer de planetas aledaños a la tierra. Como ejemplos claros de minería espacial tenemos los siguientes:

- **Hayabusa-2**: Es una misión pionera diseñada para explorar y recolectar muestras de un asteroide cercano a la Tierra llamado Ryugu. Este fue lanzado en 2014 y luego de varias maniobras y observaciones antes de llegar a su destino en junio de 2018. Para esta misión se le equipo de la mejor tecnología de la fecha sea para la exploración como para el aterrizaje. Esta misión fue un avance para la capacidad de recolectar información sobre el sistema solar.

- **OSIRIS-Rex:** Es una iniciativa de la NASA diseñada para estudiar y recolectar muestras de un asteroide cercano a la tierra llamado Benuu. Este fue lanzado en 2014 para luego aterrizar en 2018 para la recolección de información y muestras en el asteroide y retornar al planeta tierra.

Estos son de las principales misiones sobre minería espacial como tal, pero no solo se piensa en extraer o estudiar asteroides, se planea también poder extraer recursos de otros planetas, pero antes de poder pensar en la extracción se debe conocer que recursos se pueden encontrar en los cuerpos celestes del sistema solar, para avanzar en esta área se han realizado una serie de misiones para recaudar información para futuro, por motivos de esta memoria se profundiza en la siguiente misión realizada por la NASA:

- **Curiosity Rover:** Este fue lanzado en noviembre de 2011 para aterrizar en Marte en Agosto de 2012, este fue diseñado para explorar el cráter Gale, una cuenca profunda en la superficie marciana. El curiosity lleva una serie de instrumentos científicos sofisticados, como un taladro par perforar rocas y muestras de suelo, un espectrómetro de masas y cámaras de alta resolución para examinar la geología marciana, este mismo cuenta con un equipo capaz de analizar la composición química y mineralógica de las rocas, estos datos son valiosos para saber sobre la historia geológica y la posibilidad de vida pasada en Marte.

- **Perseverance Rover:** Este fue lanzado en Julio de 2020 y aterrizo en el planeta rojo en febrero de 2021, tiene como objetivo explorar la región conocida como el cráter Jezero, que contiene un antiguo delta de río, para este Rover se le equipo con instrumentos que puedan buscar signos de vida antigua, un sistema de muestreo de rocas y suelo. Un apartado muy importante de esta misión es el equipo de radar llamado RIMFAX, que puede penetrar en el subsuelo para estudiar geología y la composición de capas bajo la superficie marciana.

La minería espacial comenzó como una idea especulativa en la ciencia ficción, popularizada por autores como Isaac Asimov y Arthur C. Clarke, que imaginaron civilizaciones

aprovechando recursos de la Luna o asteroides para su expansión. Durante la carrera espacial, se planteó teóricamente como un apoyo para misiones, con estudios que identificaron el agua y metales preciosos en asteroides y la Luna como recursos valiosos para producir combustible o sostener colonias espaciales. En las décadas de 2010, el interés comercial despegó con empresas como Planetary Resources y leyes en Estados Unidos y Luxemburgo que legalizaron la explotación privada de recursos extraterrestres. Misiones como Hayabusa2 y OSIRIS-REx demostraron la posibilidad técnica de recolectar materiales, mientras que iniciativas gubernamentales, como el programa Artemis de la NASA, comenzaron a integrar el uso de recursos espaciales en sus planes. Hoy, la minería espacial ha evolucionado de un concepto teórico a un sector estratégico y comercial, con un enfoque en tecnologías avanzadas, sostenibilidad y su impacto en la economía global, enfrentando desafíos éticos y legales mientras promete ser clave en la exploración y colonización espacial.

En resumen, los antecedentes de la minería espacial nos han llevado a través de décadas de exploración y descubrimientos, desde las primeras teorías hasta las misiones pioneras que han tocado la superficie de asteroides distantes y recolectando muestras para su análisis en la tierra. Estas misiones nos han proporcionado una visión sin precedentes de los recursos disponibles en el espacio, desde la Luna hasta Marte y en el sistema solar. Gracias a los avances en la tecnología espacial, la colaboración internacional y la insaciable curiosidad humana a puesto lo cimientos de una minería espacial que dejo de ser una teoría o una idea, sino que se está convirtiendo en una realidad palpable.

Objetivos y Alcances

Objetivo general

- Desarrollar un plan para la creación de una base científica en Marte, abordando los principales desafíos relacionados con la supervivencia humana, la producción de recursos esenciales y la sostenibilidad a largo plazo.

Objetivos Específicos

- Analizar las condiciones ambientales de Marte y su impacto en la habitabilidad humana, incluyendo la radiación, la presión atmosférica y las temperaturas extremas.
- Evaluar tecnologías para la producción de oxígeno, agua y energía, considerando soluciones como MOXIE, extracción de hielo marciano y generación de electricidad mediante paneles solares y reactores nucleares.
- Investigar métodos de construcción eficientes, como el uso de impresión 3D con regolito marciano, para la creación de hábitats seguros y autosuficientes.
- Diseñar estrategias para el cultivo de alimentos en Marte mediante invernaderos presurizados, sistemas hidropónicos y aeropónicos, garantizando una fuente sostenible de nutrientes para los astronautas.

Desarrollo

Contexto de la investigación

Desde hace décadas, la humanidad ha dirigido su mirada hacia Marte como el próximo gran paso en la exploración espacial. La idea de conquistar el planeta Marte y establecer una base científica ha evolucionado a partir de la curiosidad natural del ser humano por lo desconocido y del deseo de expandir nuestra presencia más allá de la tierra.

A medidas del siglo XX, con los primeros avances en la astronáutica y los logros del programa espacial, Marte comenzó a ser visto no solo como un objetivo de exploración robótica, sino como un destino potencial para misiones tripuladas. Las primeras misiones no tripuladas, como las sondas Viking en la década de 1970, enviadas por la NASA, proporcionaron información crucial sobre la composición del suelo marciano, su atmosfera y la posible existencia de agua, elementos esenciales para evaluar la viabilidad de una futura colonización.

A lo largo de décadas de exploración espacial, diversas misiones han recopilado una gran cantidad de información sobre Marte, permitiendo a los científicos comprender mejor sus características. En los siguientes apartados, se describirán las principales propiedades del planeta rojo según los estudios previos, incluyendo su composición atmosférica, su geología, la presencia de agua en forma de hielo y los factores que podrían afectar la habitabilidad humana. Gracias a los datos obtenidos por sondas orbitales, rovers y misiones como las de la NASA y la ESA, se ha logrado identificar aspectos clave de su clima, la presencia de tormentas de polvo, la variabilidad de sus temperaturas extremas y la radiación que impacta su superficie. Estos estudios no solo han permitido ampliar nuestro conocimiento sobre Marte, sino que también han sido fundamentales para evaluar su potencial como un lugar para futuras exploraciones tripuladas y la posible instalación de una base científica.

El planeta marte es uno de los planetas del sistema solar, siendo el segundo más pequeño y el cuarto en orden de distancia del Sol. Presenta una superficie sólida, polvorienta fría y desértica. Su nombre proviene de la mitología romana, en homenaje al dios de la guerra (el color rojizo de su superficie representaba a la sangre derramada en las batallas). También se lo conoce como “el planeta rojo” y puede ser visto desde la Tierra.

La NASA tiene evidencias de 57 meteoritos que podrían ser provenientes de Marte y que impactaron con la Tierra en diversos momentos de la historia. Las muestras obtenidas de las misiones espaciales son constantemente comparadas con los materiales encontrados en el suelo terrestre.

Los siguientes tres meteoritos son los considerados como los mayores que contienen indicios de moléculas orgánicas naturales provenientes de Marte: ALH84001 (meteorito encontrado en 1984 en la Antártida), Nakhla (meteorito encontrado en Egipto en 1911) y Shergotty (meteorito encontrado en 1865 en India).

Caracterización de Marte

El tamaño de Marte es la mitad del de la Tierra, cuenta con una masa 10 veces menor y la fuerza de la gravedad en su superficie es el 38% de la nuestra. Gira alrededor del sol en 687 días y le separan del mismo 70 millones de kilómetros más.

Marte presenta estaciones, que duran el doble que, en la Tierra, debido básicamente a la inclinación de su eje de rotación que es de 25°, también tiene casquetes polares y una atmosfera ligera. Una similitud con la Tierra es la duración de sus días, con algo más de 24 horas de periodo de rotación. A pesar de todo, al carecer de vida (hasta donde somos capaces de saber, hoy en día) y de otros elementos que puedan presentar cambios estacionales, salvo variaciones en las masas de hielo polar y el oscurecimiento de zonas de su superficie, esas estaciones no provocan demasiados cambios en el paisaje. La sensación que se podría tener sería parecida a la existente en un desierto, pero con un clima ártico, 7 hPa de presión atmosférica en superficie, temperatura media de unos −50°C durante el día (casi siempre soleado), aunque en verano y en zonas ecuatoriales se pueden registrar hasta +20°C, que llega a descender hasta −80°C durante la noche, y una tenue capa de ozono insuficiente para detener la radiación solar ultravioleta.

La atmosfera de Marte está constituida principalmente por dióxido de carbono (95,3%), nitrógeno (2,7%), argón (2,7%)

El planeta Marte es más pequeño, es la mitad de la Tierra como se muestra en la *ilustración 1*, cuenta con una masa 10 veces menor y la fuerza de gravedad es el 38% de la nuestra, gira alrededor del sol en 687 días y le separan del mismo 70 millones de kilómetros más. Por otra parte, Marte presenta estaciones que duran el doble que, en la Tierra, los días tienen duración similar alrededor de 24 horas.



Ilustración 1: Planeta Tierra y Marte

La temperatura del planeta rojo es muy diferente al planeta tierra, ya que, la mayor parte del planeta se encuentra a unos -50°C durante el día, pero en verano y en zonas ecuatoriales pueden alcanzar temperaturas de 20°C, aunque en las noches estas descienden hasta -80°C, y una tenue capa de ozono insuficiente para detener la radicación solar ultravioleta.

La radiación de Marte proviene del sol y del espacio exterior (galaxias lejanas, estrellas y supernova). Las tormentas solares son muy difíciles de predecir y liberan enormes cantidades de radiación en muy poco tiempo, principalmente en forma de protones. En la superficie de nuestro planeta, producen preciosas auroras en el cielo. Pero en el espacio exterior pueden ser realmente letales.

Por su parte, la radiación espacial es una amenaza que está presente de manera constante. También se compone principalmente de protones, pero además contiene elementos pesados como el hielo

o el hierro, mucho más peligrosos y energéticos. Estos son capaces de desintegrar los átomos del material con el que chocan, ya sea las paredes metálicas de una nave, un satélite o una persona. En el proceso generan a su vez una cascada de particulas subatómicas o radiación secundaria muy dañina.

Gracias a la atmosfera protectora y al campo magnético, en la Tierra estamos resguardados de esta agresión. Sin embargo, en un futuro viaje a Marte, las astronautas estarán expuestos a una cantidad 700 veces superior a la que llega a nuestro planeta. Un solo día en el espacio equivale a la radiación recibida en la superficie terrestre durante todo un año. Los efectos que esto tendría sobre el ser humano son inciertos y difíciles de evaluar.

Los vientos medidos son por lo general de baja velocidades. Sin embargo, Marte es capaz de grandes tormentas de viento que pueden cubrir todo el planeta con polvo arrastrado por el viento. Tales vientos fuertes pueden despojar la superficie de parte de su polvo suelto y fino, dejando la roca expuesta.

La atmosfera de Marte está constituida principalmente por dióxido de carbono (95,3%), nitrógeno (2,7%), argón (1,7%), cantidades menores de agua, monóxido de carbono y oxigeno molecular, y rastros de gases nobles como el neón, kriptón y xenón.

En la *Tabla 1* se presentan de manera comparativa las principales características físicas y ambientales de Marte y la Tierra, con el objetivo de comprender las diferencias clave entre ambos planetas y evaluar los desafíos que implica establecer una base científica en el entorno marciano.

Tabla 1: Datos Planeta Marte

Características	Tierra	Marte
Distancia Orbital (km)	149 587 870	227 943 824
Radio ecuatorial (km)	6 378	3 389
Volumen (km3)	1 083 206 916 846	163 115 609 799
Densidad (ton/m3)	5 514	3 934
Gravedad en superficie (m/s2)	9,81	3,71
Duración del día	24 horas	24 horas, 37 minutos
Duración del año	365,25 días terrestres	687 días terrestres
Velocidad de su órbita	107 218	86 677
Composición de la atmósfera (exosfera)	Nitrógeno, Oxigeno y Argón	Dióxido de Carbono, Nitrógeno y Argón
Lunas descubiertas	1 (La luna)	2 (Fobos y Deimos)

La densidad global de Marte es de 3,9 [ton/m3] que sugiere una composición compuesta principalmente por silicatos, pero con un pequeño núcleo metálico. El planeta no presenta un campo magnético global, aunque hay áreas fuertes de magnetización superficial que indican que si lo hubo hace miles de millones de años. Todo indica que el planeta rojo no presenta hoy en día material liquido en su núcleo que conduzca la electricidad.

Gracias al *Mars Global Surveyor,* un satélite enviado por la NASA ha logrado mapear todo el planeta, esto fue logrado gracias a un altímetro láser a bordo realizo millones de mediciones separadas de la

topografía de la superficie, con la capacidad suficiente como para mostrar incluso la deposición y evaporaciones anuales de los casquetes polares. El rango más alto medido es la cima de la montaña más alta (Monte Olimpo) mientras que el punto más bajo captado es la cuenta Hellas como se presenta en la *Ilustración 2*.

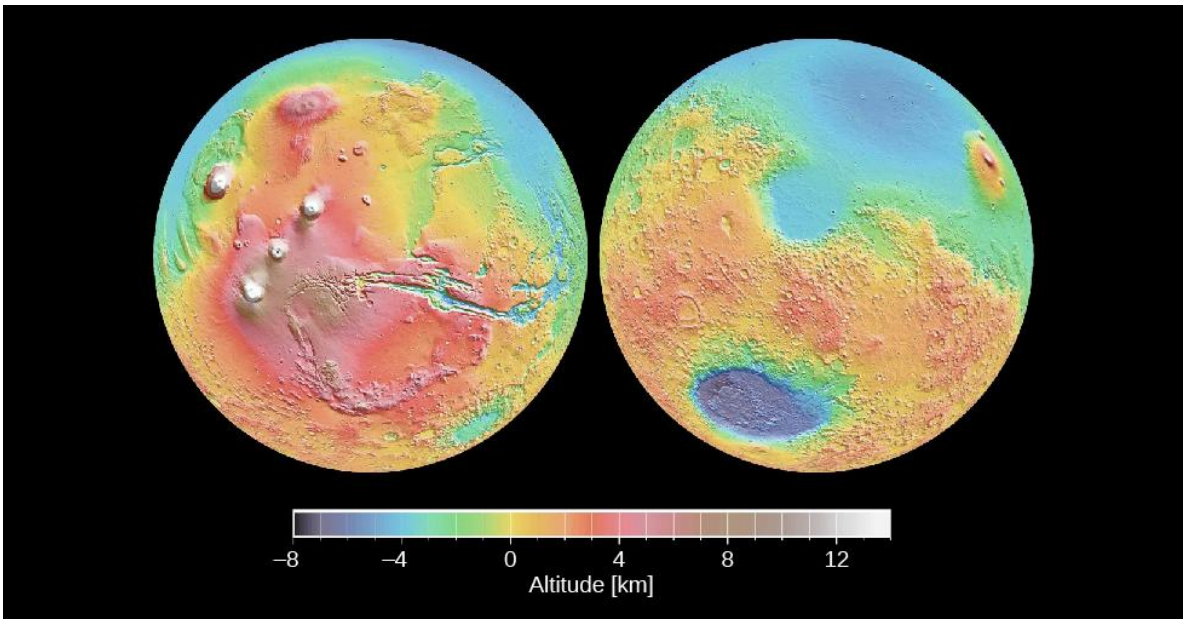


Ilustración 2: Mapa generado por Laser Rating

Las primeras naves espaciales que lograron aterrizar en Marte fueron los Vikings 1 y 2 y Mars Pathfinder, como se muestra en la *ilustración 3.* Con estos equipos lograron obtener las primeras imágenes del planeta, que muestra un paisaje desolado, incluyendo numerosas rocas angulares intercaladas con depósitos en forma de dunas de suelo rojizo de grano fino.



Ilustración 3: Fotos tomadas por los diferentes equipos, en el planeta Marte

Tanto la Tierra como Marte son planetas terrestres (también llamados planetas telúricos) compuestos principalmente de rocas de silicato o metales. Con el tiempo, los diferentes componentes de un cuerpo planetario, debido a su comportamiento físico o químico, se desarrollan en capas compositivamente distintas; los materiales más densos de un planeta como el hierro se hunden en el centro, mientras que los materiales menos densos se elevan a la superficie,

generalmente en un océano de magma. Tal proceso tiende a crear un núcleo y un manto. A veces se forma una corteza químicamente distinta en la parte superior del manto, y la actividad volcánica trae materiales de magma a la superficie del planeta y la lava.



Ilustración 4: Planeta Marte con su particular color rojizo

La superficie de Marte está compuesta principalmente de basalto toleítico (una de las dos principales series de magma en rocas ígneas), aunque las partes son más ricas en sílice que el basalto típico y pueden ser similares a las rocas andesíticas en la tierra.

El 17 de octubre de 2012, el Rover Curiosity de la NASA, *ilustración 5,* en el planeta Marte en "Rocknest" realizo el primer análisis de difracción de rayos X del suelo marciano. Los resultados del Rover revelaron la presencia de varios minerales, incluidos feldespato, piroxenos y olivino, y sugirieron que el suelo marciano en la muestra era similar a los "suelos basálticos erosionados" de los volcanes hawaianos.



Ilustración 5: Rover Curiosity enviado por la NASA en 2012

Una vez conocidas las características de Marte gracias a décadas de exploración y estudios científicos, es posible desarrollar soluciones para establecer una base científica en su superficie. La falta de una atmósfera densa, la intensa radiación, las bajas temperaturas y la escasez de agua líquida representan desafíos significativos para la supervivencia humana. Para enfrentarlos se han propuesto diversas estrategias, como la construcción de hábitats protegidos con materiales locales, el uso de sistemas avanzados de soporte vital para reciclar aire y agua, y la generación de energía a partir de fuentes renovables, como la solar y la nuclear. También se investiga el cultivo de alimentos en invernaderos presurizados.

Producción elementos vitales

El primer equipo de personas en viajar a Marte representará un hito histórico en la exploración espacial y estará compuesto por astronautas altamente entrenados en diversas disciplinas, como ingeniería, biología, medicina y geología. En un inicio se habla de un grupo de 4 a 6 personas que cubran todas las áreas solicitadas, estos pioneros no solo deberán soportar un viaje de aproximadamente siete meses a través del espacio, sino también enfrentarse a las duras condiciones del planeta rojo, incluyendo la radiación, la baja gravedad y la limitada disponibilidad de recursos. Su misión principal será establecer las primeras infraestructuras básicas para la habitabilidad, incluyendo la instalación de módulos presurizados, la generación de oxígeno y energía, y la búsqueda de agua en el subsuelo marciano. Además, llevarán a cabo estudios científicos fundamentales para comprender mejor el entorno marciano y evaluar la viabilidad de futuras colonias. Este primer equipo deberá ser autosuficiente y contar con protocolos de emergencia, ya que la comunicación con la Tierra tendrá un retraso de varios minutos y cualquier ayuda tardaría meses en llegar.

Oxígeno

La producción de oxígeno en Marte es uno de los mayores desafíos para la exploración humana del planeta, ya que su atmósfera es extremadamente delgada y compuesta en un 95% por dióxido de carbono (CO_2), con solo trazas de oxígeno insuficientes para la respiración humana. Para sostener una misión con seis personas, se estima que se necesitarían alrededor de 30 kilogramos de oxígeno por día, considerando tanto el consumo directo para la respiración como el oxígeno requerido para la combustión de los sistemas de propulsión en una eventual misión de regreso a la Tierra. Dado que transportar estas enormes cantidades de oxígeno desde la Tierra sería inviable debido a los costos y limitaciones de peso en los lanzamientos, es fundamental desarrollar tecnologías que permitan la producción de oxígeno in situ, aprovechando los recursos disponibles en Marte.

Uno de los avances más prometedores en esta área es MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment), el diseño se muestra en la *ilustración 6,* un experimento desarrollado por la NASA y probado a bordo del rover Perseverance. Este dispositivo utiliza un proceso llamado electrólisis de óxidos sólidos, mediante el cual extrae oxígeno del CO_2 marciano calentando el gas a temperaturas de 800 °C y separando sus componentes. Durante sus pruebas iniciales en Marte, MOXIE ha demostrado ser capaz de producir hasta 10 gramos de oxígeno por hora, lo suficiente para que una persona pueda respirar durante aproximadamente 20 minutos. Aunque esta cantidad es insuficiente para mantener a un equipo de seis personas a largo plazo, el éxito de este experimento ha demostrado que es posible generar oxígeno en Marte y ha sentado las bases para el desarrollo de versiones mucho más grandes y eficientes de este sistema en el futuro.



Ilustración 6: Aparato MOXIE

Consumo de oxígeno en la base

Un ser humano necesita aproximadamente **0.84 kg de oxígeno por día** para respirar. Si consideramos una base con **seis personas**, el consumo total de oxígeno diario sería:

$$0.84 \times 6 = 5.04 \text{ kg de } O_2/\text{día} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Además, si queremos producir oxígeno para **combustible de cohetes**, la cantidad requerida es mucho mayor, pero en esta estimación nos centraremos en el oxígeno para la supervivencia de la tripulación.

Producción de oxígeno con MOXIE

El experimento MOXIE a bordo del rover **Perseverance** ha demostrado que puede producir alrededor de **10 gramos de oxígeno por hora**, lo que equivale a:

$$10 \times 24 = 240 \text{ g de } O_2/\text{día} = 0.24 \text{ kg de } O_2/\text{día} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Para cubrir solo la demanda de respiración de **seis astronautas**, se necesita:

$$5.040.24 \approx 21 \text{ unidades de MOXIE} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Para cubrir la demanda de una tripulación completa, una versión mejorada de MOXIE tendría que operar a una escala significativamente mayor, posiblemente mediante la instalación de varios módulos generadores de oxígeno que funcionen en conjunto las 24 horas del día. Además de su uso para la respiración, la producción de oxígeno en Marte es crucial para la fabricación de combustible para cohetes, ya que el oxígeno es un componente clave en la propulsión de los motores espaciales. Si una base científica o una colonia marciana pudiera generar su propio oxígeno en grandes cantidades, sería posible abastecer misiones de regreso sin depender de suministros enviados desde la Tierra, reduciendo así los costos y aumentando la autonomía de las misiones tripuladas.

Además del enfoque basado en la electrólisis de CO_2, los científicos están explorando otras formas de producir oxígeno en Marte. Una alternativa interesante es el uso de bioreactores con algas o cianobacterias, organismos que pueden realizar fotosíntesis y convertir el CO_2 en oxígeno de manera natural. Estos sistemas podrían integrarse en invernaderos dentro de una base marciana, proporcionando no solo oxígeno sino también alimentos y otros subproductos útiles. Otra opción es la extracción de oxígeno del hielo marciano, que podría obtenerse a través de la hidrólisis del agua subterránea o del hielo presente en los polos y bajo la superficie.

En última instancia, el éxito de la producción de oxígeno en Marte determinará la viabilidad de establecer bases científicas permanentes e incluso futuras colonias autosuficientes. MOXIE ha demostrado que es posible extraer oxígeno de la atmósfera marciana, y los próximos pasos en esta tecnología serán desarrollar sistemas a gran escala que permitan generar oxígeno de manera continua y en cantidades suficientes para sostener la vida humana. A medida que avanzan las investigaciones y las misiones espaciales se acercan a la posibilidad de enviar humanos a Marte, la capacidad de producir oxígeno en el planeta rojo se perfila como un factor clave para el éxito de la exploración y colonización del espacio.

Actualmente, es posible obtener oxígeno en Marte utilizando tecnología desarrollada por misiones recientes, el cual ha demostrado que es viable extraer oxígeno del dióxido de carbono presente en la atmósfera marciana. Aunque esta tecnología aún se encuentra en etapa experimental y a pequeña escala, su éxito inicial abre la puerta a futuras mejoras que podrían aumentar significativamente su capacidad y eficiencia, permitiendo así el abastecimiento de oxígeno para misiones tripuladas de larga duración o incluso para una base permanente en el planeta rojo.

Agua

La obtención de agua en Marte es un desafío crítico para el establecimiento de una base espacial sostenible, ya que el agua es fundamental para el consumo humano. A diferencia de la Tierra, Marte no cuenta con océanos, ríos ni lagos en estado líquido debido a sus bajas temperaturas y la baja presión atmosférica, lo que hace que el agua en la superficie se evapore rápidamente. Sin embargo, los estudios realizados por sondas espaciales y rovers han confirmado la existencia de grandes depósitos de hielo subterráneo, capas de hielo en los polos y pequeñas cantidades de agua atrapadas en el regolito marciano, lo que abre diversas posibilidades para su extracción y uso en una base espacial.

Uno de los métodos más viables para obtener agua en Marte es la extracción de hielo subterráneo. Mediante observaciones del Mars Reconnaissance Orbiter y el rover Curiosity, se ha detectado la presencia de grandes reservas de hielo a pocos metros bajo la superficie en diversas regiones del planeta. Para acceder a este recurso, se podrían utilizar perforadoras robóticas y sistemas de extracción térmica, similares a los utilizados en la minería terrestre. Estas perforadoras penetrarían en el suelo marciano y calentarían el hielo hasta convertirlo en vapor, que luego sería recolectado y condensado en agua líquida. Este método es particularmente prometedor en áreas como Utopía Planitia, donde se ha detectado una gran cantidad de hielo accesible a poca profundidad.

Otra fuente potencial de agua es el regolito marciano, que contiene pequeñas cantidades de agua atrapada en sus minerales. Estudios de las muestras analizadas por el rover Perseverance han demostrado que algunas regiones del planeta contienen hasta un 5% de agua en peso, lo que significa que cada tonelada de regolito podría proporcionar alrededor de 50 litros de agua. Para extraerla, se emplearían hornos de calentamiento, donde el regolito sería calentado a altas temperaturas para liberar el vapor de agua, que luego sería condensado y almacenado. Aunque este método requiere una gran cantidad de energía, podría ser útil en regiones donde el hielo subterráneo no esté fácilmente disponible.

Otra alternativa innovadora es la captura de agua de la atmósfera marciana, a pesar de que la humedad es extremadamente baja en la mayor parte del planeta. Se han propuesto dispositivos basados en tecnologías utilizadas en desiertos terrestres, como sistemas de condensación pasiva y redes de recolección de humedad, que atraparían pequeñas cantidades de vapor de agua presente en la atmósfera y lo condensarían en forma líquida. Aunque este método por sí solo no produciría grandes volúmenes de agua, podría complementar otras estrategias, especialmente en regiones donde las temperaturas nocturnas favorecen la formación de escarcha.

Una vez obtenida, el agua en Marte necesitaría pasar por procesos de filtración y purificación para eliminar posibles contaminantes y hacerla apta para el consumo humano y otros usos. Además, mediante electrólisis, el agua podría ser dividida en hidrógeno y oxígeno; este último es esencial para la respiración de los astronautas y como oxidante en el combustible de cohetes. Esto significaría que la producción de agua no solo aseguraría la supervivencia de los astronautas, sino que también permitiría la producción local de combustible para misiones de regreso a la Tierra o futuras exploraciones del sistema solar.

A medida que avanzan las tecnologías de extracción y purificación, la autosuficiencia en Marte se vuelve más viable. La combinación de perforación de hielo subterráneo, extracción de agua del regolito y captura atmosférica podría garantizar un suministro continuo de agua, eliminando la

necesidad de transportarla desde la Tierra y haciendo posible la creación de una base científica sostenible. La producción local de agua en Marte es, sin duda, uno de los pilares fundamentales para la exploración humana a largo plazo y la futura colonización del planeta rojo.

Energía

La producción de energía para una base científica en Marte constituye un aspecto fundamental para el funcionamiento continuo de sus sistemas vitales y tecnológicos. Entre las fuentes de energía más viables y sostenibles en el contexto marciano se encuentran la energía solar y, en menor medida, la energía eólica. Ambas alternativas presentan ventajas y limitaciones que deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño de una infraestructura energética confiable y eficiente.

Energía Solar

La energía solar se perfila como una de las principales fuentes energéticas debido a su disponibilidad constante durante el día marciano, conocido como sol, que tiene una duración similar al día terrestre (aproximadamente 24 horas y 37 minutos). Sin embargo, la irradiancia solar en Marte es considerablemente menor que en la Tierra, ya que el planeta se encuentra a una distancia promedio de 1.52 unidades astronómicas del Sol, lo que reduce la intensidad de la luz solar a aproximadamente un 43% de la que se recibe en la Tierra. Esta disminución implica que los paneles solares deben ser más extensos o eficientes para generar una cantidad similar de energía.

Además, las frecuentes tormentas de polvo marcianas representan una amenaza importante para el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Estas tormentas pueden durar semanas o incluso meses, disminuyendo significativamente la cantidad de luz solar que alcanza la superficie y cubriendo los paneles con polvo fino que reduce su eficiencia. Para mitigar estos efectos, se contempla el uso de sistemas de limpieza automatizados, mecanismos de inclinación para evitar acumulación de polvo, y la implementación de baterías de almacenamiento de alta capacidad que permitan conservar energía durante los períodos de baja generación.

Energía eólica

En paralelo, la energía eólica ha sido considerada como una fuente secundaria o complementaria. A pesar de que Marte presenta velocidades de viento que pueden superar los 100 km/h durante tormentas, la baja densidad de su atmósfera (alrededor del 1% de la terrestre) reduce considerablemente el potencial de generación eléctrica a través de aerogeneradores convencionales. No obstante, se estudian diseños adaptados a las condiciones marcianas, como turbinas de eje vertical optimizadas para operar con baja presión atmosférica. Estas podrían proporcionar energía de respaldo durante la noche o en eventos de reducción solar extrema.

En términos de requerimientos energéticos, se estima que una base científica para seis personas necesitaría un suministro continuo de entre 40 y 50 kilovatios (kW) para cubrir funciones esenciales como calefacción, soporte vital, telecomunicaciones, procesamiento de agua, cultivo de alimentos y operación de laboratorios. Para alcanzar esta demanda exclusivamente con energía solar, sería necesario instalar paneles fotovoltaicos de alta eficiencia con una superficie significativa —aproximadamente 200 a 300 metros cuadrados de paneles de última generación, considerando condiciones óptimas de irradiación— y sistemas de almacenamiento capaces de garantizar la autonomía energética durante los periodos de baja luz.

Esto es una estrategia energética basada principalmente en energía solar, complementada con sistemas eólicos adaptados y respaldada por baterías de alta capacidad, podría satisfacer los

requerimientos energéticos de una base científica en Marte. Este enfoque aprovecharía al máximo los recursos disponibles in situ, minimizando la dependencia de tecnologías importadas desde la Tierra y permitiendo la construcción de un asentamiento sostenible a largo plazo.

Estructura

La construcción de hábitats en Marte es un desafío crucial para la exploración y colonización del planeta, ya que cualquier estructura debe proporcionar protección contra las condiciones extremas, incluyendo la radiación, las bajas temperaturas y las tormentas de polvo. Una de las soluciones más innovadoras y viables para edificar en Marte es el uso de **impresión 3D con regolito marciano**, un proceso que permitiría fabricar estructuras directamente en el planeta utilizando materiales locales, reduciendo así la necesidad de transportar recursos desde la Tierra. Para optimizar el espacio y mejorar la seguridad, se ha propuesto que estas construcciones sean **verticales**, lo que permitiría aprovechar al máximo el terreno disponible y minimizar la exposición a la radiación cósmica y solar, uno de los mayores peligros para los astronautas en Marte.

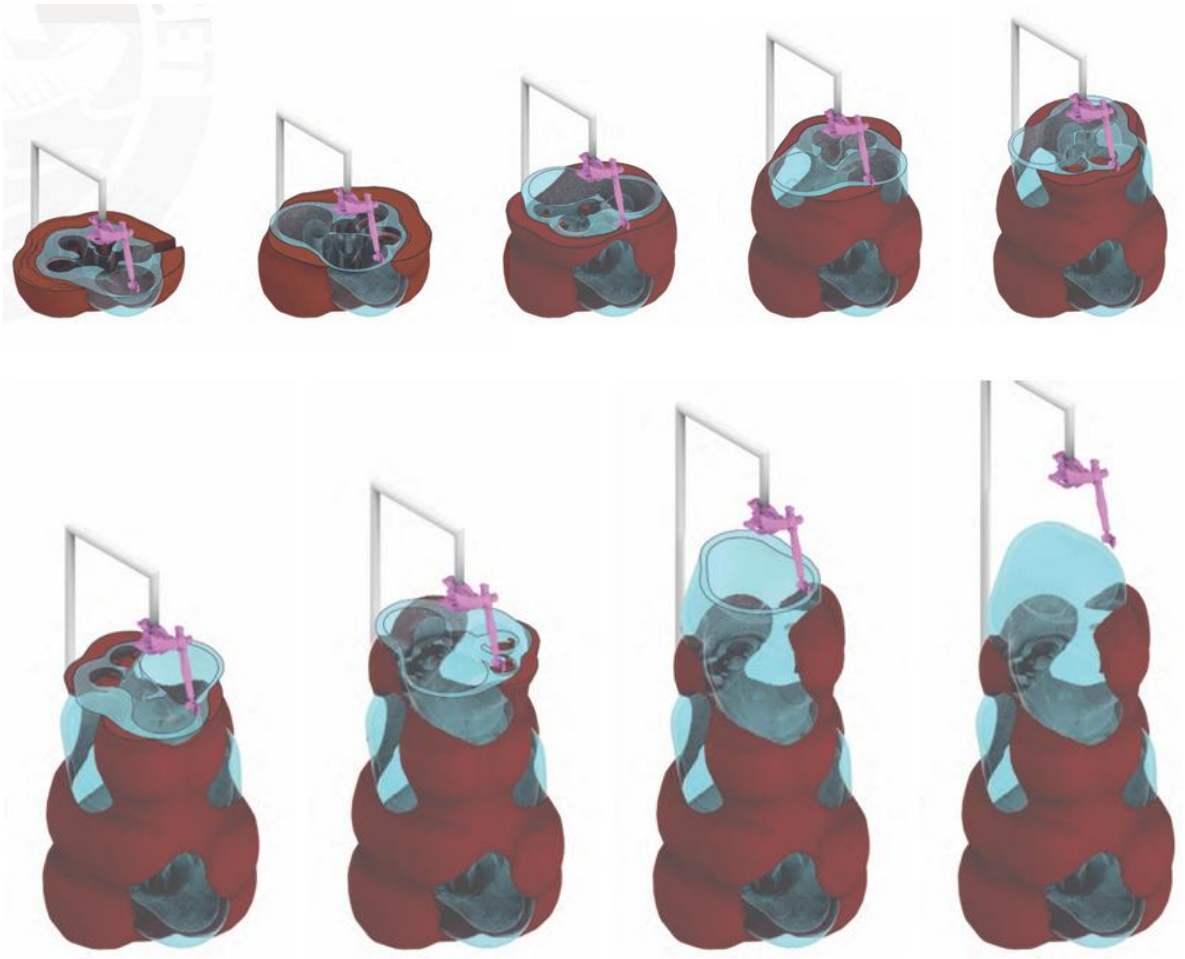


Ilustración 7: Modelo 3D de la construcción

El diseño de estas estructuras verticales estaría basado en un sistema modular, donde los primeros niveles inferiores podrían ser utilizados para almacenamiento y laboratorios científicos, mientras que los niveles superiores albergarían áreas habitacionales y de trabajo. **La impresión 3D jugaría un papel clave en la fabricación de estas estructuras**, utilizando una mezcla de regolito marciano

combinado con polímeros, compuestos reforzados o incluso con hielo de agua presente en Marte, creando un material resistente capaz de soportar las variaciones térmicas y los impactos de micro meteoritos. Para hacer posible este tipo de construcción, se podrían emplear **robots autónomos y brazos mecánicos** que extraerían el material del suelo marciano, procesándolo y depositándolo en capas sucesivas para formar paredes gruesas y autosuficientes.

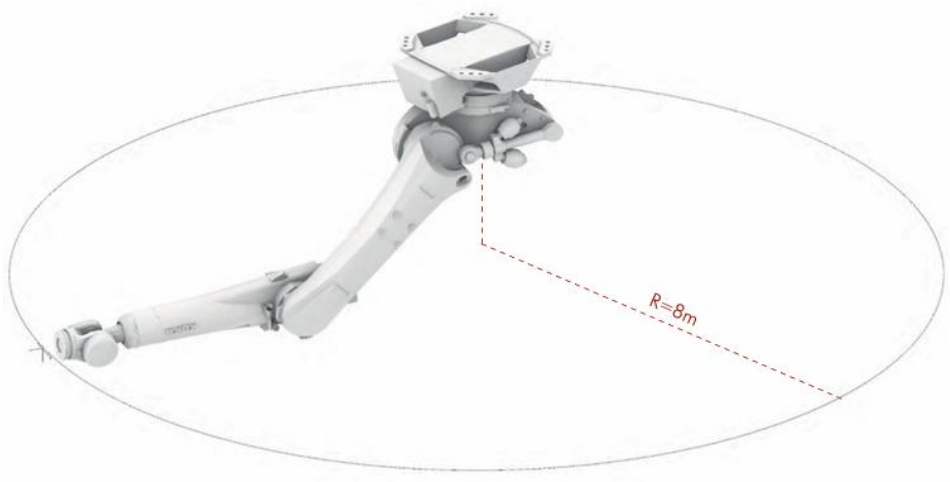
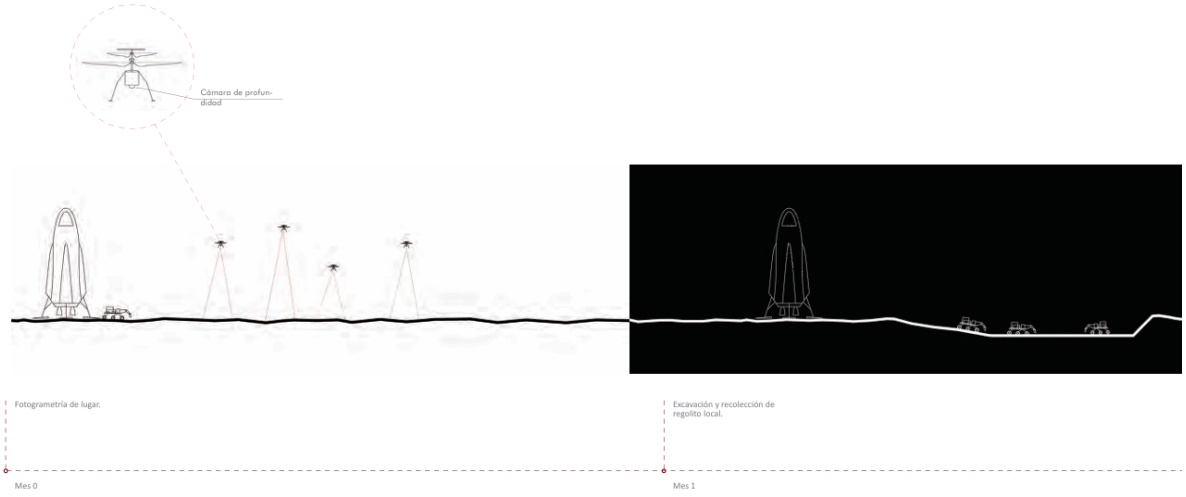
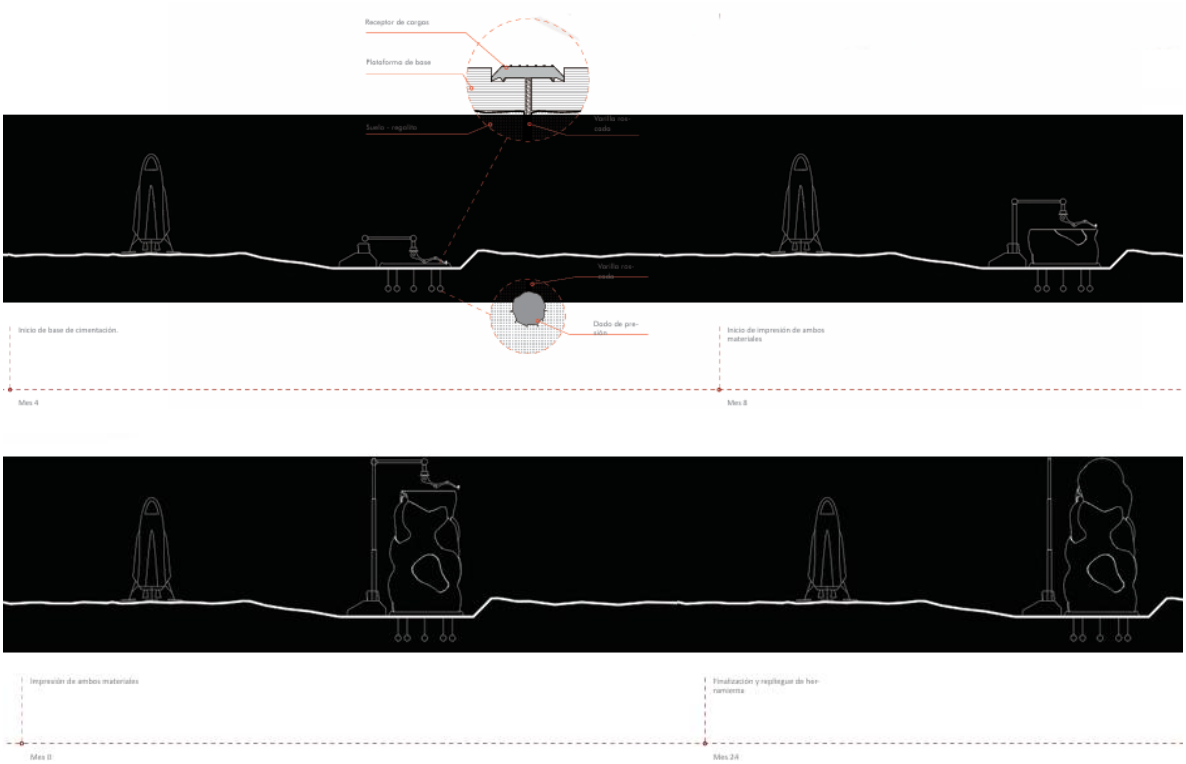


Ilustración 8: Brazo robótico con impresora 3D

Una de las ventajas de construir de manera vertical en Marte es la posibilidad de integrar en las paredes sistemas de **protección contra la radiación**, ya sea mediante el uso de materiales con alto contenido de hidrógeno, como plásticos especiales, o recubrimientos internos con agua, que serviría como escudo natural contra la radiación cósmica. Además, el diseño podría incluir una **estructura parcialmente subterránea**, donde los primeros niveles estuvieran protegidos por el regolito marciano, aprovechando la propia geografía del planeta para mejorar la seguridad de la base.





Otro aspecto clave de estas edificaciones es la integración de **sistemas de soporte vital**, como módulos presurizados para mantener una atmósfera habitable, sistemas avanzados de reciclaje de agua y aire, y zonas de cultivo interno donde se podrían producir alimentos a través de hidroponía o aeroponía. Estas áreas de cultivo podrían ubicarse en los niveles superiores, donde recibirían luz solar filtrada mediante paneles transparentes de alta resistencia. Además, la estructura podría incorporar **paneles solares en la parte superior**, aprovechando la energía del Sol para alimentar los sistemas de la base sin depender de fuentes externas.

Los diseños propuestos por agencias como la NASA y empresas privadas como SpaceX y AI SpaceFactory han explorado conceptos de **torres impresas en 3D con regolito**, algunas con formas cilíndricas para mejorar la estabilidad y otras con estructuras en espiral para optimizar la resistencia y la distribución del peso. Este tipo de hábitats permitiría a los astronautas vivir y trabajar en Marte durante largos períodos de tiempo, proporcionando refugios seguros y sostenibles para futuras misiones científicas y, eventualmente, para los primeros colonos del planeta rojo. Con el avance de estas tecnologías, la construcción vertical en Marte con impresión 3D y materiales locales se perfila como una solución viable para garantizar la presencia humana a largo plazo en el planeta.

Cultivos

En un entorno extremo como el de Marte, donde la atmósfera es irrespirable y los recursos son limitados, la producción local de alimentos será clave para la supervivencia de cualquier misión tripulada a largo plazo. Gracias a tecnologías emergentes como MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment), que permite producir oxígeno a partir del dióxido de carbono presente en la atmósfera marciana, se abre una oportunidad significativa para mantener atmósferas controladas dentro de invernaderos y apoyar procesos de fotosíntesis en cultivos.

La agricultura en Marte no puede realizarse a cielo abierto, por lo tanto, debe llevarse a cabo en sistemas cerrados y presurizados, como invernaderos o módulos agrícolas protegidos de la radiación y controlados térmicamente. En estos espacios se deberá replicar una atmósfera compatible con el crecimiento vegetal, lo que implica mantener niveles adecuados de temperatura, humedad, presión y luz. Aquí es donde el oxígeno generado por MOXIE cobra gran relevancia, ya que puede contribuir a regular los niveles de oxígeno en el ambiente agrícola, y además producir monóxido de carbono (CO) como subproducto, el cual puede eventualmente usarse como precursor para otros compuestos útiles.

En cuanto a los **cultivos más adecuados para Marte**, se privilegian aquellos que:

- Tienen **alto valor nutricional**.
- Poseen **ciclos de crecimiento cortos**.
- **Requieren poca agua** y tienen tolerancia a ambientes controlados.
- Son **resistentes a plagas** (aunque estas no existirían inicialmente en Marte, pero podrían surgir por contaminación).

Entre los cultivos más estudiados para Marte se encuentran:

1. **Papas**: Son altamente calóricas, fáciles de cultivar y ya fueron ensayadas en condiciones similares a las de Marte en laboratorios (como los experimentos del International Potato Center y NASA).
2. **Lechugas** y hojas verdes: Crecen rápido, requieren poca luz y espacio, y son ricas en micronutrientes.
3. **Rábanos**: Tienen un ciclo de crecimiento corto (20-30 días), lo que permite una rápida rotación.
4. **Tomates cherry**: Aunque más exigentes en recursos, ofrecen una fuente de vitamina C y sabor.
5. **Legumbres como lentejas y arvejas**: Aportan proteínas vegetales y pueden fijar nitrógeno en condiciones controladas.
6. **Hierbas aromáticas y medicinales**: Como albahaca, menta o manzanilla, que pueden mejorar el sabor de las comidas y apoyar la salud emocional.

El suelo marciano, conocido como regolito, no es fértil en su estado natural y contiene compuestos tóxicos como los percloratos, por lo que es necesario tratarlo previamente o usar sustratos artificiales. Una alternativa viable es el uso de cultivos hidropónicos o aeropónicos, que no requieren suelo y permiten reciclar agua y nutrientes con gran eficiencia. Estos sistemas serían ideales en Marte, especialmente cuando se combinan con tecnologías automatizadas de monitoreo y control.

La fuente de luz también es un punto crítico. Aunque Marte recibe suficiente luz solar, las tormentas de polvo pueden reducirla durante largos periodos. Por ello, se prevé el uso de luces LED de espectro ajustado, que permitirían un control total del fotoperiodo y la intensidad lumínica para optimizar el crecimiento.

En conclusión, el desarrollo de cultivos en Marte será posible mediante una combinación de tecnología de soporte vital (como MOXIE para oxígeno), sistemas agrícolas cerrados, métodos hidropónicos y selección de especies vegetales adaptadas. Esto permitirá avanzar hacia la autosuficiencia alimentaria en futuras misiones marcianas, reduciendo la dependencia del reabastecimiento desde la Tierra y mejorando la calidad de vida de los astronautas.

Conclusión

El establecimiento de una base científica en Marte representa uno de los mayores desafíos y, a la vez, una de las más grandes oportunidades en la historia de la humanidad. A lo largo de este trabajo se han identificado las principales dificultades que impone el planeta, desde sus condiciones ambientales extremas —como la baja presión atmosférica, la radiación, las temperaturas extremas y la escasez de agua líquida— hasta la necesidad de generar sistemas autosuficientes para la producción de oxígeno, agua, energía y alimentos. Sin embargo, también se ha evidenciado que los avances tecnológicos actuales, como la generación de oxígeno con MOXIE, el aprovechamiento del hielo marciano, la agricultura en sistemas hidropónicos y la construcción mediante impresión 3D con regolito, ofrecen soluciones concretas para dar los primeros pasos hacia la habitabilidad.

Si bien las condiciones actuales solo permiten imaginar una base inicial de carácter experimental y con capacidad limitada, esta serviría como plataforma para validar tecnologías críticas, estudiar la adaptación humana en entornos extremos y ensayar métodos de aprovechamiento de recursos locales. Con el tiempo, la integración de innovaciones en energía renovable, reciclaje de recursos y sistemas de protección más avanzados podría transformar estas instalaciones en asentamientos más autosuficientes y duraderos.

En este sentido, una base científica en Marte no debe entenderse únicamente como un experimento de exploración espacial, sino como una inversión estratégica en el futuro de la humanidad. Nos permitiría expandir nuestro conocimiento científico, diversificar los espacios habitables fuera de la Tierra y dar un paso fundamental en la construcción de una civilización interplanetaria. Marte, con todos sus desafíos y oportunidades, se proyecta así como el próximo gran escenario para la innovación, la cooperación internacional y la evolución de la especie humana hacia un futuro más allá de nuestro planeta natal.