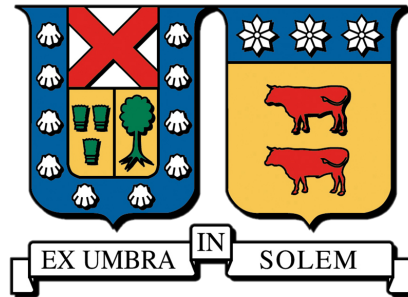


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE



“APORTE AL DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE
TRANSPORTE MAGNETO LEVÍTICO PARA EL TRASLADO DE HIELO
DESDE PUNTOS DE EXPLOTACIÓN A COLONIA EN LA SUPERFICIE
LUNAR”

JOAQUÍN ANTONIO SCHIESEWITZ KNAAK

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : DR. ING. PEDRO SARIEGO P.
PROFESOR CORREFERENTE : ING. GONZALO VIVAR G.

MAYO, 2025

Agradecimientos

A lo largo de estos seis años en la universidad, he tenido la fortuna de compartir momentos inolvidables junto a amigos y compañeros que hicieron de esta etapa una experiencia única y enriquecedora.

Desde mi primer día en la universidad tuve la suerte de integrarme al grupo "asado familiar", cuyos integrantes se convirtieron rápidamente en personas muy especiales para mí. Con ellos compartí gran parte de mi tiempo universitario, y estoy profundamente agradecido por su compañía, apoyo y amistad incondicional durante todo este proceso.

A mitad de mi carrera decidí formar parte del equipo de rugby de la universidad, donde tuve la oportunidad de conocer a personas increíbles con quienes disfruté grandes momentos. A todos ellos les agradezco por hacer aún más grata y divertida mi experiencia universitaria.

Además, tuve la oportunidad única de vivir un semestre de intercambio en Japón, donde conocí una cultura totalmente nueva y diferente. Estoy especialmente agradecido con Bruno y Alfath, quienes con su amistad hicieron que mi estadía en la tierra del sol naciente fuese inolvidable.

También quisiera agradecer a un grupo más reciente, integrado por Tomi, el Guarda, Jorquera y Felipe, quienes han sido una grata compañía y con quienes he podido fortalecer una amistad durante este último tiempo.

A mi grupo de amigos del colegio y con quienes jugamos en discord, agradecido por hacer entretenido el tiempo en pandemia y las largas conversaciones.

Un agradecimiento especial y profundo a mi familia, cuyo apoyo constante ha sido fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias a sus sacrificios y oportunidades brindadas he logrado alcanzar mis metas y llegar hasta aquí.

Quisiera también expresar mi gratitud a las personas que hicieron posible mis prácticas profesionales en Puerto Columbo y en Metro, experiencias que fueron cruciales en mi formación.

Finalmente, agradecer al profesor Pedro Sariego y al ingeniero Gonzalo Vivar por su orientación, apoyo y valiosa guía durante el desarrollo y escritura de esta memoria de titulación.

Resumen

El presente trabajo abordó el diseño conceptual de un sistema de transporte magneto levítico para el traslado de agua en la superficie lunar, desde ubicaciones polares con presencia de agua congelada hasta zonas más cercanas al ecuador, donde se facilitaría su uso y un posible posterior envío a órbita. Inicialmente, se describió el contexto de la economía espacial y la importancia estratégica del agua como recurso vital en futuras misiones tripuladas, producción de combustible y sostenibilidad de asentamientos. Posteriormente, se analizaron las características del entorno lunar que impactan en el diseño: ausencia de atmósfera protectora, marcados gradientes térmicos y gravedad reducida.

Para el diseño conceptual se planteó un proceso de extracción, una ruta que unió dos puntos seleccionados en base a la investigación realizada y con eso se establecieron los requerimientos de diseño.

A partir de estos requerimientos, se compararon distintas tecnologías de transporte, tomando en consideración su eficiencia, complejidad y requerimientos energéticos. Dicho análisis permitió proponer una configuración acorde a las condiciones lunares, priorizando la minimización del consumo, la fiabilidad en un entorno hostil y la capacidad de adaptación a un flujo de transporte intensivo. Se presentó además, un estudio preliminar de la topografía lunar y la ruta seleccionada, discutiendo las implicancias de pendientes y distancias de recorrido.

Se planteó un sistema basado en magnetismo pasivo (Inductrack), el cual podría reducir significativamente los requerimientos de energía y mantenimiento, al mismo tiempo que se lograría una operación confiable sobre terrenos con pendientes moderadas.

La propuesta de diseño contempló la infraestructura de vías y vehículos, así como los sistemas de carga y descarga de hielo, otorgando lineamientos para futura ingeniería de detalle. De esta forma, se demostró la viabilidad de un transporte continuo y eficiente de recursos, contribuyendo a la visión de establecer una economía lunar autosustentable.

Además de la propuesta de diseño principal, se incluyeron alternativas, explicando ventajas y desventajas de estas. También se exploraron otro tipo de ideas, como un sistema de lanzamiento y captura de contenedores utilizando tecnología maglev.

Abstract

This study presents the conceptual design of a magnetic levitation (maglev) transport system for transferring water across the lunar surface, from polar regions with frozen water deposits to areas closer to the equator, where its utilization and potential transfer to orbit would be more feasible. The research begins by outlining the context of the space economy and the strategic importance of water as a vital resource for future crewed missions, fuel production, and the sustainability of lunar settlements. Key lunar environmental factors affecting the design such as the lack of a protective atmosphere, extreme thermal gradients, and reduced gravity—were thoroughly analyzed.

A conceptual process was proposed involving water extraction and transport along a route selected based on research criteria, which informed the design requirements. Various transportation technologies were evaluated in terms of efficiency, complexity, and energy demands. Based on this analysis, a solution suited to lunar conditions was developed, prioritizing low energy consumption, reliability in a harsh environment, and adaptability to high transport demands.

The proposed system is based on passive magnetic levitation (Inductrack), which offers significant advantages in terms of energy efficiency and low maintenance, while maintaining reliable operation on moderately inclined terrain. The design includes track and vehicle infrastructure, as well as ice loading and unloading systems, providing guidelines for future detailed engineering.

In addition to the primary design, alternative concepts were considered, including their respective advantages and drawbacks. The study also explored innovative ideas such as a maglev-based container launch and capture system. Overall, the work demonstrates the feasibility of a continuous and efficient water transport system, contributing to the broader goal of a self-sustaining lunar economy.

ÍNDICE

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xi
1. Introducción y Contexto	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos Particulares	2
3. Marco Teórico	3
3.1. Visión CisLunar 1000 ([3], [2])	3
3.2. Agua en la Superficie Lunar ([4], [5], [6], [8])	5
3.3. Condiciones en la superficie lunar ([7])	6
3.3.1. Resumen de las Condiciones en la Superficie Lunar	9
3.3.2. Topografía de la superficie lunar	10
3.4. Transporte de agua hacia la orbita lunar ([2])	14

3.5. Tecnologías de transporte	15
3.5.1. Vías Férreas Tradicionales ([22])	15
3.5.2. Levitación Magnética EDS (Electrodynamic Suspension) ([10], [11])	17
3.5.3. Levitación Magnética EMS (Electromagnetic Suspension)([14])	19
3.5.4. Levitación Magnética Inductrack ([14])	21
4. Estado del Arte	24
4.1. Sistemas de Transporte Magneto Levíticos	24
4.1.1. SCMaglev (Japón)([10], [11])	24
4.1.2. Shanghai Maglev (China)([14])	29
4.1.3. Maglev Inductrack ([14], [12])	33
4.1.4. Comparación de tecnologías Maglev	38
4.2. Sistemas de Extracción de Hielo ([8], [16], [19], [15], [17], [18])	40
4.2.1. Extracción Térmica	40
4.2.2. Otros Tipos de Extracción	41
4.3. Normas de diseño lunares	42
5. Problema y Requerimientos	45
5.1. Flujo de procesos ([3])	46
5.2. Ruta preliminar ([20])	47
5.3. Requerimientos de diseño:	54

6. Diseño Conceptual	56
6.1. Análisis Funcional	56
6.1.1. Función Principal	56
6.1.2. Funciones Secundarias	56
6.2. Selección de Tecnologías ([21], [13])	59
6.2.1. Cálculo de la capacidad con 1000 kW	62
6.3. Cálculo de capacidad del sistema de transporte	69
6.3.1. Parámetros de diseño	69
7. Propuesta de Diseño	71
7.1. Infraestructura	72
7.1.1. Vías	72
7.1.2. Aparatos de Vías	75
7.1.3. Obras Civiles	76
7.2. Vehículos	76
7.2.1. Locomotoras	76
7.2.2. Vagones	78
7.3. Sistemas de Carga y Descarga	80
7.3.1. Vagones	80
7.3.2. Estaciones	81
7.4. Alternativas	81

8. Otras Ideas	83
8.1. Tren tradicional con motor lineal	83
8.2. Tren Magnético EDS	83
8.3. Sistema de lanzamiento maglev	83
8.4. Sistema de túneles maglev	84
9. Conclusiones y recomendaciones	85
Bibliografía	87

Índice de figuras

1.	Visión CisLunar 1000(ULA)[3]	4
2.	Perfil térmico en la superficie lunar (D.A. Paige et al.)[7]	7
3.	Mapa elevación de la superficie lunar centrado en latitud 0 (NASA)[6]	11
4.	Mapa elevación de la superficie lunar centrado en latitud -90 (NASA)[6]	13
5.	Análisis de sensibilidad de costo de agua vs Delta V (Trevor Bennett et al. [2])	14
6.	Diagrama Interacción Rueda-Riel (C. Lai et al. [9])	16
7.	Diagrama SCMaglev (JR Central)	18
8.	Diagrama EMS (Transrapid)[14]	20
9.	Sistema Inductrack (A. M. G. Jacob et al. [14])	22
10.	SCMaglev Series L0 (JR Central)	24
11.	Mapa SCMaglev (JR Central)	27
12.	Shanghai Maglev (Shanghai Maglev)	29
13.	Mapa del Shanghai Maglev (Shanghai Maglev)	31
14.	Prueba experimental Inductrack (A. M. G. Jacob et al. [14])	36
15.	Patente Inductrack III (US 8,578,860 B2 [12])	37
16.	Comparación tecnologías Maglev ([14])	39
17.	Casos simulados para extracción térmica (J. Brisset et al.)[8]	40
18.	Diagrama de flujo de proceso (Elaboración propia)	46
19.	Ruta en línea recta (LROC)[20]	49

20.	Variación de altura del terreno en la ruta en línea recta (LROC)[20]	49
21.	Variación de la pendiente del terreno en la ruta en línea recta (LROC)[20]	50
22.	Ruta optimizada (LROC)[20]	51
23.	Detalle del trazado de la ruta optimizada (LROC)[20]	52
24.	Variación de altura del terreno en la ruta optimizada (LROC)[20]	52
25.	Variación de la pendiente del terreno en la ruta optimizada (LROC)[20]	53
26.	Ruta optimizada polo norte (LROC)[20]	54
27.	Diagrama de caja negra	55
28.	Diagrama de arbol de funciones	58
29.	Diagrama de QFD	59
30.	Diagrama de caja transparente	72
31.	Bosquejo de las vías	73
32.	Bosquejo de las vías (vista superior)	74
33.	Bosquejo del aparato de vía (vista superior)	75
34.	Bosquejo de la locomotora	77
35.	Bosquejo de la locomotora (vista frontal)	77
36.	Bosquejo del vagón	78
37.	Bosquejo del vagón (vista frontal)	79
38.	Bosquejo del vagón (vista corte)	80
39.	Bosquejo del conector de carga y descarga de agua	81

40. Bosquejo sistema de lanzamiento maglev 84

Índice de tablas

1.	Condiciones en la superficie lunar.	9
2.	Comparación de las tecnologías Maglev	39
3.	Comparación de propiedades magnéticas entre NdFeB y SmCo	61

1. Introducción y Contexto

A medida que la humanidad mira hacia el futuro de la exploración espacial, la Luna emerge no solo como un escalón crucial para misiones de exploración profunda, sino también como un potencial centro para sustentar actividades humanas más allá de la Tierra. La visión de una economía espacial, con cientos de personas viviendo y trabajando en el espacio cislunar (el espacio entre la Tierra y la Luna, incluyendo al satélite) en las próximas décadas, exige soluciones innovadoras a los desafíos únicos que plantea el entorno lunar.

Uno de los desafíos más apremiantes es el transporte eficiente de recursos esenciales, particularmente el agua, que es crucial para el soporte vital, la producción y almacenamiento de energía, la protección contra la radiación y los sistemas de propulsión en el espacio, aprovechando procesos como la electrólisis, que permiten separar el hidrógeno del oxígeno y otros procesos que necesiten agua.

La Luna, con sus abundantes reservas de agua en cráteres permanentemente sombreados, presenta una oportunidad prometedora para la utilización de recursos in situ (ISRU). Sin embargo, los desafíos logísticos de extraer, procesar y transportar agua a través del duro y variado paisaje lunar requieren el desarrollo de sistemas de transporte avanzados. Los métodos tradicionales de transporte, como los rovers o tuberías, enfrentan limitaciones significativas debido a la baja gravedad de la Luna, las extremas fluctuaciones de temperatura y la falta de atmósfera.

Otros recursos se plantean también como posibles objetivos de extracción en la Luna, como lo son el Helio-3 y minerales del grupo Paladio, estos pueden aumentar la rentabilidad de una operación a largo plazo en la superficie lunar. Sin embargo, la extracción de estos recursos no será viable hasta que se logre generar un flujo de agua suficiente para sostener las operaciones en la Luna, por lo que el agua se torna una prioridad.

Realizar una investigación sobre este tema innovador fuera de los polos tradicionales de investigación espacial es posible gracias a la divulgación científica y la conectividad global. Esto facilita un enfoque internacional en la resolución de problemáticas comunes, generando motivación global para desarrollar soluciones técnicas que contribuyan a una futura industria espacial, llena de desafíos y oportunidades para toda la humanidad.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de transporte magneto levítico para el traslado eficiente de hielo en la superficie lunar, desde las zonas polares hasta latitudes más centrales, considerando los desafíos técnicos, energéticos y ambientales asociados al entorno lunar.

2.2. Objetivos Particulares

Se identificaron varios objetivos particulares:

- Analizar las características físicas y ambientales de la superficie lunar para determinar los desafíos claves que afectan el diseño y funcionamiento de un sistema de transporte magneto levítico.
- Investigar las tecnologías de levitación magnética disponibles y su adaptabilidad a un entorno lunar, evaluando su eficiencia energética y viabilidad técnica.
- Desarrollar un modelo conceptual del sistema de transporte, incluyendo principalmente el diseño de los trenes magneto levíticos, la infraestructura de las vías y los métodos de extracción y carga del hielo.
- Establecer recomendaciones y mejoras para futuros desarrollos basados en los resultados obtenidos, que puedan optimizar el diseño y operación del sistema en proyectos reales de minería lunar.

3. Marco Teórico

3.1. Visión CisLunar 1000 ([3], [2])

La Visión CisLunar 1000, propuesta por United Launch Alliance (ULA), es una estrategia ambiciosa para la expansión humana en el espacio cislunar, que abarca el área entre la Tierra y la Luna. Este plan, que prevé una comunidad de 1000 personas viviendo y trabajando en el espacio para el año 2046, se basa en la creación de una economía espacial autosustentable que explota los recursos locales de la Luna, especialmente el agua. Este recurso no solo es vital para el soporte de la vida humana, sino que también es esencial como propulsor para vehículos espaciales y para la producción de oxígeno e hidrógeno, elementos clave en el sustento de actividades en el espacio.

La Visión CisLunar 1000 se divide en varias fases, comenzando con la explotación de los recursos lunares y culminando en el establecimiento de una infraestructura robusta que permita a la humanidad vivir de manera independiente en el espacio. ULA propone el uso de su vehículo *Advanced Cryogenic Evolved Stage* (ACES) como el principal medio de transporte en el espacio cislunar, apoyado por depósitos de combustible en órbita y la minería de agua en la superficie lunar. Este enfoque no solo reduce la dependencia de los recursos terrestres, sino que también abre la puerta a nuevas oportunidades comerciales y tecnológicas en el espacio.

El éxito de la Visión CisLunar 1000 depende de la capacidad de crear un sistema económico interdependiente en el espacio, donde los recursos extraídos en la Luna puedan ser procesados y utilizados para diversas actividades, desde la propulsión de cohetes hasta el soporte vital para los astronautas. La implementación de esta visión requiere superar desafíos técnicos significativos, así como desarrollar nuevas tecnologías que permitan la extracción y utilización eficiente de los recursos lunares.

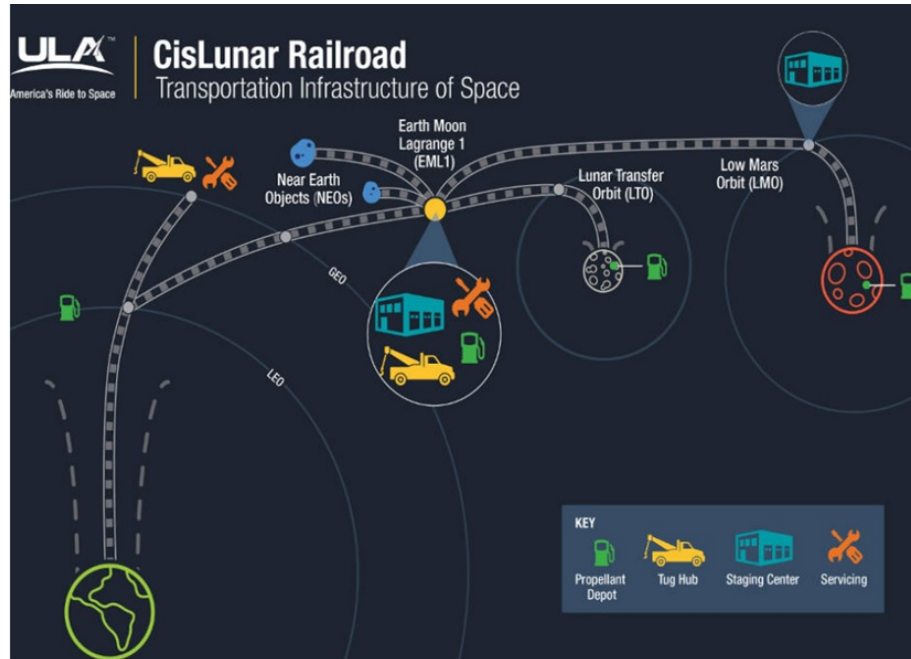


Figura 1: Visión CisLunar 1000(ULA)[3]

En la figura anterior se observa una infografía que describe el flujo presentado por la visión CisLunar 1000 de ULA.

La Importancia del Agua en la Economía Espacial Según CisLunar 1000

El agua es un recurso crítico en la visión de ULA para el espacio cislunar. No solo es esencial para el soporte vital humano, proporcionando oxígeno y agua potable, sino que también puede ser utilizada como propulsor en cohetes, mediante la separación en hidrógeno y oxígeno en el proceso como la electrólisis, y como componente en sistemas de almacenamiento de energía y protección contra la radiación. Sin agua, no existe la posibilidad de un asentamiento en la superficie lunar. La presencia de grandes cantidades de agua en los polos lunares, en forma de hielo, ofrece una oportunidad única para reducir los costos de las misiones espaciales al evitar la necesidad de transportar este tan importante recurso desde la Tierra.

La extracción de agua lunar y su procesamiento en propulsores y otros recursos esenciales es un componente clave de la Visión CisLunar 1000. Estudios económicos han demostrado que el uso de agua lunar puede ser inmediatamente rentable, especialmente cuando se considera el costo

elevado de lanzar recursos desde la Tierra.

Según las estimaciones de ULA, el costo actual de llevar agua al espacio desde la tierra ronda entre los US\$5.000 por 1 [kg] (hasta la órbita terrestre baja) y los US\$35.000 por 1 [kg] (hasta la superficie Lunar). Este modelo económico se basa en la creación de una infraestructura que permita la extracción, procesamiento y distribución de agua en el espacio cislunar, creando así una economía autosustentable que podría generar ingresos significativos a largo plazo. Según el modelo planteado por ULA, se espera una demanda de 140.000 [ton] de agua por año.

Además de su valor económico, el agua también juega un papel crucial en la sostenibilidad de las misiones de larga duración. Al reducir la dependencia de los suministros terrestres, las misiones pueden ser más flexibles y autónomas, lo que es esencial para la exploración a largo plazo y la colonización del espacio. Sin embargo, la explotación de agua en la Luna plantea desafíos logísticos y técnicos que deben ser abordados para que la Visión CisLunar 1000 sea viable.

3.2. Agua en la Superficie Lunar ([4], [5], [6], [8])

La existencia de agua en los polos lunares se ha discutido desde hace varios años, esto es, debido a que existen lugares donde no hay luz solar nunca, lo que permite la existencia de "trampas" de hielo. Comprobar la existencia de agua en la luna ha demostrado ser de especial dificultad, debido a las capacidades de los equipos utilizados para realizar estudios a distancia. Según una compilación de información realizada por D. A. Paige et al., utilizando información otorgada por el LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) de la NASA, se puede encontrar evidencia clara de la existencia de agua en forma de hielo en los polos. Específicamente en cráteres que se encuentran oscurecidos durante todo el tiempo. Los datos también demuestran que el hielo no se encuentra en cristales de gran tamaño, si no que se encuentran en forma de cristales pequeños mezclados en el regolito. Según la información de el LRO, en las zonas con mayor presencia de agua se aprecia una concentración de hielo del 1 % al 5 % del volumen de regolito.

A pesar de las claras ventajas que ofrece la explotación del agua lunar, existen numerosos desafíos técnicos que deben superarse. La ubicación del agua en la Luna plantea problemas significativos para su extracción. Estos cráteres, aunque ricos en recursos, son extremadamente fríos y están ubicados en áreas de difícil acceso. Además, la falta de atmósfera y la baja gravedad lunar

complican aún más las operaciones de minería y transporte.

3.3. Condiciones en la superficie lunar ([7])

Las condiciones en la superficie lunar son muy diferentes a las de la Tierra, lo que afecta las operaciones humanas y las tecnologías diseñadas para funcionar en ese entorno. La fuente de información es el Lunar Sourcebook , una compilación de información proveniente de las misiones lunares.

La gravedad lunar es aproximadamente un sexto de la terrestre. Esto significa que los objetos en la Luna pesan mucho menos que en la Tierra, lo que facilita la manipulación de cargas pesadas, pero también genera desafíos en términos de movilidad y estabilidad para equipos y seres humanos. La gravedad en la Luna es de aproximadamente 1.62 m/s^2 .

La Luna tiene una atmósfera extremadamente delgada, denominada exosfera, que no ofrece protección significativa contra la radiación solar, el viento solar o los micrometeoritos. Esto implica que cualquier actividad en la superficie lunar necesita tomar medidas de protección contra la radiación cósmica y las partículas cargadas que pueden impactar las superficies a gran velocidad.

El regolito lunar es una capa de polvo y fragmentos de roca que cubre la superficie. Este polvo es muy fino y extremadamente abrasivo, lo que representa un desafío para los equipos y vehículos, ya que puede dañar los mecanismos y penetrar en trajes espaciales. Además, su composición química reactiva puede ser problemática si se inhala o entra en contacto con los humanos.

Debido a la falta de una atmósfera y un campo magnético significativo, la Luna está expuesta a altos niveles de radiación cósmica y radiación solar directa. Esto representa un riesgo considerable para los humanos y equipos, especialmente durante las tormentas solares.

El ciclo lunar tiene una duración de aproximadamente 29.5 días terrestres, lo que significa que un día completo (incluyendo el día y la noche lunar) dura casi un mes terrestre. Esto trae como consecuencia que las misiones deben lidiar con largos periodos de oscuridad o luz solar intensa.

El entorno térmico de la Luna presenta tres escenarios principales: diurno, nocturno y polar.

Durante el día, la temperatura superficial está determinada por la radiación solar incidente. Dado que la conductividad térmica del regolito lunar es baja y el día lunar es extenso, las superficies iluminadas mantienen una temperatura cercana al equilibrio radiativo. Las variaciones de temperatura diurna en función de la latitud y la hora local dependen principalmente de la distancia angular al punto subsolar. Por otro lado, el entorno nocturno se caracteriza por un frío extremo, ya que la Luna carece de océanos y una atmósfera significativa que amortigüe las pérdidas de radiación térmica hacia el espacio durante la noche lunar, que dura aproximadamente 14 días. Debido a la baja conductividad térmica de las capas superiores del regolito lunar, el calor almacenado durante el día se transfiere lentamente hacia la superficie, lo que hace que las temperaturas nocturnas se mantengan alrededor de los 100 K (-173 °C) durante toda la noche lunar. La penetración de la onda de temperatura diurna alcanza aproximadamente 30 cm de profundidad. Además, las variaciones estacionales de insolación en la Luna son el resultado de la inclinación de 5.14° de su plano orbital respecto a la eclíptica y la inclinación de 6.68° de su eje de rotación respecto a su plano orbital. Consecuentemente, las regiones polares reciben poca luz solar directa, siendo la topografía y las estaciones factores determinantes en los niveles de iluminación.

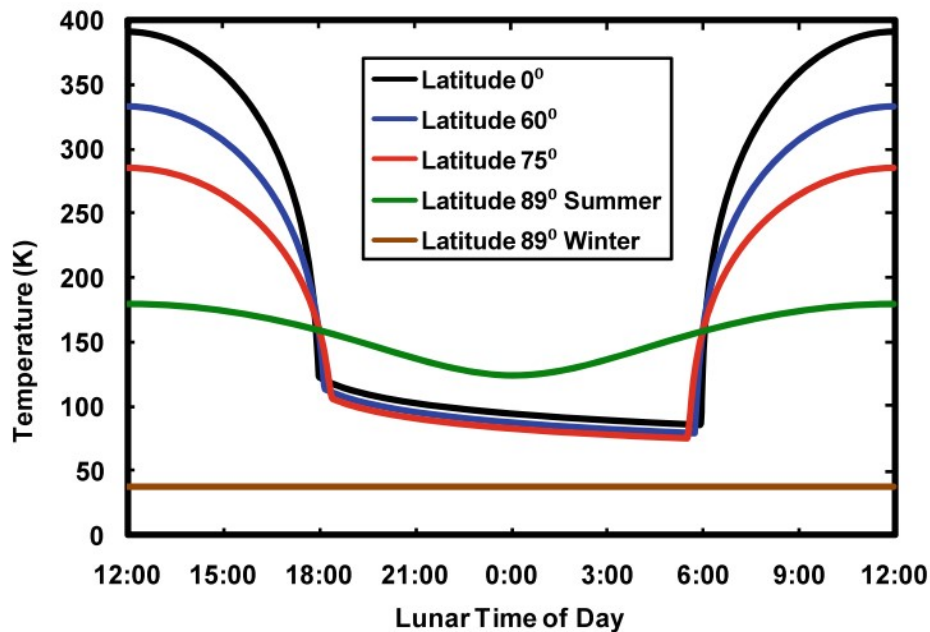


Figura 2: Perfil térmico en la superficie lunar (D.A. Paige et al.)[7]

En la figura anterior, se muestra el perfil térmico en la superficie lunar con respecto a la hora lunar.

En base al perfil térmico se puede apreciar que la temperatura es más estable en los polos, pero es menor en promedio, lo que sugiere la necesidad de ubicar un posible asentamiento a largo plazo en latitudes que no sean polares. El perfil térmico en latitudes no polares se comporta de manera similar sin importar mucho la latitud (mientras sea no polar). Empezando por una temperatura alta durante el día, llegando a temperaturas muy similares durante la noche de alrededor de 100 K (-173 °C). Existe una variación importante en la magnitud de la temperatura máxima al medio día, siendo la máxima en la línea del ecuador, alcanzando un valor de 400 K (127 °C). Lo anterior sugiere que para evitar cambios muy pronunciados entre la noche y el día y tampoco cambios entre el verano y el invierno, se debe evitar la línea del ecuador y los polos.

3.3.1. Resumen de las Condiciones en la Superficie Lunar

Tabla 1: Condiciones en la superficie lunar.

Condición	Descripción
Gravedad	La gravedad lunar es aproximadamente 1/6 de la terrestre, es decir, 1.62 m/s ² . Esto facilita la manipulación de cargas, pero complica la movilidad y estabilidad.
Atmósfera	La Luna tiene una atmósfera extremadamente delgada (exosfera), lo que no brinda protección contra la radiación solar, micrometeoritos o el viento solar.
Regolito lunar	El regolito es una capa de polvo fino y abrasivo que puede dañar equipos, penetrar trajes espaciales y ser peligroso para los humanos si se inhala. Se encuentra en prácticamente toda la superficie lunar.
Radiación	La ausencia de un campo magnético y una atmósfera significa que la superficie está expuesta a altos niveles de radiación cósmica y solar, especialmente durante tormentas solares.
Ciclo lunar	Un día completo en la Luna (día y noche) dura 29.5 días terrestres. Las misiones deben enfrentar largos periodos de oscuridad o intensa luz solar.
Temperaturas diurnas	Las temperaturas durante el día alcanzan el equilibrio radiativo y varían según la latitud y hora local, alcanzando extremos debido a la baja conductividad térmica del regolito.
Temperaturas nocturnas	Durante la noche lunar, que dura alrededor de 14 días terrestres, las temperaturas caen a aproximadamente 100 K debido a la falta de atmósfera y la baja conductividad del regolito.
Variaciones estacionales	Debido a la inclinación orbital de la Luna, las regiones polares reciben menos luz solar directa y experimentan menor variación de temperatura en comparación con otras regiones.
Estabilidad térmica	Las regiones polares ofrecen mayor estabilidad térmica, pero las temperaturas son menores en promedio. Las latitudes intermedias podrían evitar temperaturas muy bajas.

3.3.2. Topografía de la superficie lunar

La topografía lunar está marcada por una serie de características distintivas como cráteres, montañas, cuencas y mares secos, que reflejan su historia geológica. A continuación, se describen las principales características topográficas de la Luna, tanto en general como en los polos.

Condiciones Topográficas Generales

La superficie lunar se puede dividir en dos tipos principales de terreno:

- **Mares (Mare en latín):** Son grandes planicies basálticas oscuras que cubren alrededor del 16 % de la superficie lunar. Estos "mares" no contienen agua, pero su nombre proviene de su apariencia oscura y lisa cuando se observa desde la Tierra. Se cree que se formaron por la actividad volcánica temprana, que llenó grandes cuencas de impacto con lava solidificada. Los mares son más comunes en el lado visible de la Luna. Ejemplos destacados son el *Mare Imbrium* y el *Mare Tranquillitatis*, donde aterrizó la misión Apolo 11.
- **Tierras Altas (Highlands):** Estas áreas son más brillantes, rugosas y están compuestas por materiales más antiguos, como la anortosita. Cubren la mayor parte del lado oculto de la Luna y son notablemente más elevadas que los mares. Están salpicadas de cráteres de impacto de varios tamaños, algunos de los cuales tienen cientos de kilómetros de diámetro. Las tierras altas forman las regiones más accidentadas de la Luna.

También es necesario mencionar los distintos accidentes geográficos que existen en la superficie lunar, los principales son los siguientes:

- **Cráteres de Impacto**

La Luna está cubierta de cráteres de impacto que varían en tamaño desde pequeños hoyos hasta gigantescas cuencas de varios cientos de kilómetros de diámetro. Estos cráteres han sido causados por colisiones con meteoritos y cometas a lo largo de miles de millones de años. Ejemplos notables incluyen el *Cráter Tycho*, visible desde la Tierra, y el *Cráter Aitken*, que es una de las cuencas más grandes y profundas de la Luna, ubicada en el polo sur lunar.

- **Montañas y Picos**

En la Luna, las montañas no se forman por actividad tectónica, como en la Tierra, sino como consecuencia de impactos de gran magnitud. Estos impactos crean cuencas rodeadas por montañas. Por ejemplo, las *Montes Apenninus* y los *Montes Alpes* son cadenas montañosas que rodean la cuenca del *Mare Imbrium*.

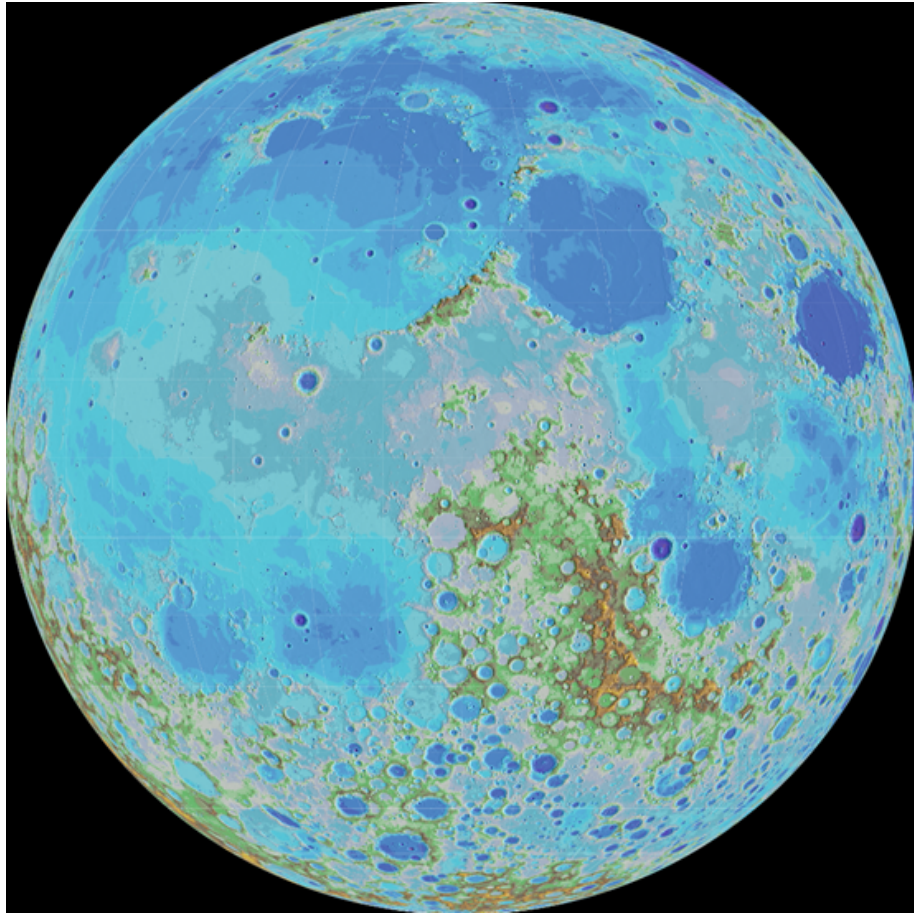


Figura 3: Mapa elevación de la superficie lunar centrado en latitud 0 (NASA)[6]

En la figura anterior se muestra con una escala de colores, las elevaciones en la superficie lunar, mostrando la similar elevación en los sectores llamados mares, mientras que los sectores con más cráteres, muestran una variación de elevación más accidentada.

Condiciones Topográficas en los Polos Lunares

Los polos lunares presentan características topográficas particulares que los hacen especialmente interesantes para futuras misiones espaciales:

- **Cráteres Polares:** En los polos, especialmente en el *polo sur*, se encuentran algunos de los cráteres más antiguos y profundos, como el *Cráter Shackleton*. Estos cráteres tienen una topografía extrema, con bordes elevados y fondos profundamente sombreados que nunca reciben luz solar directa. Esto crea las llamadas *regiones de sombra perpetua*, donde las temperaturas son extremadamente bajas, y se ubican depósitos de hielo de agua atrapados.
- **Relieve Pronunciado:** Debido a la baja inclinación axial de la Luna, las zonas polares tienen terrenos muy escarpados, lo que crea picos de luz casi eterna. Esto significa que algunas montañas o bordes de cráteres permanecen iluminados durante la mayor parte del ciclo lunar, mientras que otras áreas cercanas permanecen en sombras perpetuas. Este contraste de iluminación es uno de los desafíos y ventajas para las misiones planeadas hacia los polos lunares, ya que las regiones iluminadas son ideales para la generación de energía solar.
- **Cuenca Aitken del Polo Sur:** Esta es una de las mayores cuencas de impacto del sistema solar y tiene un diámetro de aproximadamente 2,500 km y una profundidad de 13 km. Su topografía accidentada, combinada con las áreas de sombra perpetua, hace que sea un objetivo de gran interés para la exploración científica, especialmente en busca de hielo de agua en sus profundidades.

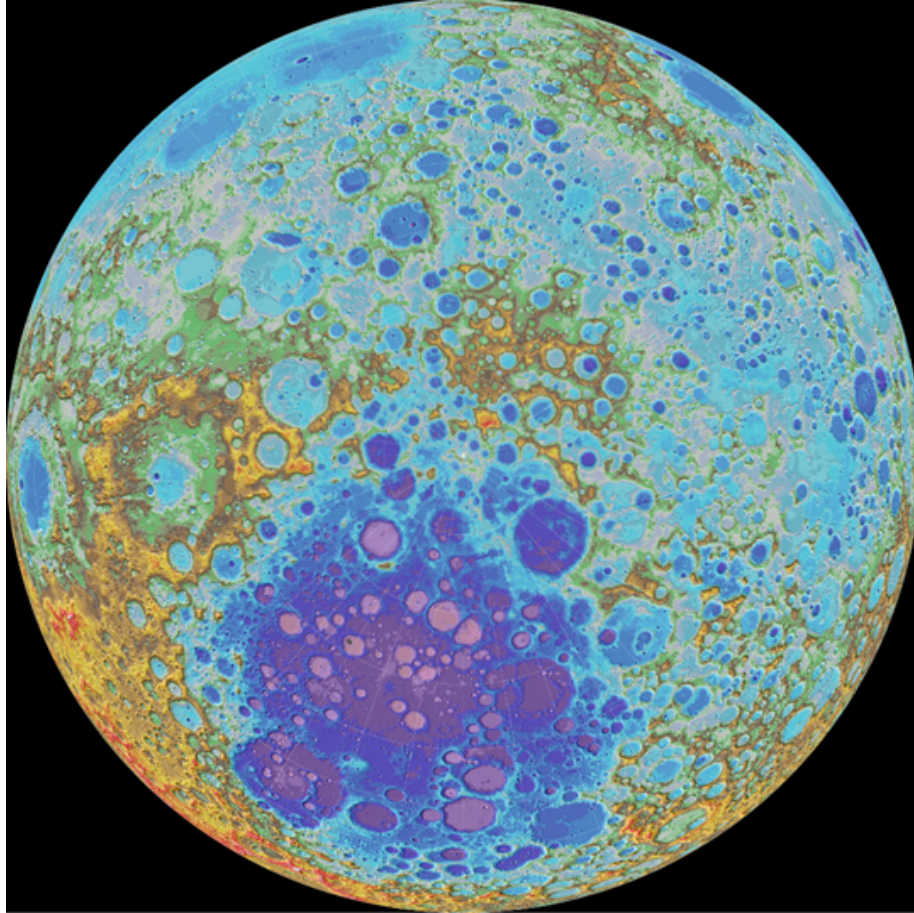


Figura 4: Mapa elevación de la superficie lunar centrado en latitud -90 (NASA)[6]

En el mapa de elevación presentado en la figura anterior, se muestra una clara topografía más accidentada que la presente en los mares de la cara visible de la luna (Lat. 0).

Implicaciones para la Exploración y asentamiento

La topografía extrema de los polos lunares, con zonas permanentemente sombreadas y picos de luz casi continua, es de gran interés para la investigación científica y futura colonización. Las áreas iluminadas pueden proporcionar energía solar casi constante, mientras que las zonas sombreadas pueden albergar hielo de agua, crucial para futuras misiones humanas que planean una permanencia prolongada en la Luna.

3.4. Transporte de agua hacia la órbita lunar ([2])

La principal forma para transportar el agua desde la superficie lunar hacia la órbita es despegando cohetes, para que luego hagan los movimientos orbitales necesarios para encontrarse con una estación espacial o nave espacial que recibirá los recursos.

Para realizar una cuantificación del esfuerzo necesario para transportar una nave espacial con carga se utiliza la unidad ΔV (Delta V), la cual describe la cantidad de cambio de velocidad que es necesaria para alcanzar un objetivo, por ejemplo, una órbita específica.

El aterrizar y despegar desde latitudes más centrales es menos costoso en ΔV , ya que las operaciones que se deben realizar en órbita para encontrarse con una estación espacial u otra nave son menores si la órbita es cercana al plano ecuatorial. El menor costo en ΔV afecta directamente al costo final del agua. Se encontró en la literatura un análisis de sensibilidad para el costo del agua con respecto a los ΔV que sean necesarios para transportar el agua desde la superficie lunar hacia una órbita CisLunar, donde se aprecian los siguientes resultados:

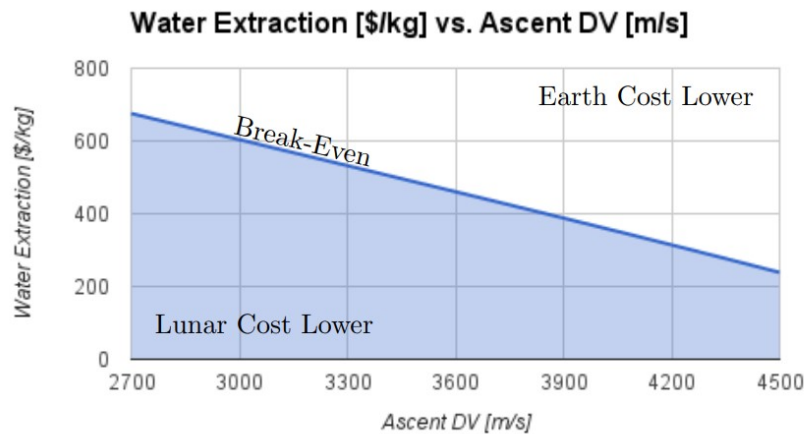


Figura 5: Análisis de sensibilidad de costo de agua vs Delta V (Trevor Bennett et al. [2])

En la figura 5 se puede apreciar una clara relación entre el ΔV de ascenso y el costo del agua para la economía cislunar.

Como el agua se encuentra en los polos y despegar desde ahí afectaría negativamente en el costo, además de los distintos problemas presentados por un asentamiento en locaciones polares, surge

la necesidad de transportar el agua. El transporte de agua desde los polos hacia las bases situadas en latitudes más accesibles es un reto particular. Las soluciones tradicionales, como el transporte por rovers o la construcción de tuberías, son técnicamente viables pero presentan limitaciones significativas debido a las condiciones extremas de la Luna. La baja gravedad afecta la eficiencia del transporte, y la ausencia de atmósfera significa que no hay protección natural contra la radiación solar y los micro-meteoritos, lo que aumenta el riesgo para los equipos y los operadores.

3.5. Tecnologías de transporte

3.5.1. Vías Férreas Tradicionales ([22])

Los sistemas de transporte por vías férreas tradicionales son una tecnología ampliamente utilizada en todo el mundo para el transporte de pasajeros y carga. Estos sistemas dependen de la interacción mecánica entre las ruedas del tren y los rieles metálicos para su funcionamiento.

Principios de Funcionamiento

- **Interacción Rueda-Riel:** El contacto entre las ruedas metálicas y los rieles proporciona tanto el soporte como la tracción necesarios para mover el tren. La fricción y el diseño del perfil de las ruedas permiten una estabilidad lateral y un desplazamiento eficiente. Esta interacción se puede apreciar en la figura 6
- **Sistemas de Propulsión:** Los trenes tradicionales suelen utilizar motores eléctricos o diesel-eléctricos para generar la energía necesaria para su desplazamiento. Los sistemas eléctricos obtienen energía de catenarias o de un tercer riel, mientras que los diesel-eléctricos obtienen la energía de un generador diesel.
- **Frenado y Control:** Los sistemas de frenado incluyen frenos mecánicos, frenos eléctricos regenerativos y sistemas de control avanzados para garantizar la seguridad durante la operación.

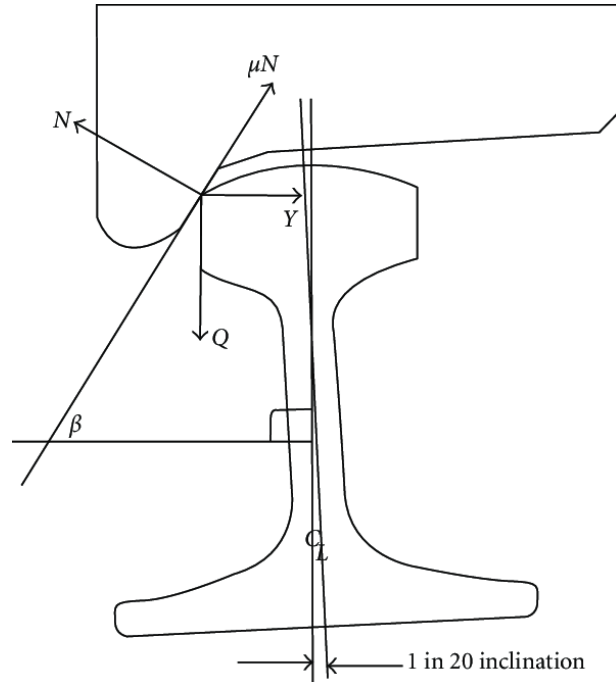


Figura 6: Diagrama Interacción Rueda-Riel (C. Lai et al. [9])

Ventajas de los Sistemas Tradicionales

- **Tecnología establecida:** La red ferroviaria tradicional está ampliamente desarrollada y es utilizada para distintos fines en muchos lugares.
- **Capacidad de Carga:** Estos sistemas son capaces de transportar grandes volúmenes de carga y pasajeros de manera eficiente.
- **Costo Comparativamente Bajo:** En comparación con sistemas de levitación magnética, los trenes tradicionales tienen menores costos iniciales de instalación y operación.

Desventajas y Desafíos

- **Fricción y Desgaste:** El contacto continuo entre las ruedas y los rieles genera desgaste en ambos componentes y limita la velocidad máxima.
- **Mayor Mantenimiento:** La infraestructura y los componentes mecánicos requieren un mantenimiento más frecuente y costoso.

- **Limitaciones de Velocidad:** Las velocidades de los trenes tradicionales son significativamente menores en comparación con los sistemas de levitación magnética.
- **Dilatación térmica:** La materialidad de los sistemas tradicionales son de rieles y ruedas de acero, los cuales son susceptibles a el fenómeno de dilatación térmica, el cual debe ser mitigado.

Los sistemas de transporte por vías férreas tradicionales siguen siendo una opción versátil y económica para una variedad de aplicaciones, aunque su rendimiento y capacidades se pueden ver limitados por los principios mecánicos que los rigen. Además, la fricción en la interacción riel-rueda genera un desgaste que se debe controlar mediante mantenimiento. Otro posible problema a considerar es la dilatación termica que ocurre con el acero de los rieles y las ruedas.

3.5.2. Levitación Magnética EDS (Electrodynamic Suspension) ([10], [11])

El sistema de levitación magnética por suspensión electrodinámica (EDS, por sus siglas en inglés) es una tecnología que utiliza las fuerzas generadas por corrientes inducidas para alcanzar la levitación y el desplazamiento de un vehículo sobre una vía sin contacto mecánico. Este principio se basa en las leyes fundamentales del electromagnetismo, específicamente en la *Ley de Faraday* y la *Ley de Lenz*.

Principios de Funcionamiento

- **Generación de Corrientes Inducidas:**

El EDS utiliza imanes superconductores o de alta intensidad montados en el vehículo, que se mueven a lo largo de una pista equipada con bobinas conductoras (generalmente de aluminio o cobre). Cuando el vehículo se desplaza, el cambio en el flujo magnético a través de las bobinas induce corrientes eléctricas en ellas, según la Ley de Faraday.

- **Fuerza de Levitación y Guiado:**

Las corrientes inducidas generan campos magnéticos secundarios que interactúan con los campos magnéticos de los imanes en el vehículo. Esta interacción produce fuerzas repulsivas que levantan el vehículo y lo separan de la vía. Además de la levitación, el EDS proporciona

fuerzas laterales que estabilizan el vehículo dentro de la vía, evitando el contacto físico con las paredes o el desplazamiento fuera del eje central. Estas interacciones se ven reflejadas en la figura 7

■ Fuerza de Propulsión:

Para la propulsión, el EDS proporciona un impulso mediante el uso de motores lineales posicionados a lo largo de la pista, estos motores lineales son controlados mediante variadores de frecuencia que no se encuentran en el vehículo, por lo tanto, la pista “controla” al vehículo.

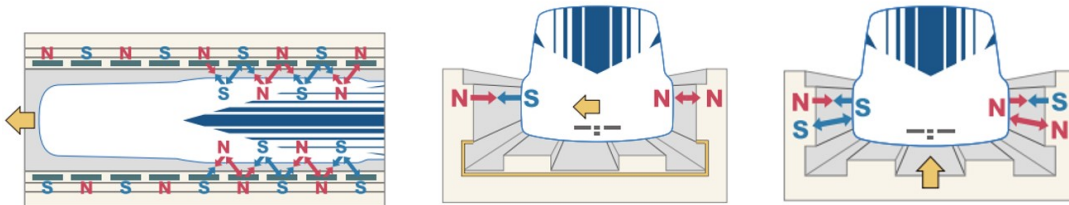


Figura 7: Diagrama SCMaglev (JR Central)

Ventajas del Sistema EDS

- **Alta Velocidad:** La ausencia de fricción mecánica permite velocidades superiores a las de los trenes convencionales.
- **Estabilidad Intrínseca:** El sistema es autoestabilizante, lo que significa que cualquier desviación del vehículo genera fuerzas que lo regresan a su posición de equilibrio.
- **Bajo Mantenimiento:** Al no haber contacto físico, el desgaste de componentes se reduce drásticamente.

Desventajas y Desafíos

- **Consumo Energético Inicial:** El sistema requiere alcanzar una velocidad mínima para generar corrientes suficientes que permitan la levitación. Esto implica que el vehículo necesita ruedas auxiliares para arrancar y detenerse.
- **Consumo energético de enfriamiento:** Un sistema que funcione con electroimanes

superconductores, requiere mantener estos imanes a una muy baja temperatura, lo que gasta una gran cantidad de energía.

- **Infraestructura Costosa:** Las vías deben estar construidas con materiales conductores específicos y soportar los campos magnéticos intensos.

El EDS es particularmente relevante en el contexto de este proyecto de transporte en la Luna, ya que puede adaptarse a las condiciones extremas del entorno lunar e incluso aprovechar la falta de atmósfera y la mala conducción térmica que eso conlleva para ser más eficiente en términos energéticos. Su implementación permitiría transportar agua u otros recursos de manera eficiente y sostenible en la Luna.

3.5.3. Levitación Magnética EMS (Electromagnetic Suspension)([14])

El sistema de levitación magnética por suspensión electromagnética (EMS, por sus siglas en inglés) es otra tecnología clave para la levitación y el desplazamiento de vehículos sin contacto mecánico. Este sistema utiliza fuerzas de atracción magnética generadas por electroimanes controlados activamente para mantener al vehículo suspendido sobre la vía.[14]

Principios de Funcionamiento

- **Electroimanes Activos:** Los electroimanes montados en el vehículo generan campos magnéticos que interactúan con materiales ferromagnéticos dispuestos en la vía. La fuerza de atracción mantiene al vehículo suspendido, con una separación mínima entre el vehículo y la vía.
- **Control Activo de Levitación:** Sensores de alta precisión detectan constantemente la distancia entre el vehículo y la vía, enviando esta información a un sistema de control que ajusta la corriente en los electroimanes para mantener una separación estable.
- **Fuerzas de Propulsión y Guiado:** Además de la levitación, el EMS utiliza motores lineales integrados en la vía para proporcionar propulsión y fuerzas laterales para mantener el vehículo centrado los cuales se pueden apreciar en la figura 8.

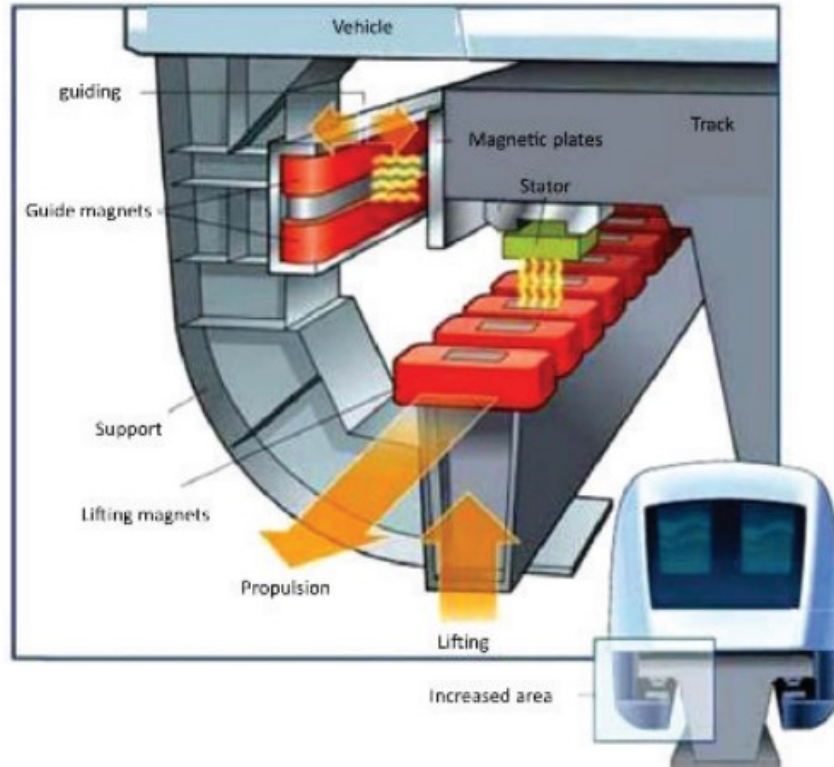


Figura 8: Diagrama EMS (Transrapid)[14]

Ventajas del Sistema EMS

- **Baja Velocidad Inicial:** A diferencia del EDS, el EMS no requiere alcanzar altas velocidades para lograr la levitación, ya que los electroimanes funcionan desde el arranque.
- **Control Preciso:** La tecnología de sensores y sistemas de control permite una operación extremadamente estable y segura.
- **No necesita enfriamiento:** Este sistema no requiere el uso de electroimanes superconductores, lo que significa que no es necesario el uso de sistemas de enfriamiento.

Desventajas y Desafíos

- **Consumo Energético Continuo:** Los electroimanes requieren un suministro constante de energía para mantener la levitación, lo que puede aumentar los costos operativos.

- **Distancia Limitada:** La separación entre el vehículo y la vía es mucho menor que en el EDS, lo que incrementa el riesgo de contacto en caso de fallos en el sistema de control.
- **Complejidad del Sistema de Control:** Los sistemas de retroalimentación y ajuste constante pueden ser complejos y costosos de mantener.

El EMS es particularmente adecuado para aplicaciones en las que se requiere un control preciso desde bajas velocidades. Las aplicaciones de este sistema suelen no ser de alta carga, debido a que la cantidad de energía para levitar una carga pesada sería muy alta sin embargo, se pueden realizar adaptaciones a este sistema para ser más adecuado al transporte de carga. Las condiciones lunares, pueden presentar desafíos para un sistema de este estilo, debido a la falta de protección electromagnética en la Luna.

3.5.4. Levitación Magnética Inductrack ([14])

El sistema de levitación magnética Inductrack es una tecnología basada en principios pasivos que utiliza imanes permanentes organizados en configuraciones específicas para generar levitación sin necesidad de electroimanes o superconductores. Este sistema aprovecha la interacción entre los imanes permanentes y bobinas conductoras dispuestas en la vía para lograr la levitación.

Principios de Funcionamiento

- **Arreglo Halbach:** Los imanes permanentes en el Inductrack están dispuestos en un “*arreglo Halbach*”, una configuración especial que concentra el campo magnético en un lado del arreglo y lo cancela en el otro, esto se puede apreciar en la figura 9. Descubierta por Klaus Halbach en 1980, esta matriz maximiza la eficiencia de la interacción magnética con la vía.

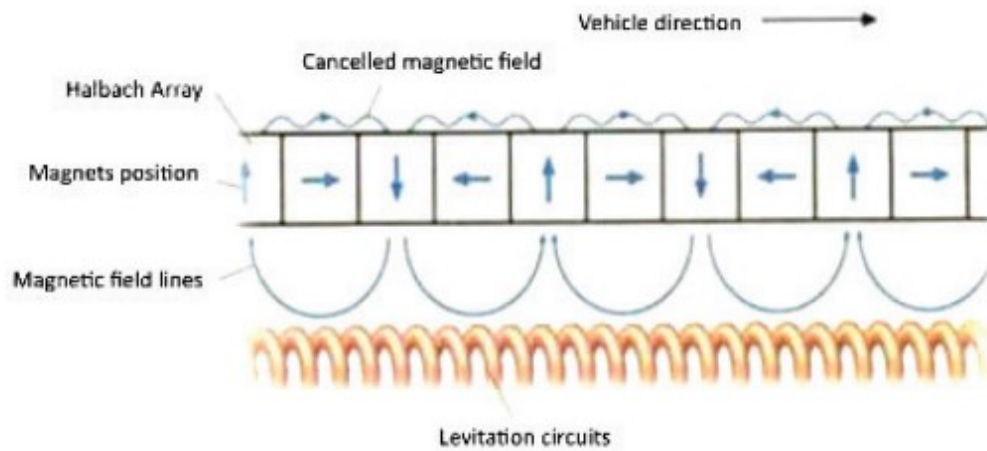


Figura 9: Sistema Inductrack (A. M. G. Jacob et al. [14])

- **Corrientes Inducidas:** Cuando el vehículo se mueve, el campo magnético del “*arreglo Halbach*” induce corrientes eléctricas en las bobinas de la vía. Estas corrientes generan campos magnéticos opuestos que producen una fuerza de levitación.
- **Levitación Pasiva:** A diferencia del EMS y el EDS, el Inductrack no requiere un sistema de control activo ni suministro constante de energía para los imanes, lo que simplifica su operación.

Ventajas del Sistema Inductrack

- **Simplicidad:** El uso de imanes permanentes elimina la necesidad de sistemas complejos de control o refrigeración.
- **Bajo Consumo Energético:** No requiere energía activa para mantener la levitación, lo que reduce los costos operativos.
- **Seguridad:** En caso de fallo del sistema, el vehículo simplemente aterriza sobre ruedas auxiliares, ya que no depende de fuerzas activas para la levitación.

Desventajas y Desafíos

- **Velocidad Mínima Requerida:** Al igual que el EDS, el Inductrack necesita que el vehículo alcance una velocidad mínima para generar corrientes suficientes que permitan la levitación.

- **Fuerza de Levitación Limitada:** La fuerza de levitación es menor en comparación con otros sistemas activos, lo que podría restringir su capacidad de carga.
- **Infraestructura Especializada:** Aunque más sencilla que otros sistemas, la vía debe estar equipada con bobinas conductoras optimizadas.

El sistema Inductrack representa una alternativa prometedora para aplicaciones donde la simplicidad, seguridad y bajo consumo energético son factores clave. Aunque aún se encuentra en etapas de desarrollo, su potencial lo convierte en una opción interesante para futuras tecnologías de transporte.

4. Estado del Arte

4.1. Sistemas de Transporte Magneto Levíticos

Para comprender mejor los sistemas de levitación magnética descritos anteriormente en el marco teórico, se analizarán diversos sistemas de transporte magneto levítico que actualmente operan o se encuentran en fase de investigación.

4.1.1. SCMaglev (Japón)([10], [11])



Figura 10: SCMaglev Series L0 (JR Central)

Historia del SCMaglev

El desarrollo del SCMaglev (Superconducting Maglev) japonés comenzó en la década de 1960, impulsado por la necesidad de crear un sistema de transporte ferroviario más rápido y eficiente que los trenes convencionales de alta velocidad, como el famoso Shinkansen. La investigación inicial se centró en el uso de levitación magnética mediante electroimanes, pero la tecnología avanzó hacia la superconductividad en la década de 1970, permitiendo mayores velocidades y una mayor estabilidad.

El Japan Railways Group (JR Central) lideró el desarrollo de esta tecnología con el objetivo de reducir los tiempos de viaje entre las principales ciudades japonesas. El primer prototipo de SCMaglev se probó en 1977, y desde entonces, la tecnología ha seguido evolucionando. En 1997, se construyó una pista de prueba de 18.4 km en Yamanashi, que más tarde se extendió a 42.8 km, donde el SCMaglev ha alcanzado velocidades récord, incluida una marca de 603 km/h en 2015. Actualmente se encuentra en fase de construcción de una línea de distancia real.

Especificaciones de la Tecnología

a. Levitación Superconductora

La tecnología SCMaglev se basa en la levitación superconductora, que utiliza materiales superconductores a bajas temperaturas para generar potentes campos magnéticos. El sistema utilizado es el EDS (Electrodynamic Suspension), los imanes superconductores a bordo del tren interactúan con bobinas en las vías, creando fuerzas magnéticas que levantan el tren hasta 10 cm por encima de la vía.

- Superconductores: El SCMaglev utiliza bobinas superconductoras de niobio-titanio (NbTi) enfriadas a aproximadamente -269°C mediante helio líquido, lo que les permite llevar corrientes eléctricas sin resistencia y generar campos magnéticos extremadamente fuertes.
- Levitación: El tren se levanta cuando las corrientes eléctricas inducen un campo magnético en las bobinas del suelo, lo que contrarresta la gravedad y permite que el tren flote sin fricción mecánica.

b. Propulsión Lineal

La propulsión del SCMaglev se basa en un motor lineal sincrónico (LSM). A diferencia de los motores rotativos convencionales, en los que una parte giratoria (rotor) interactúa con una parte fija (estator), en el LSM, el estator está extendido a lo largo de la vía y el tren actúa como el rotor.

- Funcionamiento: Las bobinas instaladas a lo largo de la vía crean campos magnéticos alternos que “arrastran” al tren hacia adelante. La propulsión lineal permite una aceleración suave y una alta eficiencia a velocidades extremas.

- Control: La velocidad y dirección del tren se controlan ajustando la frecuencia y la fase de la corriente eléctrica en las bobinas de la vía.

c. Velocidad y Eficiencia

- Velocidades alcanzadas: En pruebas, el SCMaglev ha alcanzado velocidades de hasta 603 km/h, aunque la velocidad operativa comercial prevista será de aproximadamente 500 km/h.
- Fricción mínima: Al eliminar el contacto físico entre el tren y la vía, la resistencia por fricción se minimiza, lo que mejora la eficiencia energética y reduce el desgaste mecánico.

Estado Actual de la Tecnología

El SCMaglev ha avanzado significativamente desde sus inicios y está actualmente en una fase avanzada de desarrollo. Japón está en proceso de construir una línea SCMaglev comercial, conocida como la Chūō Shinkansen, que conectará Tokio con Nagoya para 2027, y posteriormente con Osaka.

a. Pruebas y Operaciones

El centro de pruebas en Yamanashi sigue siendo el lugar principal donde se realizan pruebas de la tecnología SCMaglev. Las pruebas en esta pista han permitido a JR Central perfeccionar el diseño del tren, optimizar la tecnología de levitación y propulsión, y mejorar la seguridad.

b. Infraestructura

La construcción de la infraestructura necesaria para el SCMaglev implica desafíos técnicos importantes, ya que aproximadamente el 86 % de la línea Chūō Shinkansen se construirá en túneles debido a la densa población y la geografía montañosa de Japón.



Figura 11: Mapa SCMaglev (JR Central)

c. Capacidad y Beneficios

- Capacidad de transporte: Se espera que el SCMaglev transporte más de 1000 pasajeros por tren, con trenes que operan cada 10 minutos durante las horas punta.
- Beneficios ambientales: Aunque el SCMaglev requiere una gran cantidad de energía para operar, su eficiencia en velocidad y capacidad podría compensar en parte su huella ambiental. Además, al reducir el tiempo de viaje entre grandes ciudades, se espera una reducción en la dependencia de viajes en avión domésticos, que generan más emisiones de carbono.

Planes Futuros

El proyecto de la línea Chūō Shinkansen es uno de los proyectos de infraestructura más ambiciosos en Japón. Los planes futuros para el SCMaglev incluyen:

a. Extensión de la Línea

- Tokio-Osaka: La línea inicial de Tokio a Nagoya (285 km) se extenderá hasta Osaka, lo que reducirá el tiempo de viaje entre Tokio y Osaka de las actuales 2 horas y 30 minutos (en el Shinkansen) a solo 1 hora.
- Internacionalización: Japón está explorando oportunidades para exportar la tecnología SCMaglev a otros países. En particular, se han realizado estudios para implementar una línea SCMaglev en los Estados Unidos, conectando Washington D.C. con Nueva York.

b. Mejoras Tecnológicas

JR Central sigue investigando formas de mejorar la eficiencia energética del SCMaglev, reducir los costos de operación y mantenimiento, y minimizar el impacto ambiental.

Método de Construcción del SCMaglev

El desarrollo de una línea de SCMaglev involucra la creación de una infraestructura compleja que debe soportar velocidades extremadamente altas y cargas magnéticas significativas. El método de construcción incluye:

a. Diseño de la Vía

Las vías del SCMaglev están equipadas con bobinas para levitación y propulsión. La construcción de las vías requiere precisión extrema para garantizar que los trenes floten de manera estable a alta velocidad.

- **Materiales:** Se utilizan materiales conductores de alta calidad en las bobinas para garantizar la confiabilidad del sistema.
- **Tolerancias:** La separación entre el tren y la vía es de solo unos pocos centímetros, lo que requiere que las vías estén construidas con una precisión milimétrica.

b. Túneles y Viaductos

Gran parte de la línea Chūō Shinkansen está en túneles y viaductos debido a las accidentadas condiciones geográficas de Japón. La construcción de estas obras son distintas a las construidas para sistemas ferroviarios comunes, debido a la velocidad y naturaleza del sistema SCMaglev. Estas diferencias radican principalmente a los radios de curvas y peraltes aceptados.

- **Túneles:** Los túneles se construyen utilizando tecnologías avanzadas de perforación y refuerzo para garantizar la estabilidad y seguridad a largo plazo.
- **Viaductos:** En las áreas no subterráneas, se están construyendo viaductos elevados para reducir el impacto en el paisaje urbano y rural.

- c. **Estaciones** Las estaciones del SCMaglev están diseñadas para acomodar trenes de gran capacidad y están equipadas con tecnología avanzada para garantizar una operación eficiente y segura. Las estaciones subterráneas, en particular, requerirán sistemas de ventilación y evacuación de alta eficiencia.

El SCMaglev es una tecnología revolucionaria que está en el umbral de la implementación comercial. Su capacidad para reducir drásticamente los tiempos de viaje, junto con su tecnología avanzada de levitación y propulsión, lo posiciona como el futuro del transporte ferroviario de alta velocidad en Japón y potencialmente en todo el mundo.

4.1.2. Shanghai Maglev (China)([14])



Figura 12: Shanghai Maglev (Shanghai Maglev)

Historia del Maglev de Shanghai

El Shanghai Maglev es el primer tren de levitación magnética comercial de alta velocidad en el mundo. Su desarrollo comenzó en la década de 1990, cuando China buscaba implementar tecnologías de transporte innovadoras para modernizar sus infraestructuras y reducir la congestión en las grandes ciudades. En 2001, el gobierno chino eligió la tecnología de levitación magnética desarrollada por la empresa alemana Transrapid para construir una línea de demostración en Shanghai. La construcción de la línea Maglev de Shanghai comenzó en marzo de 2001 y fue

completada en un tiempo récord de dos años, inaugurándose oficialmente en diciembre de 2002.

La línea conecta la estación de Longyang Road en el centro de Shanghai con el Aeropuerto Internacional de Pudong, cubriendo una distancia de 30.5 kilómetros en aproximadamente 7 minutos, a una velocidad máxima operativa de 431 km/h. Esto no solo posicionó a Shanghai como una ciudad pionera en la implementación de tecnologías avanzadas de transporte, sino que también fue una demostración de las capacidades tecnológicas de China en términos de infraestructura y eficiencia.

Especificaciones de la Tecnología

a. Levitación Magnética

El sistema Maglev de Shanghai utiliza la tecnología de levitación electromagnética (EMS) desarrollada por Transrapid. A diferencia de los sistemas superconductores como el SCMaglev japonés, el Maglev de Shanghai se basa en la interacción de electroimanes controlados electrónicamente ubicados en el tren y en las guías a lo largo de la vía.

- **Levitación:** El tren se eleva aproximadamente 10 mm sobre la vía mediante el uso de electroimanes que generan fuerzas de atracción controladas. Esta pequeña distancia garantiza una operación estable y permite que el tren se desplace sin fricción.
- **Control dinámico:** La distancia entre el tren y la vía se ajusta constantemente mediante sensores y sistemas de control, lo que garantiza una operación suave a diferentes velocidades.

b. Propulsión Electromagnética

El Maglev de Shanghai se propulsa mediante un motor lineal sincrónico (LSM). En este sistema, las bobinas instaladas a lo largo de la vía generan campos magnéticos que interactúan con los electroimanes a bordo del tren, impulsándolo hacia adelante.

- **Motor lineal:** A medida que se activa el campo magnético en diferentes segmentos de la vía, el tren es “arrastrado” hacia adelante. Esto elimina la necesidad de motores convencionales y permite que el tren acelere de manera suave hasta su velocidad máxima.

- Frenado regenerativo: El sistema también permite un frenado eficiente mediante la inversión de los campos magnéticos, lo que no solo desacelera el tren, sino que también recupera parte de la energía utilizada durante el frenado.

c. Velocidad y Capacidad

- Velocidad operativa: La velocidad máxima operativa del Maglev de Shanghai es de 431 km/h, lo que permite completar el trayecto de 30.5 km en solo 7-8 minutos. Durante pruebas, el tren ha alcanzado una velocidad máxima de 501 km/h.
- Capacidad: Cada tren puede transportar hasta 574 pasajeros en una configuración de dos vagones. Los asientos están diseñados para maximizar el confort a altas velocidades.

Estado Actual de la Tecnología

Desde su inauguración en 2002, el Maglev de Shanghai ha operado de manera continua, siendo el primer sistema Maglev comercial del mundo en alcanzar un éxito operativo a largo plazo. A pesar de los altos costos iniciales de construcción, el Maglev ha demostrado ser un modelo viable para el transporte urbano y una prueba de concepto para futuros sistemas Maglev en China y en otros países.



Figura 13: Mapa del Shanghai Maglev (Shanghai Maglev)

a. Operación y Mantenimiento

El tren opera con una alta confiabilidad, transportando a miles de pasajeros diariamente entre el centro de Shanghai y el aeropuerto internacional de Pudong. Sin embargo, el sistema requiere un mantenimiento regular debido a la complejidad de su tecnología electromagnética y a la necesidad de mantener la precisión en la distancia entre el tren y la vía.

b. Limitaciones

A pesar de su velocidad y eficiencia, el Maglev de Shanghai ha enfrentado críticas debido al alto costo de los billetes, que ha limitado su adopción por parte de pasajeros regulares. Además, su corta longitud de recorrido (solo 30.5 km) limita su utilidad práctica como medio de transporte para viajes más largos dentro del área urbana.

Planes Futuros**a. Extensión de la Línea**

Uno de los planes futuros más discutidos para el Maglev de Shanghai ha sido la extensión de la línea desde la estación de Longyang Road hacia el centro de Shanghai y, eventualmente, hacia Hangzhou. Este proyecto ha sido discutido durante varios años, pero enfrenta desafíos debido a los altos costos de construcción y las preocupaciones sobre el impacto ambiental y las emisiones electromagnéticas.

b. Desarrollo de Nuevas Líneas Maglev en China

El éxito del Maglev de Shanghai ha impulsado el interés en otras ciudades chinas, como Beijing y Guangzhou, para considerar la construcción de sistemas Maglev de alta velocidad. Se han anunciado planes en el corto plazo para la construcción de un tren Maglev que conecte Beijing y Shanghai a una velocidad aproximada de 600 km/h, lo que reduciría significativamente los tiempos de viaje en comparación con los trenes de alta velocidad actuales.

Método de Construcción del Maglev de Shanghai

La construcción del Maglev de Shanghai representó un desafío técnico y logístico significativo, debido a la complejidad de la tecnología y la necesidad de construir una infraestructura completamente nueva para soportar el sistema de levitación magnética.

a. Construcción de la Vía

La vía del Maglev de Shanghai se construyó utilizando una estructura elevada de hormigón, con segmentos prefabricados ensamblados a lo largo del recorrido de 30.5 km. Las guías laterales en las que están instaladas las bobinas electromagnéticas fueron alineadas con una precisión milimétrica para garantizar la estabilidad del tren a alta velocidad.

- **Materiales:** Se utilizaron materiales avanzados, como hormigón de alta resistencia y acero, para asegurar la durabilidad y precisión de la vía
- **Aislamiento electromagnético:** Se implementaron medidas para reducir la interferencia electromagnética, tanto para proteger a los pasajeros como para minimizar el impacto en las áreas circundantes.

b. Estaciones

Las estaciones del Maglev de Shanghai están diseñadas para maximizar la eficiencia del embarque y desembarque de los pasajeros. Además, se integran con otros modos de transporte público en Shanghai, como el metro, lo que facilita la conectividad en la ciudad.

4.1.3. Maglev Inductrack ([14], [12])

Historia del Maglev Inductrack

El *Inductrack* es un sistema de levitación magnética (Maglev) desarrollado a partir de una tecnología simple y robusta basada en **imanes permanentes**. Fue diseñado por el físico Richard F. Post en los *Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)* en la década de 1990. A diferencia de otras tecnologías de levitación magnética como el SCMaglev japonés y el Maglev de Shanghai, que utilizan electroimanes o superconductores, el Inductrack emplea una disposición de imanes

permanentes en un patrón conocido como “*arreglo Halbach*”. Este patrón geométrico maximiza el campo magnético sobre los imanes y lo minimiza debajo, logrando una levitación eficiente sin necesidad de sistemas de alimentación eléctrica.

El interés en esta tecnología surgió debido a sus ventajas sobre otros sistemas Maglev más complejos y costosos. El sistema Inductrack promete ser una solución económica y fiable para la levitación magnética, con aplicaciones potenciales que van desde trenes de alta velocidad hasta sistemas de transporte urbano y lanzamientos espaciales.

Especificaciones de la Tecnología

a. Levitación Basada en Imanes Permanentes

La característica principal del sistema Inductrack es el uso de imanes permanentes dispuestos en un “*arreglo Halbach*”. Este arreglo crea un campo magnético fuerte en la parte superior, que permite la levitación, mientras que el campo por debajo de los imanes es casi nulo. Se puede apreciar en la figura 9 en uno de los capítulos anteriores.

- **Arreglo Halbach:** Los imanes permanentes están orientados de tal manera que el campo magnético se concentra en una dirección específica, incrementando la fuerza de levitación.
- **Levitación pasiva:** No se requiere un sistema de control activo para mantener el tren en levitación, lo que reduce la complejidad operativa en comparación con sistemas de levitación activa.

b. Sistema de Propulsión

El sistema Inductrack utiliza un *motor lineal de inducción* (LIM) o un *motor lineal sincrónico* (LSM) para la propulsión del tren a lo largo de la vía. Aunque la levitación es pasiva, la propulsión requiere energía eléctrica que impulsa el tren.

- **Motores lineales:** Estos motores interactúan con las bobinas de la vía, creando fuerzas de empuje que impulsan el tren hacia adelante.

c. Eficiencia Energética

- **Levitación eficiente:** Al no requerir alimentación eléctrica para la levitación, el sistema Inductrack reduce significativamente los costos operativos relacionados con el consumo de energía.
- **Fricción mínima:** La levitación sin contacto minimiza la fricción, lo que permite que el tren alcance altas velocidades de manera más eficiente.

Estado Actual de la Tecnología

Actualmente, el sistema Inductrack ha sido probado principalmente en **demostraciones a pequeña escala**, y sigue siendo una tecnología Maglev prometedora. A pesar de no haber sido implementado en sistemas comerciales de trenes de pasajeros a gran escala, se han realizado pruebas exitosas para evaluar su viabilidad en diversas aplicaciones.

a. Aplicaciones Potenciales

Inductrack tiene un gran potencial para aplicaciones de transporte masivo y urbano:

- **Transporte Urbano:** Su bajo costo y simplicidad lo hacen ideal para el transporte urbano, donde las velocidades no necesitan ser tan altas como en los trenes interurbanos.
- **Carga y Logística:** También se ha considerado para el transporte de mercancías en sistemas logísticos automatizados, donde la levitación pasiva reduce los costos de operación.

b. Investigaciones en Curso

Inductrack sigue siendo objeto de investigación activa, con varias empresas e instituciones interesadas en explorar su potencial. General Atomics ha sido uno de los principales promotores de esta tecnología, estudiando aplicaciones comerciales y militares.



Figura 14: Prueba experimental Inductrack (A. M. G. Jacob et al. [14])

Planes Futuros

a. Expansión hacia Sistemas Comerciales

Se espera que se desarrollen nuevos prototipos y líneas de prueba para validar la tecnología en aplicaciones comerciales. Empresas como General Atomics están evaluando la tecnología para trenes ligeros y aplicaciones industriales.

- b. Transporte de Carga Pesada** Existen patentes que muestran un avance en la investigación para la aplicación de sistemas *Inductrack III* para el transporte magneto levítico de carga pesada donde existen ya patentes, donde se creó un diseño que es optimizado para el transporte de carga pesada, se puede apreciar un esquema de la patente del *Inductrack III* en la figura 15.

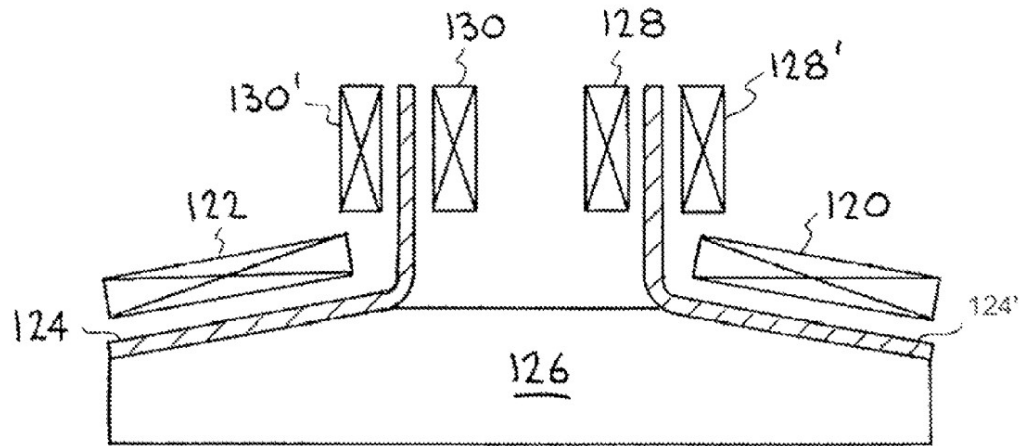


Figura 15: Patente Inductrack III (US 8,578,860 B2 [12])

c. Lanzamientos Espaciales

El concepto del *Inductrack II* ha sido estudiado incluso como una plataforma para el lanzamiento de satélites o carga mediante una catapulta magnética. Esto aprovecharía la levitación pasiva y la propulsión magnética para reducir los costos de lanzamientos espaciales.

Método de Construcción del Inductrack

El sistema Inductrack es más simple de construir que otros sistemas Maglev, ya que no requiere los costosos sistemas de enfriamiento de superconductores ni electroimanes activamente controlados.

a. Vías con Bobinas Inductivas

La vía del Inductrack se construye con bobinas inductivas pasivas que interactúan con el campo magnético generado por los imanes del tren, induciendo corrientes que generan la levitación.

- **Materiales utilizados:** Imanes permanentes de tierras raras (como el neodimio) en el tren, y bobinas conductoras de cobre o aluminio en las vías.

- **Alineación precisa:** Aunque la levitación es pasiva, la alineación precisa de los imanes y las bobinas es crucial para maximizar la eficiencia.

b. Estructura Modular

Las vías son modulares, lo que facilita su expansión y reduce los costos de mantenimiento. Esto permite que el sistema sea más flexible que otros Maglev en términos de reparaciones y crecimiento.

4.1.4. Comparación de tecnologías Maglev

Existen tres tecnologías principales en uso e investigación de levitación magnética que se han desarrollado para el transporte de alta velocidad: SCMaglev (Japón), Shanghai Maglev (China) y el sistema Inductrack (EE.UU.). Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y desafíos únicos en cuanto a sus principios de operación, complejidad tecnológica y viabilidad comercial. El **SCMaglev**, basado en la suspensión electrodinámica (EDS) con superconductores, es capaz de alcanzar las mayores velocidades (hasta 603 km/h en pruebas), pero requiere sistemas costosos de enfriamiento de superconductores y una infraestructura compleja. Por otro lado, el **Shanghai Maglev** utiliza suspensión electromagnética (EMS) y es una tecnología más madura y comercialmente operativa, aunque su velocidad es más limitada (431 km/h) y posee sistemas complejos de control. Finalmente, el **Inductrack** es una opción más simple, ya que se basa en imanes permanentes en un arreglo de orientaciones especiales, lo que elimina la necesidad de sistemas de control activo o superconductores, pero solo es eficiente a velocidades altas.

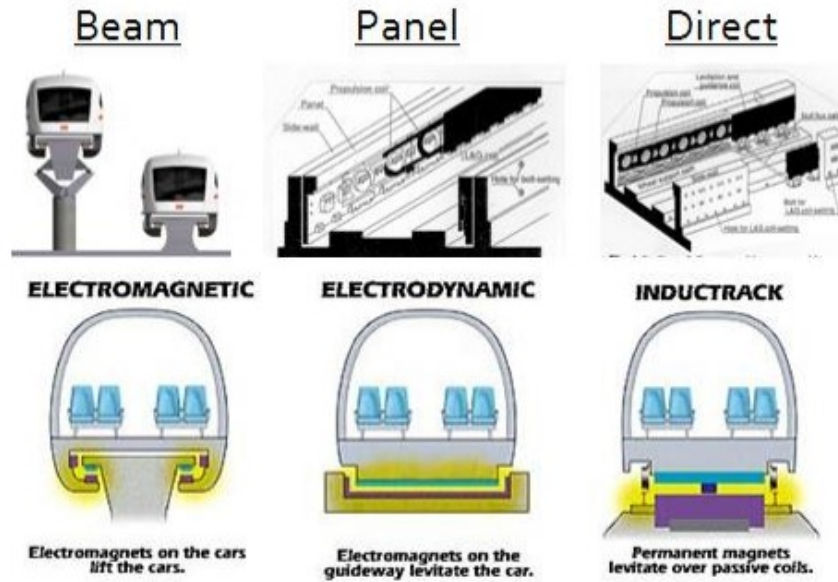


Figura 16: Comparación tecnologías Maglev ([14])

Tabla 2: Comparación de las tecnologías Maglev

Tecnología	Ventajas	Desventajas
EDS	Velocidad máxima (603 km/h), estabilidad a alta velocidad, eficiencia de superconductores.	Costos elevados de enfriamiento, complejidad técnica.
EMS	Tecnología probada y comercial operativa (431 km/h), menor costo en comparación con SCMaglev.	Distancia de levitación limitada, requiere control activo constante.
Inductrack	Sistema pasivo sin necesidad de control activo, menor costo de mantenimiento.	No probado a gran escala comercial, requiere velocidad mínima para levitación efectiva.

En resumen, mientras que el SCMaglev ofrece las mayores velocidades y capacidades tecnológicas, su complejidad y costos son elevados en comparación con el Shanghai Maglev, que ha demostrado ser una opción comercialmente viable. Por su parte, Inductrack, con su simplicidad y menor

costo, ofrece una solución más accesible, aunque aún no ha sido implementada a gran escala. En términos del análisis para el uso en la superficie lunar, se podría realizar un acercamiento a que la alternativa del Shanghai Maglev (EMS) puede no ser factible, debido al uso de sensibles equipos de control electromagnético, para las otras alternativas se debe realizar un análisis más profundo.

4.2. Sistemas de Extracción de Hielo ([8], [16], [19], [15], [17], [18])

En la literatura se han propuesto diversos métodos para la extracción de hielo en la superficie lunar. Estos métodos se pueden clasificar en dos grandes categorías: extracción térmica y otros tipos de extracción. A continuación, se describen estas técnicas y sus características principales.

4.2.1. Extracción Térmica

La extracción térmica es el método más estudiado y consiste en calentar el regolito rico en hielo para sublimar el hielo y capturar el vapor de agua resultante, el cual se condensa para obtener agua líquida.

Se han desarrollado distintos trabajos al rededor del mundo, donde se destaca el de J. Brisset et al. donde se desarrolla una simulación que propone dos formas de calentar el regolito: mediante brocas calientes o un calentador de superficie in-situ.

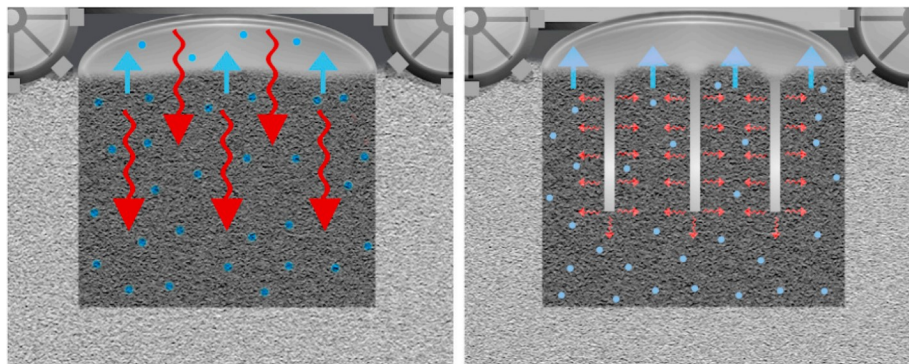


Figura 17: Casos simulados para extracción térmica (J. Brisset et al.) [8]

La figura 17 muestra estas dos configuraciones. Las flechas rojas representan la entrada de calor, las flechas celestes la salida de vapor de agua, y los puntos celestes las partículas de hielo en el

regolito.

En la simulación realizada por J. Brisset [8], se concluyó que la cantidad de calor requerida para extraer una cantidad significativa de agua debe ser superior a 1000 [W] por metro cuadrado durante períodos mayores a 10 horas. La eficiencia de este método no supera el 50% debido a pérdidas por la no contención del vapor generado. Para mejorar la eficiencia, se propone una mejor contención del regolito durante el calentamiento.

Sin embargo, este método requiere una cantidad considerable de energía, lo cual es un desafío en las regiones polares donde se encuentran la mayoría de los depósitos de regolito rico en hielo. Una posible solución es el uso de paneles solares y grandes reflectores posicionados en los bordes de los cráteres para concentrar la luz solar. A pesar de esto, no se ha demostrado aún la factibilidad de este sistema para la extracción a gran escala. Existen varias formas de generar y transferir la energía térmica para este proceso aparte de solo calor resistivo. Algunos de estos son:

- **Extracción mediante microondas:** Consiste en aplicar ondas electromagnéticas para calentar directamente el regolito y sublimar el hielo. Este método no requiere contacto físico con el regolito y podría ser eficiente en áreas con alta concentración de hielo .
- **Uso de reactores nucleares pequeños:** Los reactores nucleares proporcionan una fuente constante de energía térmica que puede ser utilizada para derretir el hielo en depósitos profundos, especialmente en regiones permanentemente sombreadas .

4.2.2. Otros Tipos de Extracción

Además de la extracción térmica, existen otros métodos que podrían ser útiles dependiendo de las condiciones específicas del regolito y los objetivos del proyecto. Estos incluyen:

- **Excavación mecánica directa:** Se utilizan máquinas para excavar y recolectar el regolito rico en hielo. Este método es sencillo pero presenta desafíos, como la sublimación del hielo antes de ser procesado.
- **Perforación criogénica:** Utiliza taladros diseñados para operar a bajas temperaturas, extrayendo muestras de hielo sin alterar su estado físico. Es ideal para depósitos profundos

y compactos .

- **Método híbrido de excavación térmica:** Combina la excavación mecánica con calentamiento localizado para sublimar el hielo y capturar el vapor. Este método es versátil y adecuado para extracción a mediana escala .
- **Extracción con líquidos o gases:** Utiliza fluidos para disolver o encapsular el hielo, facilitando su extracción. Aunque es experimental, este método tiene el potencial de maximizar la recuperación de agua .

Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desafíos únicos, y su viabilidad dependerá de factores como la concentración de hielo, las condiciones ambientales y los recursos energéticos disponibles. En proyectos futuros, será crucial realizar pruebas piloto para determinar la eficiencia y escalabilidad de estas tecnologías, especialmente ya que son todas propuestas que no han sido comprobadas en la Luna hasta la fecha.

La mayoría de estos sistemas solo sirven In-Situ, lo cual hasta ahora no se proyecta que obtenga rendimientos muy elevados, y en las simulaciones presentadas, se recomienda realizar una extracción en un ambiente más controlado, como una planta de procesamiento.

4.3. Normas de diseño lunares

En esta investigación se identificaron varias normas y estándares que podrían ser útiles para el diseño del sistema de transporte magnetolevítico lunar. Aunque durante la etapa de diseño conceptual no será obligatorio aplicarlas, tener conocimiento de estas normas permite establecer una base sólida para futuras etapas del desarrollo del proyecto, especialmente durante el diseño detallado y la construcción.

A continuación, se enumeran algunas normas y estándares relevantes:

- **Normas de la NASA y la ESA:** La *Administración Nacional del Espacio y Aeronáutica* de Estados Unidos (NASA) y la *Agencia Espacial Europea* (ESA) han desarrollado una serie de estándares técnicos aplicables al diseño, fabricación y operación de sistemas espaciales. Estos incluyen:

- NASA-STD-5001: *Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware*.
- NASA-STD-7009: *Standard for Models and Simulations*.
- ECSS-E-ST-32-10C: *Structural Design and Verification of Spacecraft and Launchers* (Norma de la ESA).
- **ISO Normas Espaciales:** La *Organización Internacional de Normalización* (ISO) ha publicado estándares relacionados con sistemas espaciales, como:
 - ISO 10795: *Space Systems — Testing of Spacecraft Materials*.
 - ISO 14620: *Space Systems — Safety Requirements*.
- **Normas específicas para ambientes extremos:** La *Sociedad Americana de Ensayos y Materiales* (ASTM) tiene normas para materiales en ambientes extremos como la superficie lunar.
 - ASTM E595: *Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment*.
 - ASTM F1337: *Standard Practice for Human Systems Integration Program Requirements for Space Systems*.
- **Normas de diseño magnético y eléctrico:** Para la levitación magnética, los estándares relacionados con los sistemas eléctricos y magnéticos son relevantes. A continuación se presentan los publicados por la *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos* (IEEE) y la *Comisión Electrotécnica Internacional* (IEC):
 - IEEE Std 1568: *Recommended Practice for the Design of Low Voltage/High Current DC Busbar Systems*.
 - IEC 60034: *Rotating Electrical Machines*.
- **Consideraciones para polvo lunar:** Dado que el regolito lunar representa un desafío significativo, se pueden consultar directrices sobre protección ambiental y desgaste en condiciones abrasivas. Aunque no existen normas específicas para la Luna, las siguientes normas de la *Sociedad Americana de Ensayos y Materiales* (ASTM) y la *Organización Internacional de Normalización* (ISO) podrían ser adaptadas:

- ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*.
- ISO 11295: *Classification and Information for the Maintenance of Pipeline Systems* (puede adaptarse para estructuras expuestas a abrasión).

Estas normas y estándares proporcionan una base inicial para desarrollar el diseño del sistema de transporte lunar, asegurando que se consideren los factores críticos asociados con el entorno espacial y las exigencias operativas en la superficie lunar. En fases posteriores, será fundamental realizar un análisis más detallado para seleccionar y adaptar las normas más relevantes al contexto específico del proyecto, además de aportar a la creación de nuevas normas y estándares aplicados a este contexto.

5. Problema y Requerimientos

A partir de lo expuesto en los puntos anteriores, se plantea extraer y posteriormente distribuir agua desde la Luna hacia el espacio cislunar. Si bien, aún no se han definido los métodos o procesos específicos para lograrlo, sí se conocen las ubicaciones de extracción y las tecnologías existentes en la actualidad. Además, para que el agua llegue de manera eficiente al espacio cislunar y sea utilizada como combustible u otras aplicaciones, es necesario lanzarla desde zonas donde se minimice el ΔV de lanzamiento. En otras palabras, se debe emplear la menor cantidad de combustible posible para que todo el proceso sea rentable y factible.

Aquí surge el principal problema: los yacimientos de agua en la superficie lunar se encuentran en los polos, mientras que las zonas con menor ΔV de lanzamiento están más próximas a latitudes medias. Por ello, se requiere un sistema que permita transportar el agua desde las áreas de extracción y procesamiento hasta un centro de distribución ubicado en una región propicia para su lanzamiento al espacio cislunar.

El proceso completo desde la extracción hasta la distribución puede ser descrito en cuatro etapas principales:

- **Extracción y carga:** Obtención de regolito rico en agua o hielo desde los depósitos en latitudes polares y su preparación para el transporte.
- **Procesamiento:** Extracción de agua desde regolito.
- **Transporte:** Movimiento del agua/hielo desde los puntos de procesamiento hasta donde sea requerido.
- **Distribución:** Almacenamiento y transporte de productos procesados a el espacio cislunar mediante cohetes.

En lo que refiere a el análisis, este se centrará en el sistema de transporte, pero para definir los requerimientos de diseño de este sistema, primero hay que definir el proceso completo. Se debe decidir, por ejemplo, si el material a transportar será antes o después de realizar el procesamiento, es decir, si se transportará agua o regolito rico en agua. Esta definición del proceso completo no se realizará con la misma rigurosidad que la del sistema de transporte, ya que no es el objetivo

del presente análisis. Se asumirán ciertas definiciones básicas en base a la información presentada en el marco teórico y el estado del arte.

5.1. Flujo de procesos ([3])

Basado en los datos expuestos en el marco teórico, y según el modelo planteado por ULA, se espera una demanda inicial de **140.000 [ton]** de agua por año, la cual podría aumentar a medida que incrementen los viajes espaciales.

Es importante considerar que esta cifra corresponde al agua en estado líquido. En caso de que la extracción no sea del tipo *in situ*, se deberá transportar una cantidad significativamente mayor de regolito rico en hielo, dado que la concentración de hielo en el regolito varía entre un **1 % y un 5 %**. Esto significa que la cantidad total de material a transportar se encontraría en un rango de **2.800.000 [ton]** a **14.000.000 [ton]** al año.

Para el cálculo de la capacidad del sistema y la elección de tecnologías, es fundamental definir el proceso a utilizar. En este análisis, no se priorizarán los aspectos económicos, sino más bien la eficiencia operacional.

Como se indicó en secciones previas de este informe, la extracción *in situ* es menos eficiente que el procesamiento en una planta. Además, la maquinaria requerida para la extracción *in situ* es más compleja y propensa a fallas. Por lo tanto, el sistema que se diseñe debe considerar un proceso de extracción automatizado y de bajo mantenimiento, minimizando al máximo la interacción humana en el proceso.

Bajo estas consideraciones, se plantea el siguiente flujo de proceso:

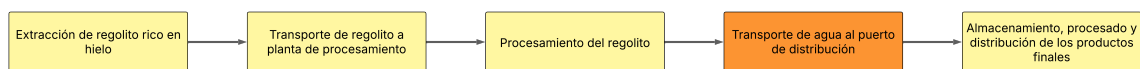


Figura 18: Diagrama de flujo de proceso (Elaboración propia)

En la Figura 18 se observa un flujo compuesto por cinco etapas principales:

1. Extracción de regolito.

Se pueden emplear máquinas de extracción del tipo *roto-palas*, controladas de manera remota. Este equipo debe ser diseñado con el objetivo de minimizar la necesidad de mantenimiento, dado que las reparaciones en el polo sur de la Luna presentan una alta dificultad.

2. Transporte de regolito a la planta de procesamiento.

Se pueden utilizar vehículos automatizados, similares a los camiones CAEX autónomos empleados en la minería terrestre también aprovechando el uso de sistemas de correas transportadoras donde sea eficiente. Sin embargo, estos deben ser adaptados para operar en las condiciones extremas de la Luna. Debido a la baja gravedad lunar, estos sistemas deberán desplazarse a velocidades reducidas para evitar efectos adversos.

3. Procesamiento del regolito en la planta.

Se pueden utilizar sistemas de extracción térmica, tales como microondas o incluso reactores nucleares, para extraer el agua del regolito.

4. **Transporte de agua al puerto de distribución.**

Esta es la fase clave del presente análisis, en la que se cargarán los vagones de levitación magnética (*maglev*) para realizar el transporte hacia el puerto de distribución.

5. Almacenamiento, procesado y distribución de los productos finales.

El agua extraída puede ser procesada mediante tecnologías similares a las plantas de hidrógeno verde terrestres, permitiendo la producción de hidrógeno, oxígeno y agua para consumo y otros fines. Finalmente, los productos procesados serán almacenados, preparados y despachados mediante cohetes hacia el espacio cislunar para su distribución.

5.2. Ruta preliminar ([20])

Para analizar la ruta preliminar se utilizará el software gratuito de análisis de imágenes lunares Lunar LROC. En primer lugar, se seleccionará un punto de inicio en alguno de los cráteres con ausencia de luz solar permanente. Este punto representará la ubicación donde se instalará una planta de procesamiento, la cual podría expandirse en el futuro y abastecerse de varios yacimientos cercanos.

El punto A seleccionado es el siguiente:

- Latitud: -88.30 [°]
- Longitud: 266.58 [°]
- Altitud: -2293.79 [m]

Asimismo, se seleccionará un punto B, que corresponde al lugar donde se establecerá el asentamiento permanente. En este lugar se almacenará el agua y otros productos generados para luego lanzarlos a órbita. La selección de este punto es de carácter arbitrario, ya que se basa únicamente en lograr un equilibrio entre la distancia al ecuador y a los polos. Además, se busca que el terreno sea plano y que la ubicación esté en la cara visible de la Luna, para garantizar una conexión permanente con la Tierra.

El punto B seleccionado es el siguiente:

- Latitud: -41.38 [°]
- Longitud: 4.87 [°]
- Altitud: -2731.69 [m]

La distancia en línea recta entre estos dos puntos es de: **1482.24 [km]**. La ruta en línea recta se muestra en la figura 19.

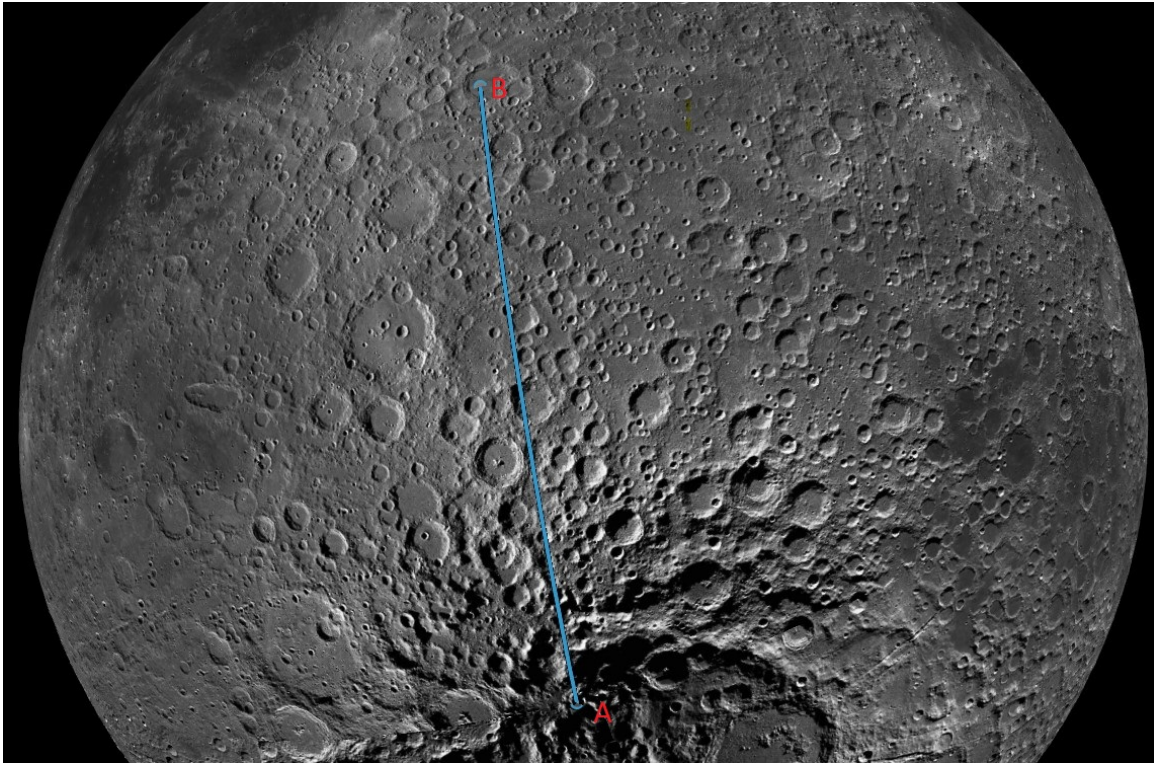


Figura 19: Ruta en línea recta (LROC)[20]

El principal inconveniente de realizar una ruta en línea recta es la gran variación en la altitud del terreno, lo cual dificulta cualquier sistema de transporte superficial, independientemente de la tecnología utilizada. La figura 20 muestra la variación de altura del terreno a lo largo de la ruta en línea recta, donde se observan diferencias de hasta **3000 [m]**.

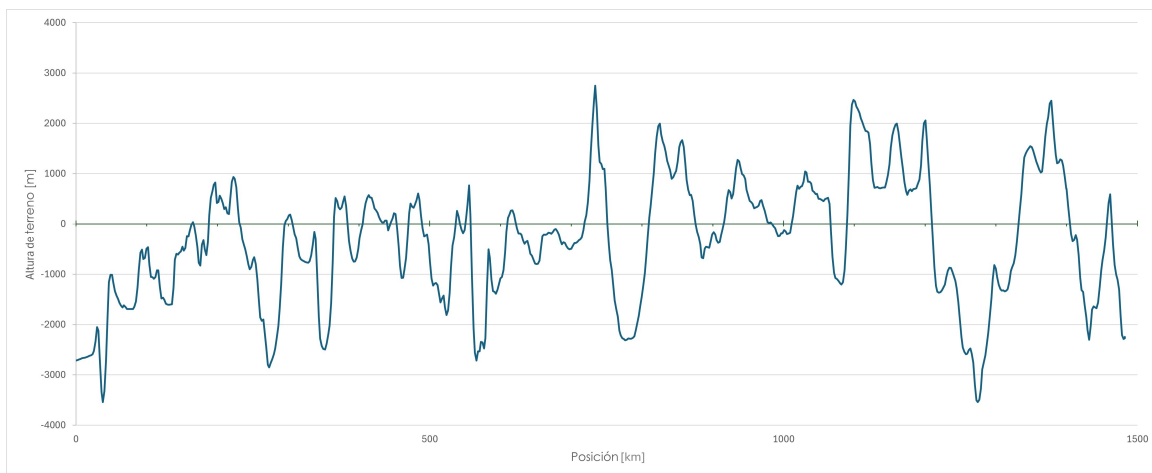


Figura 20: Variación de altura del terreno en la ruta en línea recta (LROC)[20]

Estas diferencias de altitud no suponen un problema grave si las pendientes se mantienen bajas. En la figura 21 se presenta la variación de la pendiente con respecto a la posición.

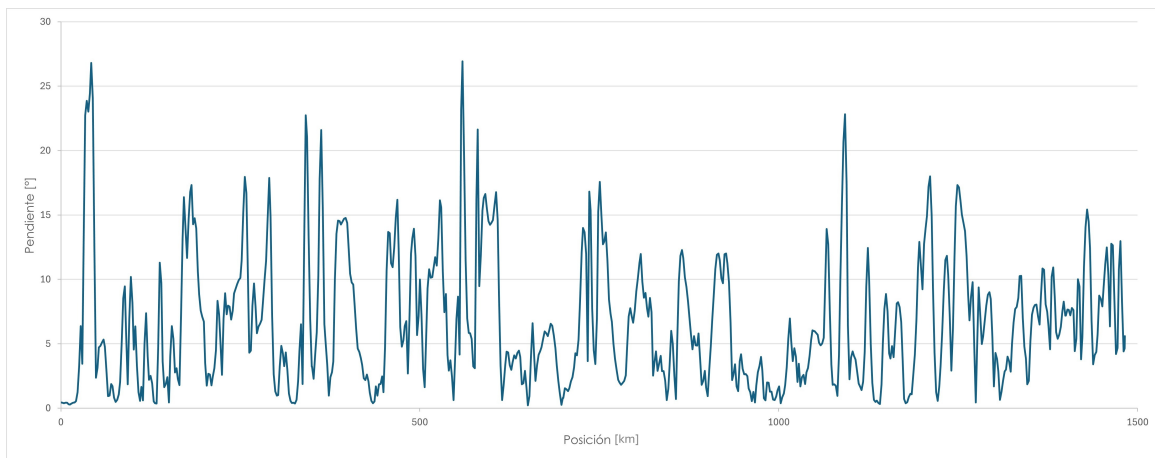


Figura 21: Variación de la pendiente del terreno en la ruta en línea recta (LROC)[20]

Como se observa en la figura 21, existen pendientes de hasta **25°**, lo cual representa una complicación para la implementación del sistema de transporte. Para evitar estos tramos de elevada pendiente, se diseñó una nueva ruta que rodea los picos de mayor altitud.

La nueva ruta optimizada se muestra en la figura 22.

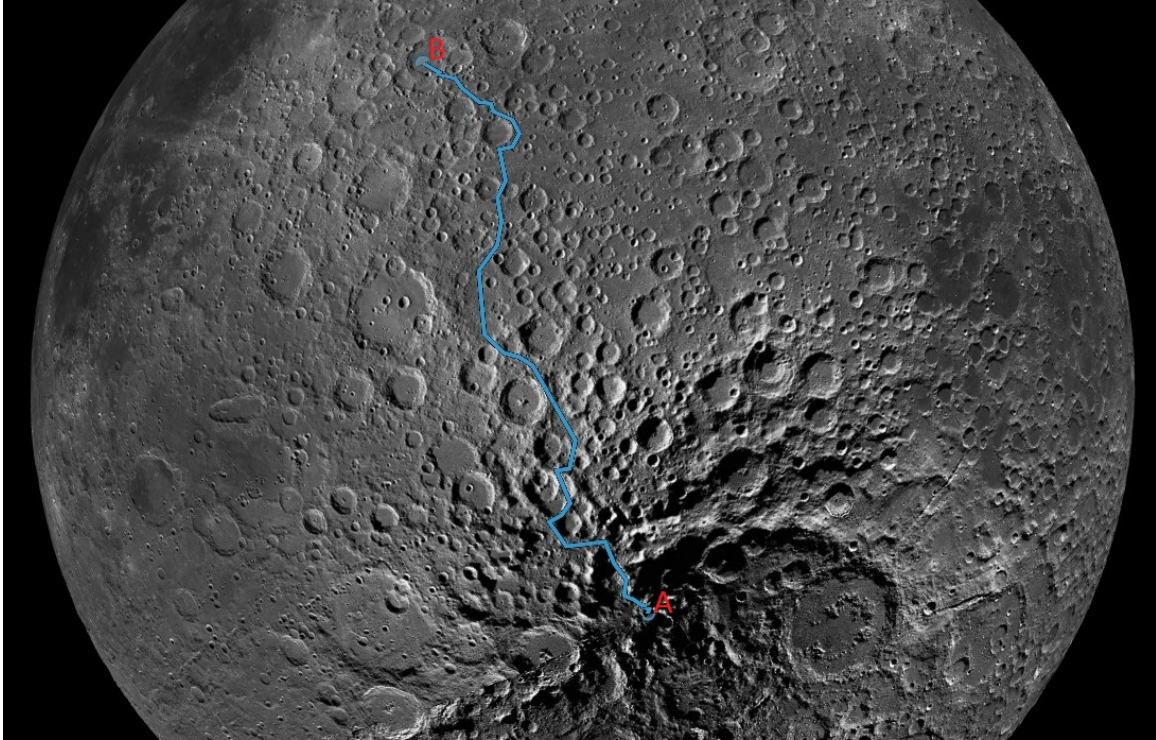


Figura 22: Ruta optimizada (LROC)[20]

La distancia de esta ruta optimizada es de: **1884.75 [km]**. Esta ruta se diseñó con el objetivo de minimizar las pendientes a recorrer. La figura 23 muestra un detalle del trazado de la ruta.

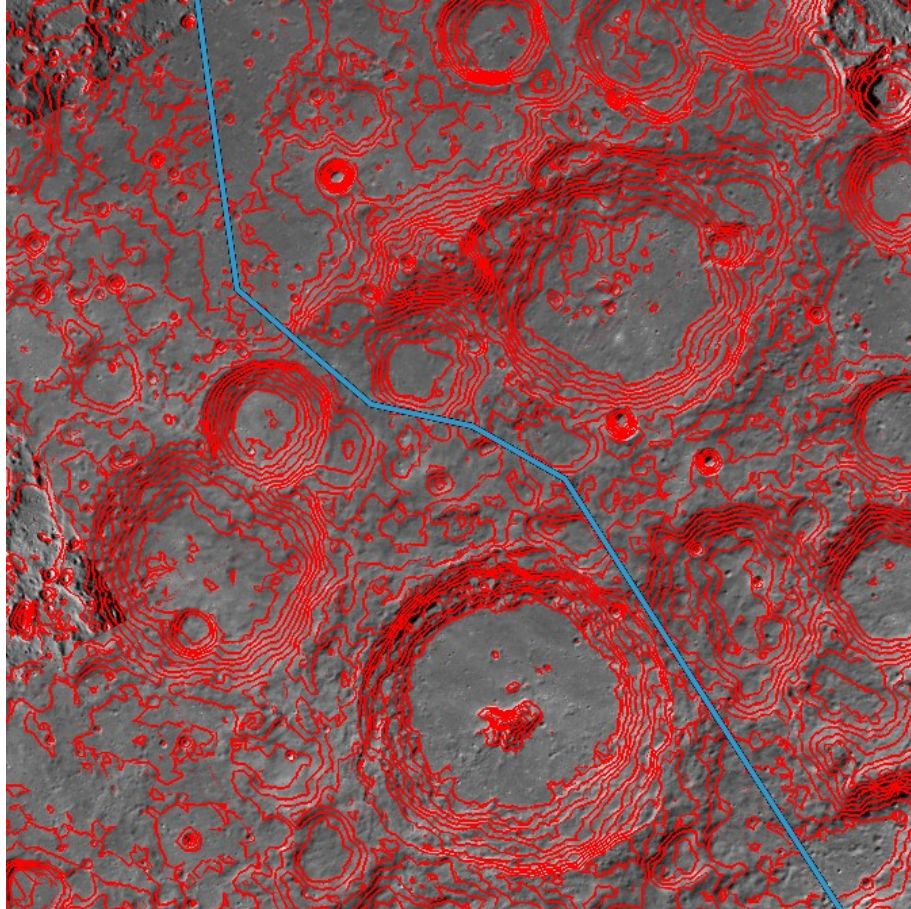


Figura 23: Detalle del trazado de la ruta optimizada (LROC)[20]

En la figura 24 se presenta la variación de altura del terreno a lo largo de la ruta optimizada, donde las diferencias de altitud también alcanzan hasta **3000 [m]**.

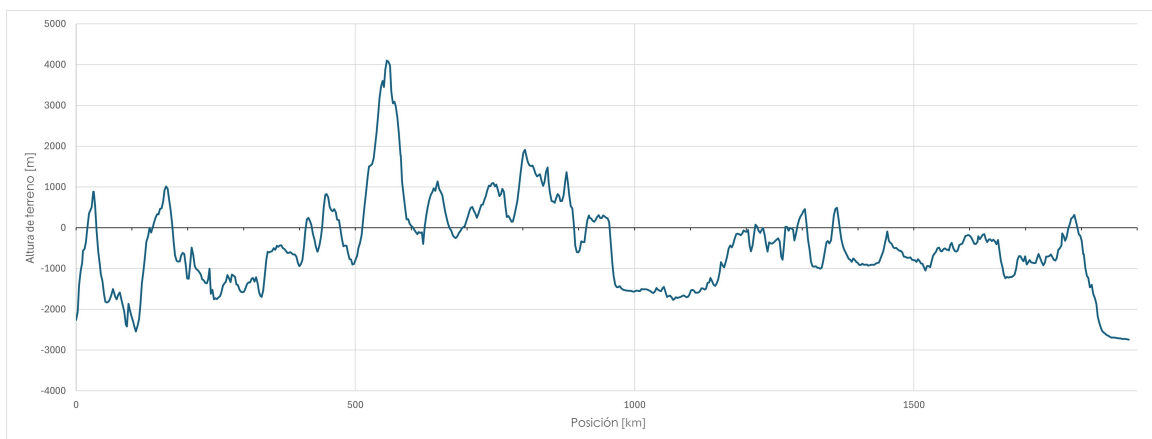


Figura 24: Variación de altura del terreno en la ruta optimizada (LROC)[20]

Sin embargo, estas diferencias son más manejables debido a que las pendientes son menores. La figura 25 muestra la variación de la pendiente a lo largo de la ruta optimizada.

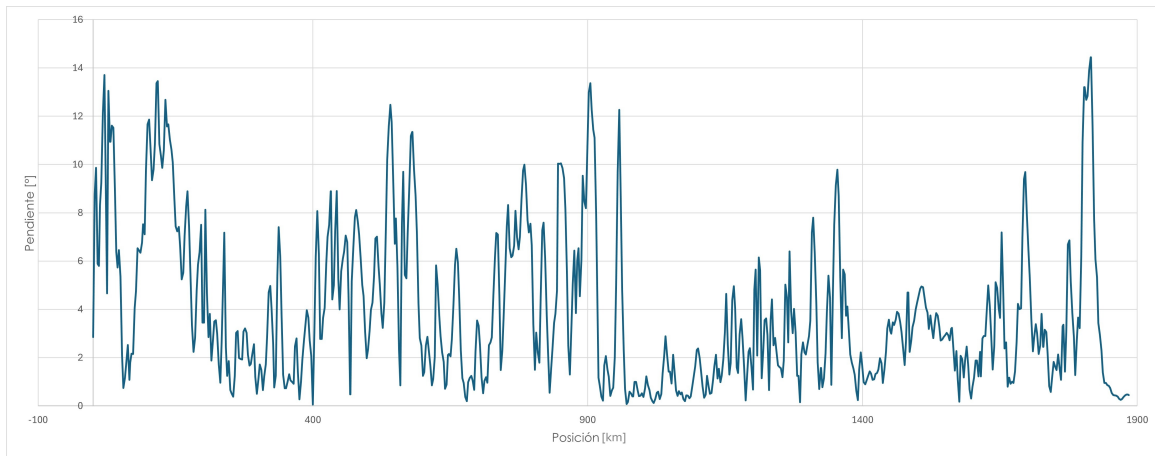


Figura 25: Variación de la pendiente del terreno en la ruta optimizada (LROC)[20]

Como se aprecia en la figura 25, las pendientes alcanzan un máximo de 14° , lo cual es considerablemente más fácil de mitigar mediante obras civiles en comparación con los resultados de la ruta en línea recta. Sin embargo esta pendiente sigue siendo una dificultad a considerar en el diseño.

Se analizó también una posible ruta desde el polo norte a latitudes similares a la ruta propuesta anteriormente, pero en el hemisferio norte. Esta ruta se realizó solamente como una referencia, ya que la mayoría de las investigaciones apuntan a que las concentraciones de agua serían menores en el polo norte.

El inicio y fin de la ruta fueron seleccionados con los mismos criterios que la ruta desde el polo sur.

El punto A seleccionado es el siguiente:

- Latitud: 87.52°
- Longitud: 344.35°
- Altitud: -1274 [m]

El punto B seleccionado es el siguiente:

- Latitud: 44.62 [°]
- Longitud: 339.30 [°]
- Altitud: -2706 [m]

La ruta desde el polo norte se puede apreciar en la figura 26.

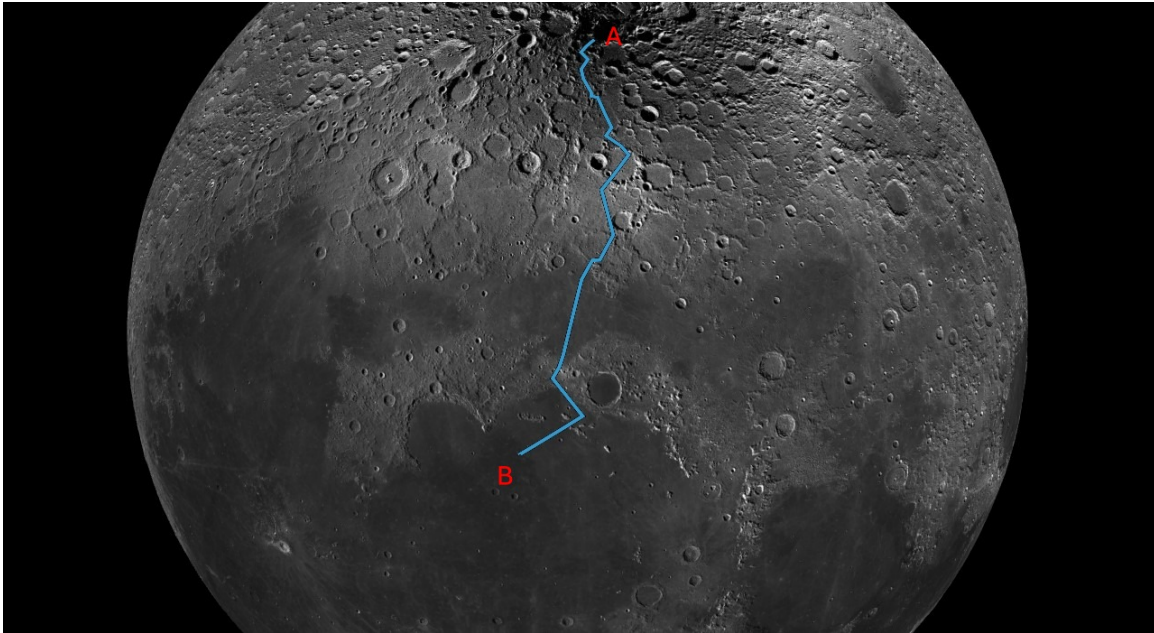


Figura 26: Ruta optimizada polo norte (LROC)[20]

La ruta resultante tiene una distancia resultante **1585.82 [km]** y posee pendientes máximas de **8°**

Para el siguiente análisis se continuará con la ruta desde el polo sur debido a las razones presentadas anteriormente y también para tomar un camino un poco más complejo, lo que permitiría brindar una especie de “factor de seguridad” al proceso de diseño.

5.3. Requerimientos de diseño:

En base a la ruta y proceso planteado anteriormente, el sistema de transporte debe:

- Recorrer Ruta de **1884.75 km** de longitud.

- Superar pendientes máximas de 14° .
- Recorrer de curvas con radios intermedios.
- Transportar 140.000 [ton] de agua por año.
- Ser escalable.
- Soportar ambiente lunar polar y de latitudes medias.
- Minimizar el mantenimiento en la ruta.

En el la figura 27 se aprecia el diagrama de caja negra del sistema de transporte.

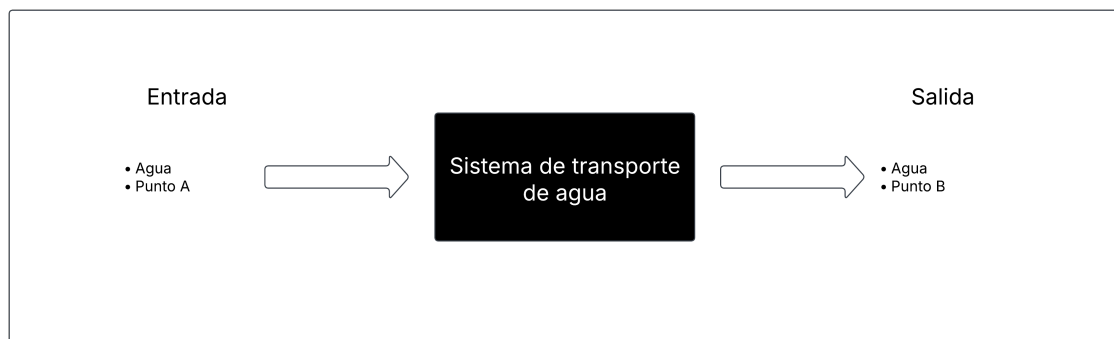


Figura 27: Diagrama de caja negra

6. Diseño Conceptual

Para el diseño conceptual del sistema de transporte, se establecerán las funciones que se deben cumplir y los criterios técnicos con sus relaciones a los requerimientos. Para esto se utilizarán herramientas como el QFD y árbol de funciones.

6.1. Análisis Funcional

Antes de abordar el diseño específico del sistema de transporte, es fundamental definir las funciones necesarias para cumplir con su propósito. Estas funciones se pueden clasificar en:

6.1.1. Función Principal

- **Transportar agua desde el punto A al punto B**

Esta función debe cumplirse en un entorno caracterizado por:

- Temperaturas extremas.
- Baja gravedad lunar.
- Ausencia de atmósfera significativa.
- Presencia de polvo lunar.
- Geografía irregular y presencia de cráteres en las zonas polares.

6.1.2. Funciones Secundarias

Para que la función principal se lleve a cabo, el sistema debe ser capaz de:

- **Adaptarse al terreno lunar**
 - **Circular en terrenos accidentados:** El sistema de transporte debe ser capaz de circular por terrenos accidentados ya sea modificando el terreno o el vehículo.

- **Superar pendientes pronunciadas:** El diseño del mecanismo de locomoción debe permitir que el vehículo pueda ascender y descender pendientes importantes, presentes especialmente en las zonas polares.
- **Operar de manera eficiente con limitaciones energéticas**
 - **Minimizar el consumo energético:** Los recursos energéticos en la Luna son limitados, por lo que la eficiencia del sistema de transporte resulta importante para el largo plazo.
- **Resistir la radiación y condiciones térmicas extremas**
 - **Proteger componentes:** La radiación y las bajas o altas temperaturas pueden dañar los sistemas electrónicos y mecánicos. El aislamiento térmico, el uso de materiales resistentes a la radiación y el diseño de blindajes adecuados son fundamentales.
 - **Garantizar operatividad:** Los subsistemas deben seguir funcionando dentro de los rangos de temperatura y niveles de radiación esperados, incluso en periodos prolongados de exposición.
- **Minimizar la generación de polvo lunar**
 - **Evitar contacto con regolito:** El polvo lunar (regolito) es abrasivo y puede interferir con componentes mecánicos y ópticos. El vehículo debe contar con sistemas de sellado y protección que reduzcan la acumulación de polvo en partes críticas. Además de evitar levantar el polvo.
- **Garantizar un acoplamiento seguro en la carga y descarga**
 - **Prevenir fugas:** Durante las maniobras de llenado y vaciado, se deben asegurar conexiones herméticas que no permitan la pérdida de agua ni la entrada de polvo. Esto requiere diseños de interfaces robustos y fáciles de acoplar de manera remota.
- **Evitar la intervención humana**
 - **Disminuir reparaciones necesarias:** El sistema debe diseñarse con componentes de alta fiabilidad y redundancia para reducir al mínimo la necesidad de intervención humana o reemplazos, ya que el soporte logístico en la Luna es muy limitado.

- **Facilitar mantenimiento:** En caso de que se requiera algún tipo de mantenimiento, la arquitectura del sistema debe permitir procedimientos simples y rápidos (mantenibilidad), idealmente realizables de forma automatizada o semiautónoma.

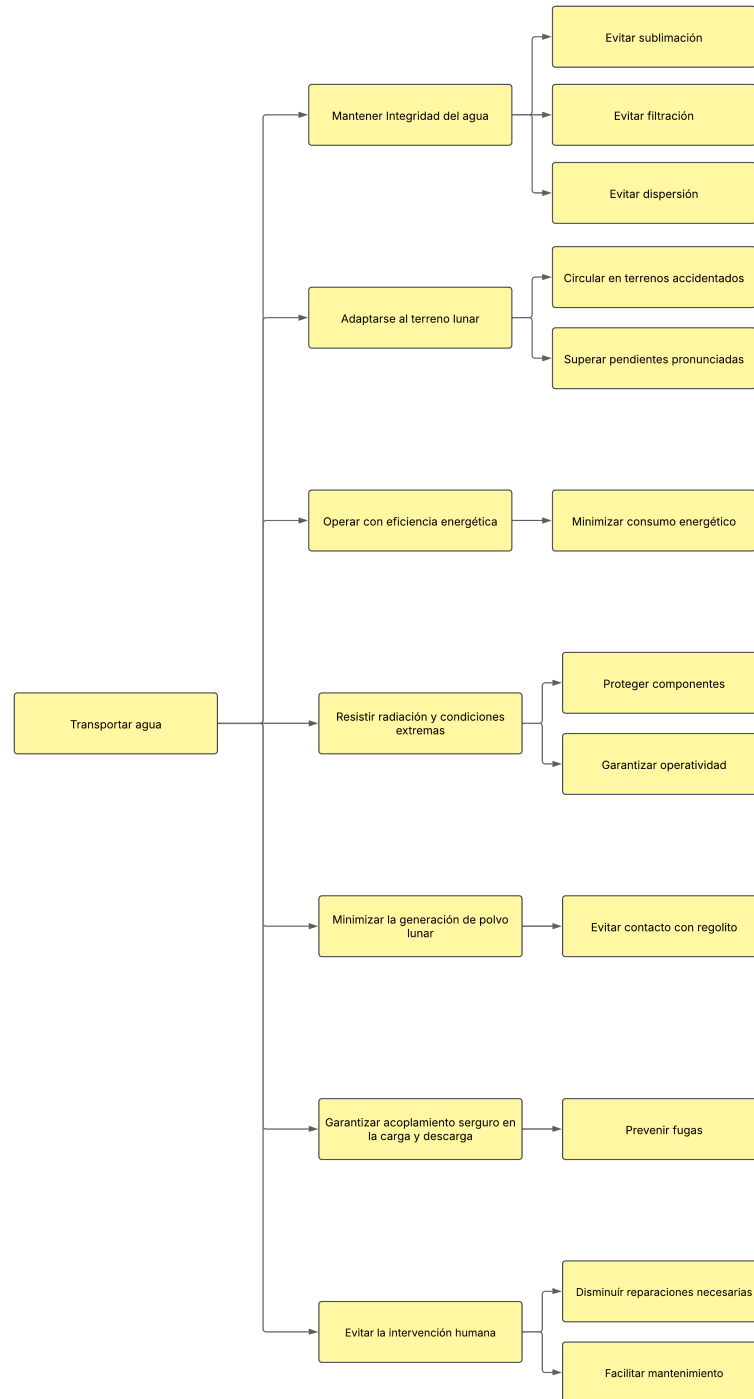


Figura 28: Diagrama de árbol de funciones

En la figura 28 se pueden ver las funciones requeridas en el diagrama de árbol de funciones.

6.2. Selección de Tecnologías ([21], [13])

En esta sección se describen y comparan las tecnologías propuestas para el transporte de agua en la superficie lunar, considerando las funciones que debe cumplir el sistema.

Se realizará un análisis QFD para poder realizar una mejor selección de tecnologías.

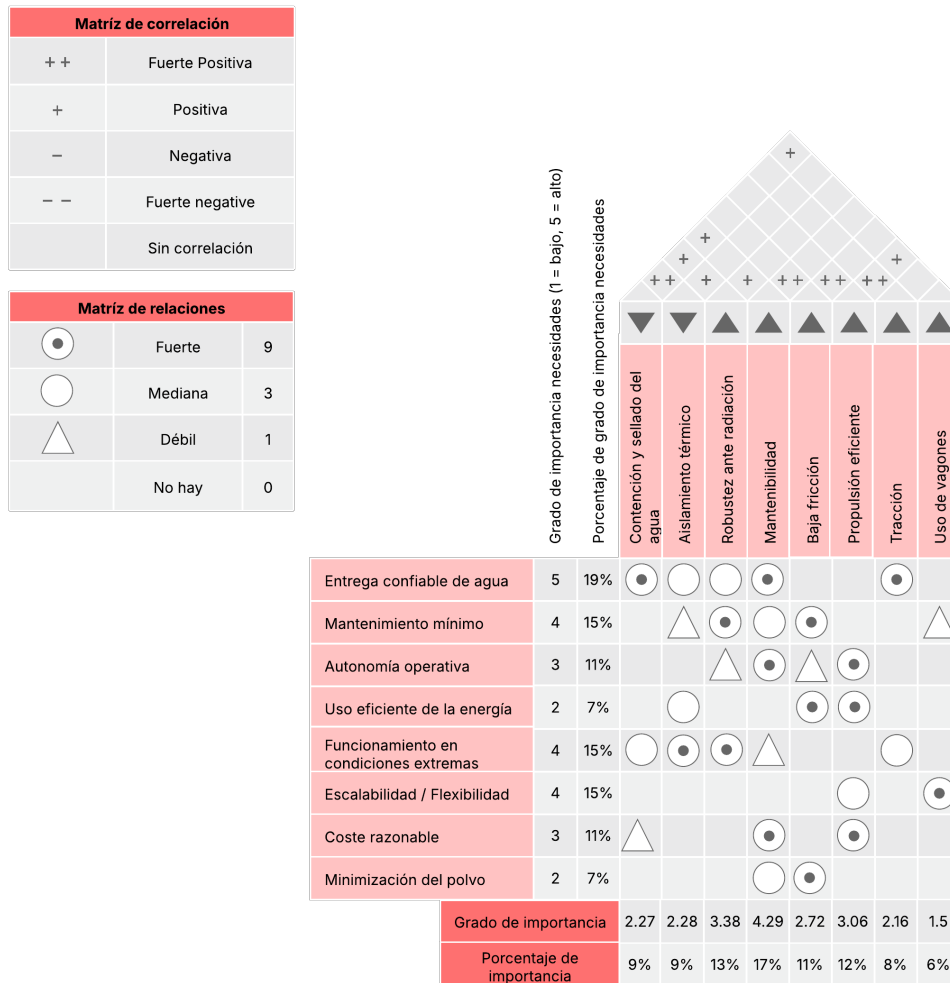


Figura 29: Diagrama de QFD

Teniendo en cuenta estos factores, un sistema basado en ruedas o orugas se podría descartar, para evitar el exceso de fricción y el desgaste que eso trae consigo. Las líneas férreas tradicionales no son viables por la naturaleza del regolito, ya que en un sistema basado en fricción, el desgaste de los rieles y las ruedas sería extremadamente acelerado, exigiendo reparaciones constantes en lugares de difícil acceso. Además la tracción con la gravedad reducida no sería la mejor para pendientes elevadas. La materialidad de un sistema tradicional no sería tampoco compatible con las condiciones térmicas de la Luna, debido a los efectos de la dilatación térmica.

Como resultado, las alternativas que serán analizadas son los sistemas de levitación magnética. Dentro de estos, se descarta el sistema *Electromagnetic Suspension* (EMS) debido a la complejidad de su control, especialmente en un entorno lunar expuesto a radiación electromagnética, lo que podría afectar la precisión de los sensores necesarios.

Las opciones restantes son el sistema *Electrodynamic Suspension* (EDS) y el *Inductrack*. Se propone una solución intermedia que combine la levitación pasiva del *Inductrack* con el control del *EDS*. Para la propulsión, se sugiere un sistema híbrido que emplee imanes en arreglos Halbach en la locomotora y carros, para funcionar en conjunto con bobinas pasivas en la pista, simplificando así la construcción y el mantenimiento de la infraestructura.

Resumen de selección de tecnologías:

▪ Descartadas:

- Líneas férreas tradicionales (desgaste acelerado por fricción, tracción y dilatación térmica).
- Sistema EMS (control complejo y afectación por radiación electromagnética).

▪ Opciones viables:

- Sistema EDS.
- Sistema Inductrack.

- **Solución propuesta:** Sistema híbrido con levitación *Inductrack* y control *EDS*, combinado con una propulsión híbrida basada en superconductores en la locomotora y bobinas pasivas en la pista.

Para simplificar el diseño de las pistas, se utilizará un sistema no electrificado; por lo tanto, la potencia debe ser provista por la propia locomotora. Dado que el proceso en el que se inserta este sistema de transporte genera agua e hidrógeno como subproductos, podría emplearse una locomotora que funcione con hidrógeno verde producido en la misma Luna. El diseño de estas locomotoras podría basarse en los modelos de celdas de combustible de hidrógeno verde que se utilizan actualmente en vías férreas terrestres.

En el caso de los vagones, pueden adoptarse diseños similares a los existentes en líneas férreas convencionales, modificando únicamente los bogies para operar con las pistas Inductrack. Además, es posible proteger la carga al interior de los vagones mediante un recubrimiento que ofrezca protección contra micrometeoritos y radiación, contribuyendo a mantener la temperatura estable. Un aislante del tipo MLI, desarrollado por la NASA, sería un candidato ideal. Para evitar los efectos adversos de transportar líquidos en pendientes variables, se debe utilizar compartimientos y elementos como “*buffers*” para controlar el movimiento del líquido al interior del vagón.

Para determinar la capacidad del sistema, primero se debe estimar la "fricción magnética" que la potencia de la locomotora debe superar. A modo de aproximación sencilla, se tomará como referencia una de las locomotoras ligeras recientes de la empresa FCAB en el norte de Chile, la cual dispone de **1000 [kW]** de potencia y un peso aproximado de **30 [ton]**(en la Tierra).

En el sistema Inductrack, la levitación magnética se logra mediante una disposición de imanes en arreglo de Halbach. La elección del material magnético influye de forma directa en la fuerza de levitación, la eficiencia energética y la velocidad máxima alcanzable. Este análisis compara los imanes de *Neodimio-Hierro-Boro* (NdFeB) y *Samarium-Cobalto* (SmCo) para evaluar su impacto en el rendimiento del sistema.

Tabla 3: Comparación de propiedades magnéticas entre NdFeB y SmCo

Propiedad	NdFeB	SmCo
Remanencia (B_r) [T]	1.2 – 1.4	0.9 – 1.1
Energía máxima ($BH_{m\acute{a}x}$) [kJ/m ³]	200 – 400	150 – 240
Resistencia térmica [°C]	~200	~350
Resistencia a la corrosión	Baja (requiere recubrimiento)	Alta

Como se muestra en la Tabla 3, los imanes NdFeB ofrecen mayor remanencia y densidad de energía, posibilitando campos magnéticos más intensos en el Inductrack. No obstante, los imanes SmCo presentan mejor resistencia térmica y a la corrosión, lo que los hace adecuados para entornos extremos como la superficie lunar.

Cálculo de la capacidad de levitación máxima con imanes SmCo:

Según la investigación de R.F. Post y D.D. Ryutov, se puede esperar una fuerza de levitación de aproximadamente 40 toneladas-fuerza por metro cuadrado de arreglo de Halbach, interactuando con una remanencia de 1 [T]. Este valor es alcanzable con las tecnologías disponibles actualmente.

Considerando que cada bogie dispone de una superficie de contacto del orden de 0.5 [m²], y que cada vagón cuenta con 2 bogies (para un total de 1 [m²] de área), se obtienen **40 toneladas-fuerza** (terrestres) de levitación, equivalentes a alrededor de 2350 [kN]. En la Luna, esta fuerza representaría unas **240 [ton]** de capacidad de levitación, lo que brinda un amplio margen para el diseño de los vehículos de transporte.

6.2.1. Cálculo de la capacidad con 1000 kW

El sistema Inductrack tiene una relación *Lift-to-Drag* (L/D) que depende del campo magnético y la velocidad. Esta relación se reduce cuando se emplean imanes con menor intensidad de campo, lo que afecta la velocidad máxima alcanzable.

En este contexto, B_0 representa el campo magnético máximo generado por el arreglo de Halbach justo por debajo de los imanes, que es donde se produce la interacción con las pistas conductoras. Este campo determina la magnitud de la fuerza de levitación inducida, y su valor depende tanto del material magnético como de la geometría del arreglo.

Dado que la potencia requerida para levitar es proporcional a la resistencia inducida, y esta a su vez depende de B_0^2 , la velocidad máxima se reduce en un 30 % respecto al caso de NdFeB. La velocidad máxima práctica para NdFeB es de aproximadamente:

$$v_{\text{NdFeB}} \approx 500 \text{ [km/h]} \quad (1)$$

Por lo que la velocidad máxima para SmCo se estima en:

$$v_{\text{SmCo}} \approx 500 \times 0,7 \approx 350 \text{ [km/h]} \quad (2)$$

La relación *Lift-to-Drag* (L/D) de SmCo también se puede considerar como un 30 % menor a el de NdFeB, el cual es de alrededor de:

$$L/D_{\text{NdFeB}} \approx 200 : 1 \text{ [km/h]} \quad (3)$$

Quedando estimada así la relación (L/D) para SmCo en:

$$L/D_{\text{SmCo}} \approx 200 : 1 \times 0,7 \approx 140 : 1 \quad (4)$$

El sistema es muy eficiente en este sentido, usando el cálculo previo de cuanta masa puede levitar cada vagón se puede calcular cuanta resistencia al movimiento sería generada.

$$L/D \approx 140 : 1 \quad (5)$$

$$D \approx \frac{L}{140} \quad (6)$$

$$D \approx \frac{392}{140} \quad (7)$$

$$D \approx 2,8 \text{ [kN]} \quad (8)$$

Con la fuerza de arrastre magnético requerida para el caso de levitación máxima, se puede calcular la cantidad de potencia requerida para mantener un vagón cargado a la velocidad máxima (estimada en la ecuación 2).

$$P = F \times v \quad (9)$$

$$P \approx 2,8 \text{ [kN]} \times 97,2 \text{ [m/s]} \quad (10)$$

$$P \approx 272,16 \text{ [kW]} \quad (11)$$

Con este resultado, también es posible calcular la potencia específica, es decir la potencia por unidad de masa.

$$P_s = \frac{P}{W} \quad (12)$$

$$P_s = \frac{272,16 \text{ [kW]}}{240 \text{ [ton]}} \quad (13)$$

$$P_s \approx 1,13 \text{ [kW/ton]} \quad (14)$$

En el resultado mostrado en la ecuación 14 se tiene la estimación de la potencia necesaria para mover 1 tonelada utilizando un sistema Inductrack basado en imanes SmCo a velocidad de 350 [km/h] asumiendo una relación (L/D) de 140:1.

Considerando el resultado anterior, es posible calcular cuanta carga se podría transportar con la locomotora seleccionada para este análisis.

$$Cap = \frac{1000 \text{ [kW]}}{1,13 \text{ [kW/ton]}} \quad (15)$$

$$Cap \approx 909 \text{ [ton]} \quad (16)$$

Con este resultado se podría hacer una aproximación a cuanta carga es posible transportar con un sistema de este estilo utilizando una locomotora de 1000 [kW] de potencia.

El análisis previo se centró en la potencia requerida para mantener el sistema en velocidad crucero. En un sistema Inductrack el arranque se efectúa utilizando ruedas tradicionales antes de alcanzar la levitación magnética. Para estimar la potencia de arranque se debe realizar un análisis del contacto riel-rueda y del arrastre generado.

Para este cálculo se asume una velocidad de transición entre rodadura y levitación magnética de:

$$v = 8 \text{ [m/s]} \quad (\approx 29 \text{ [km/h]}).$$

Se consideran los siguientes parámetros:

- **Coefficiente de resistencia a la rodadura:** $\mu \approx 0,0015$ (valor típico para ruedas sobre riel).
- **Velocidad del tren:** $v = 8 \text{ [m/s]}$.

1. Peso por tonelada en la Luna:

La fuerza normal N sobre una tonelada se calcula como:

$$N = m \cdot g_L = 1000 \text{ [kg]} \times 1,62 \text{ [m/s}^2] \approx 1620 \text{ [N]}. \quad (17)$$

2. Fuerza de fricción de rodadura:

La fuerza de fricción F_f se determina multiplicando el coeficiente de resistencia por la fuerza normal:

$$F_f = \mu \cdot N = 0,0015 \times 1620 \text{ [N]} \approx 2,43 \text{ [N]}. \quad (18)$$

3. Potencia necesaria para superar la fricción:

La potencia requerida para vencer la fricción se obtiene como:

$$P_s = F_f \cdot v = 2,43 \text{ [N]} \times 8 \text{ [m/s]} \approx 19,4 \text{ [W/ton]}. \quad (19)$$

Este resultado si se compara con el resultado obtenido en la ecuación 14 es casi despreciable, esto se debe a que a bajas velocidades el roce es bajo. Lo que también se puede calcular es cuanta carga la locomotora puede acelerar a una aceleración estándar de trenes de carga de $0.1 \text{ [m/s}^2]$

Para determinar la carga máxima que puede acelerar la locomotora de 1000 [kW] con una aceleración constante de

$$a = 0,1 \text{ [m/s}^2\text{]},$$

se procede a calcular la fuerza requerida, el tiempo y la distancia necesarios para alcanzar la velocidad de transición de

$$v = 10 \text{ [m/s]}.$$

Cálculo de la Fuerza Necesaria

La fuerza de arranque necesaria para acelerar una masa m es:

$$F = m \cdot a. \quad (20)$$

Tiempo y Distancia de Aceleración

Bajo aceleración constante, el tiempo necesario para alcanzar la velocidad v es:

$$t = \frac{(v_f - v_0)}{a}. \quad (21)$$

Sustituyendo $v_f = 10 \text{ [m/s]}$, $v_0 = 0$ y $a = 0,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$:

$$t = \frac{10}{0,1} = 100 \text{ [s]}. \quad (22)$$

La distancia recorrida durante la aceleración se obtiene mediante:

$$d = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \quad (23)$$

Con $a = 0,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$, $v_0 = 0$ y $t = 100 \text{ [s]}$:

$$d = \frac{1}{2} \times 0,1 \times (100)^2 = 500 \text{ [m]}. \quad (24)$$

Cálculo del Trabajo Realizado y la Capacidad

El trabajo total requerido para acelerar la masa m hasta la velocidad v es el incremento en la energía cinética:

$$W = \frac{1}{2} m v^2. \quad (25)$$

La energía suministrada por la locomotora durante el tiempo t es:

$$E = P \cdot t, \quad (26)$$

donde $P = 1000 \text{ [kW]} = 1 \times 10^6 \text{ [W]}$.

Para que la locomotora acelere la masa m , se requiere que:

$$\frac{1}{2} m v^2 \leq P \cdot t. \quad (27)$$

Despejando m :

$$m \leq \frac{2 P t}{v^2}. \quad (28)$$

Sustituyendo los valores:

$$m \leq \frac{2 \times 1 \times 10^6 \text{ [W]} \times 100 \text{ [s]}}{(10 \text{ [m/s]})^2} = \frac{200\,000\,000}{100} = 2\,000\,000 \text{ [kg]}. \quad (29)$$

Dado que $1 \text{ [ton]} = 1000 \text{ [kg]}$, la carga máxima en toneladas es:

$$m \leq 2000 \text{ [ton]}. \quad (30)$$

Conociendo las capacidades de la locomotora en términos de aceleración y superación de fricción magnética y de rodadura, se puede establecer que 1 locomotora puede arrastrar:

$$Cap \approx 909 \text{ [ton]}$$

Pero para efectos del análisis y de que existen otros factores que no han sido considerados, se utilizará un factor de seguridad de 2, quedando la capacidad en:

$$Cap \approx \frac{909}{2} \text{ [ton]}$$

$$Cap_{análisis} \approx 455 \text{ [ton]} \quad (31)$$

Con el resultado de 31 se puede seguir con el análisis de capacidad.

Capacidad de Carga de un Vagón Cisterna Estándar

La capacidad de carga de un vagón cisterna para el transporte de líquidos varía según el diseño y la región. En Norteamérica, un vagón cisterna estándar, como el DOT-111, suele tener una capacidad aproximada de:

$$Cap_{vagon} \approx 30,000 \text{ [gal]} \approx 115,000 \text{ [l]}. \quad (32)$$

Estos vagones no tienen ningún tipo de aislación por lo que para este contexto se podría evaluar el uso de un vagón de leche, lo cuales suelen tener una capacidad menor aproximada de:

$$Cap_{vagon} \approx 40,000 [l]$$

Como el plan es transportar agua líquida, usando la densidad del agua como:

$$1 \text{ litro de agua} \approx 1 [\text{kg}].$$

Se puede calcular:

$$Cap_{vagon} \approx 40 [\text{ton}]. \quad (33)$$

En cuanto a la masa del vagón vacío (tara), ésta varía dependiendo del diseño y los materiales utilizados. Para un vagón cisterna estándar se estima que la masa en vacío se encuentra en el rango de:

$$m_{vacío} \approx 20 [\text{ton}].$$

Capacidad de carga de un convoy

En base a los cálculos anteriores, la cantidad de vagones cisterna que podría transportar 1 de las locomotoras seleccionadas es de:

$$Cap_{loco} = 909 [\text{ton}] = m_{loco} + \text{vagones} \times (Cap_{vagon} + m_{vacío}) \quad (34)$$

$$Cap_{loco} = 909 [\text{ton}] = 30 [\text{ton}] + \text{vagones} \times (40 [\text{ton}] + 25 [\text{ton}]) \quad (35)$$

$$Cap_{loco} \approx 13 [\text{vagones}]. \quad (36)$$

6.3. Cálculo de capacidad del sistema de transporte

Para determinar la capacidad del sistema de transporte, se debe definir la cantidad de material a trasladar anualmente, la eficiencia del sistema y los parámetros operacionales. Como se mencionó anteriormente, la demanda inicial de agua es de 140.000 [ton/año], con posibilidad de incremento a medida que aumenten las operaciones en el entorno lunar.

6.3.1. Parámetros de diseño

Los parámetros relevantes para el cálculo de capacidad son los siguientes:

- **Demanda de transporte de agua:** $Q = 140,000$ [ton/año].
- **Distancia de transporte:** $d = 1885$ [km]
- **Velocidad de transporte:** $v = 350$ [km/h] (asumida según la tecnología del sistema maglev).
- **Capacidad de carga de cada vagón:** $C_v = 40$ [ton/vagón].
- **Cantidad de vagones por convoy:** $N_v = 13$.
- **Frecuencia de viajes por día:** f [viajes/día].

La ecuación de dimensionamiento para la frecuencia diaria de viajes es:

$$Q = N_v \times C_v \times f \times 365 \quad (37)$$

de donde se despeja:

$$f = \frac{Q}{N_v \times C_v \times 365} \quad (38)$$

Sustituyendo los valores:

$$f = \frac{140\,000}{13 \times 40 \times 365} \quad (39)$$

Calculamos primero la capacidad total transportada por convoy en un día:

$$13 \times 40 = 520 \quad ([\text{ton}]/\text{convoy}) \quad (40)$$

$$520 \times 365 = 189\,800 \quad ([\text{ton}]/\text{año transportadas por un viaje diario}) \quad (41)$$

Por lo tanto:

$$f = \frac{140\,000}{189\,800} \approx 0,737 \quad \text{viajes/día.} \quad (42)$$

Además, el tiempo de viaje de ida y vuelta se calcula como:

$$T_{\text{viaje}} = \frac{2d}{v} = \frac{2 \times 1885}{350} \approx \frac{3770}{350} \approx 10,77 \quad \text{horas.} \quad (43)$$

Y el número total de unidades de transporte requeridas se estima con:

$$N_{\text{trenes}} = f \times \frac{T_{\text{viaje}}}{24} \approx 0,737 \times \frac{10,77}{24} \approx 0,330. \quad (44)$$

Esto indica que, para satisfacer la demanda anual de 140 000 toneladas, se requeriría aproximadamente 0,74 viajes diarios, lo que se traduce en que en promedio, un tren en rotación (con los vagones disponibles) es suficiente para cubrir el servicio.

7. Propuesta de Diseño

El diseño conceptual preliminar incluye:

- **Infraestructura:** Vías de levitación magnética con estaciones de carga y descarga.
- **Vehículos:** Transporte autónomo optimizado para operar en la superficie lunar.
- **Sistemas de Carga y Descarga:** Mecanismos seguros para la transferencia de agua en destino.

El sistema propuesto consiste en un tren de levitación magnética que emplea tecnología Inductrack y elementos de EDS, utilizando imanes permanentes en la locomotora y los vagones. La vía de levitación estará compuesta por bobinas pasivas de levitación y control lateral. Para la propulsión, se usará un motor lineal cuyo “estator” se encuentra en la vía, mientras que el “rotor” se ubica en la locomotora, la cual suministra la energía. Dicha energía provendrá de un sistema de celdas de combustible que utiliza hidrógeno y oxígeno provenientes de parte del agua obtenida en el proceso de extracción. El frenado puede efectuarse mediante la regeneración del propio motor lineal.

Con base en los cálculos realizados, se ha determinado que es posible satisfacer la demanda de 140.000 toneladas con un solo tren de 13 vagones, realizando un viaje con carga una vez al día. Sin embargo, para asegurar una operación continua y responder a posibles picos de demanda, se sugiere iniciar con 2 locomotoras y un total de 26 vagones para líquidos (y otros tipos de vagones si surge la necesidad de transportar maquinaria pesada o astronautas). Además, el sistema solo requeriría inicialmente una sola vía, dado que su capacidad supera con creces los requerimientos y ofrece gran flexibilidad. En caso de ser necesario, se podría añadir una vía adicional en el futuro.

En la figura 30 se muestra el diagrama de caja transparente del sistema de transporte.

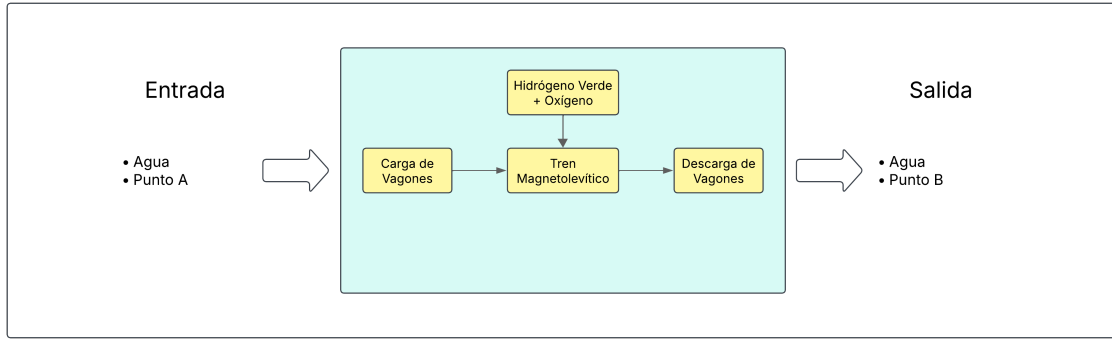


Figura 30: Diagrama de caja transparente

7.1. Infraestructura

Para la infraestructura, se plantea realizar sistemas similares a los tradicionales, aprovechando los métodos constructivos ya existentes en la Tierra, con el fin de optimizar los tiempos de construcción y la resolución de problemas.

7.1.1. Vías

Para el sistema de vías se propone un diseño híbrido que combine la trocha y los rieles estándar con un sistema de soporte para las bobinas de levitación, control y propulsión. Este sistema se sustenta en un montaje tradicional de durmientes con balasto, a fin de simplificar tanto la instalación como el mantenimiento. Los rieles y sus soportes irían anclados mediante un sistema de clips tradicionales a los durmientes.

La materialidad de los componentes puede ser variada; sin embargo, de momento se podrían considerar rieles y soportes metálicos de una aleación con baja dilatación térmica, mientras que los durmientes podrían fabricarse con un material polimérico capaz de resistir las condiciones lunares.

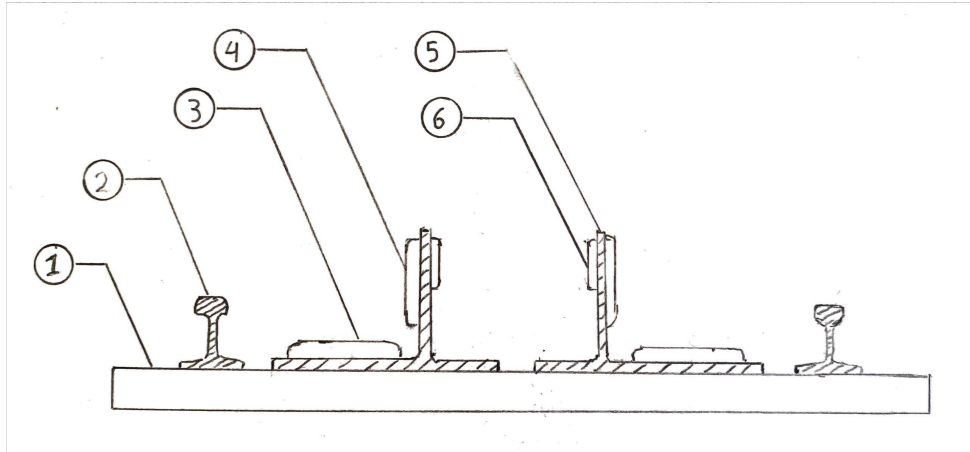


Figura 31: Bosquejo de las vías

En la figura 31 se muestra un bosquejo de los distintos componentes:

1. Durmiente
2. Riel
3. Bobina de levitación
4. Bobina de control lateral
5. Soporte de bobinas
6. Bobina de propulsión

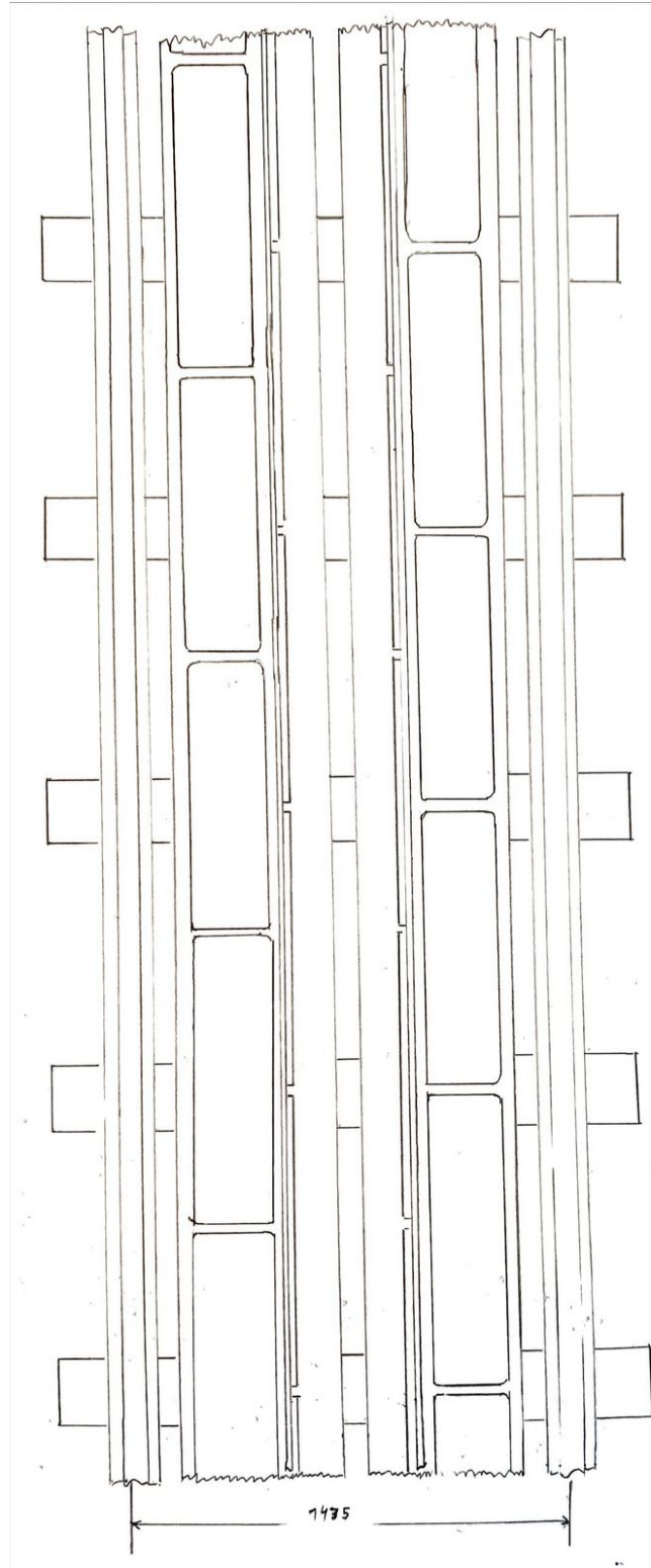


Figura 32: Bosquejo de las vías (vista superior)

En la figura 32 se observa la vista superior del sistema de vías. Las bobinas se disponen de manera intercalada con el fin de contrarrestar cualquier efecto adverso derivado de los espacios entre ellas.

7.1.2. Aparatos de Vías

Para los aparatos de vías (ADV), se plantea el uso de sistemas similares a los utilizados en monorraíles, que no operan como los mecanismos tradicionales de agujas y corazón, sino que desplazan por completo una sección de la vía para colocarla en la dirección deseada.

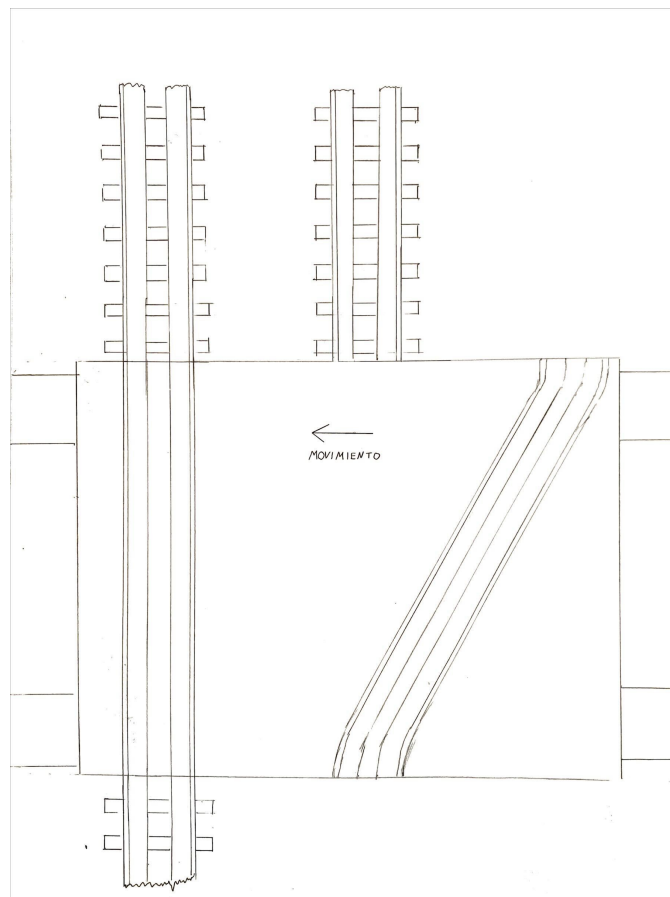


Figura 33: Bosquejo del aparato de vía (vista superior)

En la figura 33 se muestra la vista superior de un ADV y el modo en que se realizaría el cambio de vía.

7.1.3. Obras Civiles

En cuanto a las obras civiles, se propone una ruta que no requiera viaductos ni túneles. Será necesario, no obstante, preparar el terreno; las principales labores consistirán en la ejecución de trincheras, taludes y terraplenes. Estas obras requerirán el uso de maquinaria pesada adaptada para el uso en la superficie lunar.

7.2. Vehículos

En el caso de los vehículos, se plantea el uso de equipamiento similar al utilizado en operaciones terrestres, pero adaptado para resistir las condiciones ambientales y poder desplazarse sobre las vías magnetolevíticas.

7.2.1. Locomotoras

Para las locomotoras, se propone un diseño similar al de uso terrestre, modificando principalmente los bogies y utilizando un recubrimiento protector para la cabina (por ejemplo, foil MLI). Cada bogie contará con solo dos ruedas, ya que éstas se emplean únicamente como apoyo durante el inicio del movimiento. Además, los bogies incluirán conjuntos de imanes Halbach para la levitación y para el control lateral. En el centro de cada bogie se ubicará el motor lineal, que interactuará con las bobinas de propulsión instaladas en la vía. Los bogies poseerán ruedas metálicas de una aleación similar a las vías, para mitigar los efectos de la dilatación térmica.

En el cuerpo de la locomotora se dispondrá de depósitos de hidrógeno y oxígeno para la celda de combustible, junto con la propia celda y el equipamiento eléctrico de control del motor lineal. Asimismo, se contemplará el almacenamiento de agua resultante de la operación de la celda de combustible.

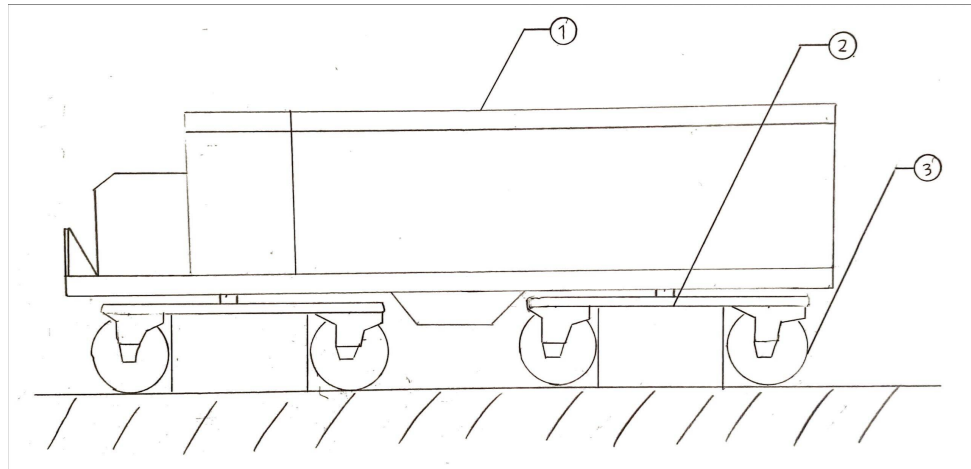


Figura 34: Bosquejo de la locomotora

En la figura 34 se aprecia un bosquejo de la locomotora desde un perfil lateral:

1. Cuerpo de la locomotora
2. Soporte de levitación
3. Ruedas de soporte

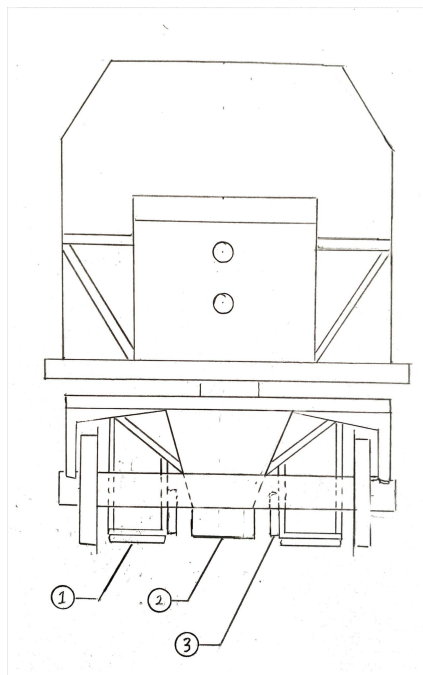


Figura 35: Bosquejo de la locomotora (vista frontal)

En la figura 35 se muestra la vista frontal de la locomotora, donde pueden apreciarse con mayor detalle los componentes del sistema de levitación y propulsión:

1. Arreglo de imanes Halbach de levitación
2. “Rotor” del motor lineal
3. Arreglo de imanes Halbach de control lateral

7.2.2. Vagones

Para los vagones, se propone un sistema similar al de las locomotoras, basándose en un diseño próximo al de los vagones tradicionales de uso terrestre, pero con bogies modificados que integren arreglos Halbach para la levitación y el control lateral. Aunque este diseño podría aplicarse a cualquier tipo de vagón, para el presente análisis se bosqueja únicamente un modelo de vagón para fluidos. Al igual que la locomotora, las ruedas serían metálicas de la misma aleación.

En cuanto al tanque de presión, se sugiere un recubrimiento del tipo foil MLI para proteger frente a la radiación y las variaciones de temperatura, así como para servir de barrera ante posibles impactos de micrometeoritos.

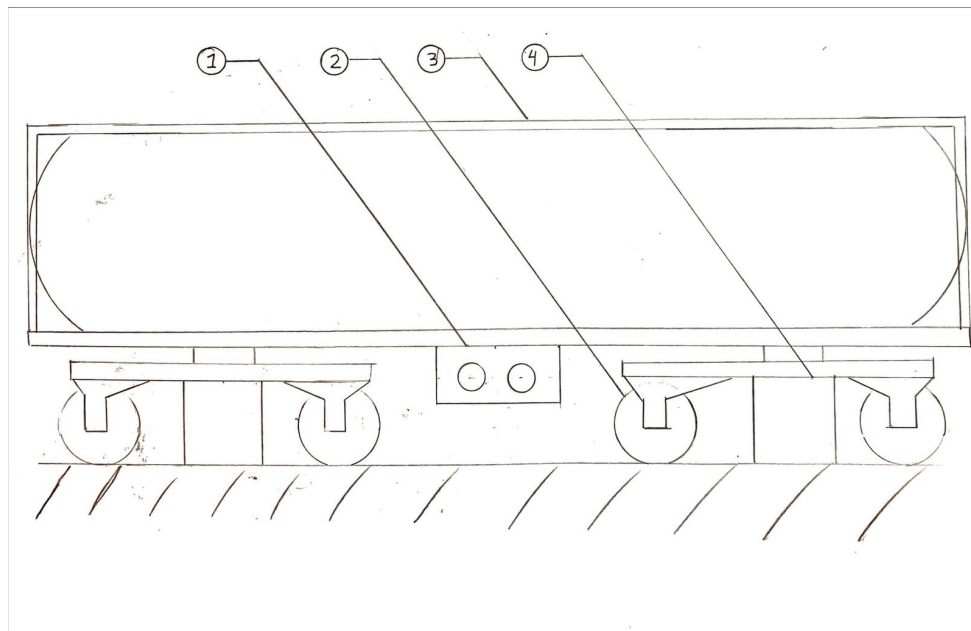


Figura 36: Bosquejo del vagón

En la figura 36 se muestra un bosquejo de un vagón desde un perfil lateral:

1. Conector de carga y descarga
2. Ruedas de soporte
3. Cuerpo del vagón
4. Soporte de levitación

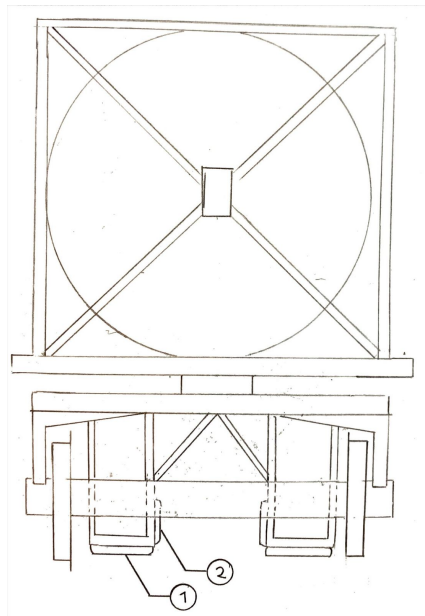


Figura 37: Bosquejo del vagón (vista frontal)

En la figura 37 se muestra la vista frontal del vagón, donde pueden apreciarse con mayor detalle los componentes del sistema de levitación:

1. Arreglo de imanes Halbach de levitación
2. Arreglo de imanes Halbach de control lateral

Además se propone utilizar un sistema de compartimientos basado en separadores al interior del estanque de agua, estos se pueden apreciar en la figura 38 en vista de corte.

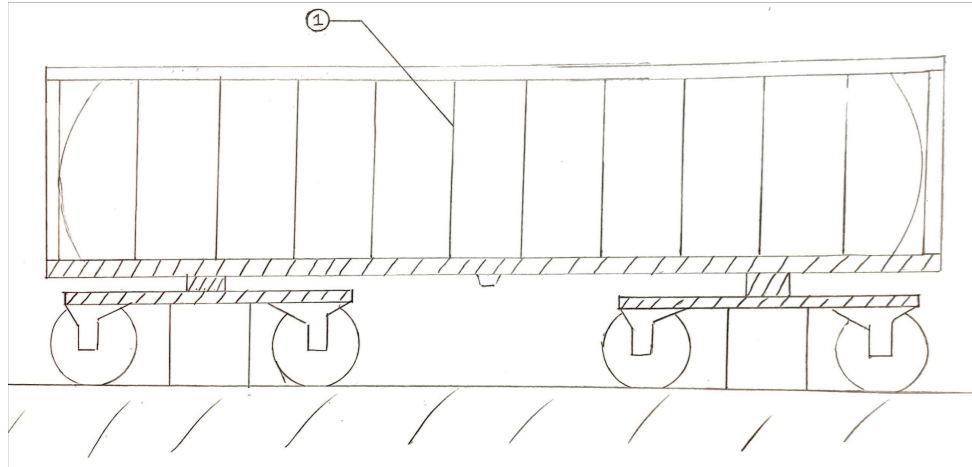


Figura 38: Bosquejo del vagón (vista corte)

Donde se pueden ver:

1. Separadores para compartimentar.

7.3. Sistemas de Carga y Descarga

Este punto solo se mencionará de manera superficial para complementar el diseño de el sistema, aunque no es el enfoque de el análisis. Para los sistemas de carga y descarga de agua desde los vagones, se propone utilizar sistemas automáticos con válvulas anti-retorno que permitan vaciar y llenar rápidamente los vagones de agua. En el caso de otros tipos de vagones, podrían considerarse sistemas diferentes.

7.3.1. Vagones

Para los vagones, es necesario que cuenten con un conector y un sistema de presión para mantener sellado el contenido durante el tránsito, junto con dispositivos de seguridad para casos de aumento de presión durante el viaje. Se plantea la incorporación de un conector en uno de los costados del vagón, tal como se muestra en la figura 39.

7.3.2. Estaciones

En las estaciones de carga y descarga se propone utilizar un sistema automático de acople de un tubo con el conector correspondiente en el vagón. Este sistema contará con un pin de alineamiento cónico para el ajuste fino, mientras que la alineación lateral se coordinará con la locomotora. La idea es que el proceso sea completamente automatizado.

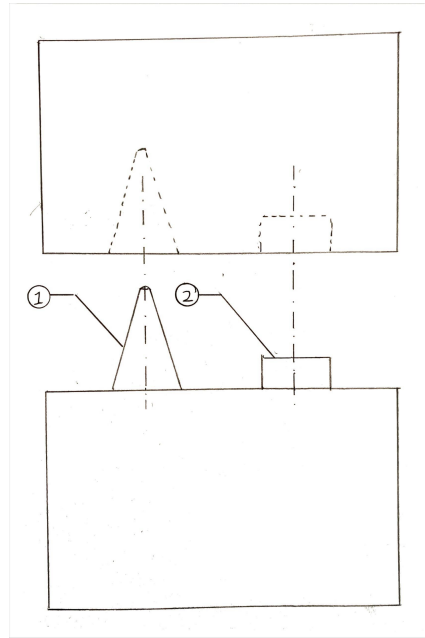


Figura 39: Bosquejo del conector de carga y descarga de agua

En la figura 39 se aprecia un bosquejo que muestra los componentes del conector:

1. Pin de alineamiento cónico
2. Conector tipo “QuickDisconnect”

7.4. Alternativas

Para el caso de los vehículos se podría aplicar un sistema más parecido a los trenes de pasajeros terrestres, los cuales podrían tener motores en todos los vagones, lo cual cambiaría la dependencia de la capacidad de transporte de la locomotora a la cantidad de vagones disponibles, es decir, si

es necesario transportar más, solo se agregan vagones extras. Además un sistema así permitiría disminuir la criticidad operacional del sistema en las locomotoras.

Para utilizar un sistema así sería más conveniente también electrificar la vía, para esto se podría utilizar un sistema similar a el SCMaglev (EDS) donde la vía es la parte activa del motor lineal y la energía para sistemas de control en el tren es entregada mediante bobinas inductivas. Para esto sería necesario el uso de varias subestaciones a lo largo de la vía lo cual podría hacer más complejo el sistema.

Para las vías igual se podría hacer una variación para que el sistema esté más protegido de el regolito, haciendo una vía similar a la del sistema SCMaglev (EDS) donde se encuentre más cubierta la parte donde circula el tren, esta opción requiere más material durante la construcción.

8. Otras Ideas

Durante la investigación para este trabajo se analizaron distintas ideas, las cuales fueron descartadas o no fueron incluidas en la discusión debido a diferentes dificultades técnicas, pero vale la pena mencionar algunas considerando la posibilidad de que en el futuro existan desarrollos tecnológicos que hagan viables estas opciones.

8.1. Tren tradicional con motor lineal

Un sistema tradicional de líneas férreas fue descartado en el análisis debido a los problemas de tracción, dilatación térmica y de fricción. Un sistema que utilice ruedas y rieles normales, pero que para la propulsión use motores lineales no tendría problemas de tracción para aceleración y frenado. El problema a solucionar con un sistema así es la fricción y desgaste de las ruedas además de la dilatación térmica, si se desarrollan medidas de mitigación o materiales más resistentes al desgaste y a la dilatación térmica, un sistema de este estilo podría ser posible de implementar.

8.2. Tren Magnético EDS

En el desarrollo del trabajo esta opción fue descartada debido a la complejidad de un sistema basado en superconductores y el mayor consumo eléctrico, se podría hacer viable si las investigaciones y desarrollo de materiales superconductores, permiten este fenómeno sin el uso de complejos sistemas enfriadores que además elevan el consumo energético de este sistema. También el desarrollo de soluciones energéticas puede ayudar a la viabilidad de un sistema EDS

8.3. Sistema de lanzamiento maglev

Esta opción no fue realmente considerada en el trabajo debido a la complejidad y el bajo nivel de investigación en esta área. Este sistema utiliza sistemas maglev para acelerar un objeto, en este caso un contenedor de agua, para luego lanzarlo hasta un punto, aprovechando la ausencia de una real atmósfera en la luna. Cabe mencionar que sistemas de lanzamiento de este estilo en la Tierra ya se han desarrollado con diversos niveles de éxito, lo cual habla bien de la posibilidad

de aplicación de un sistema así. Un sistema de captura tendría recibir el contenedor en el punto final, capturando y frenando el contenedor de una manera segura. Un sistema así, requeriría de un nivel de precisión altísimo, y de un consumo de energía intenso en el punto de lanzamiento, en el cual justamente existen problemas de generación de energía. Resolviendo los problemas energéticos y de captura, es posible que un sistema así sea aplicado en el futuro.

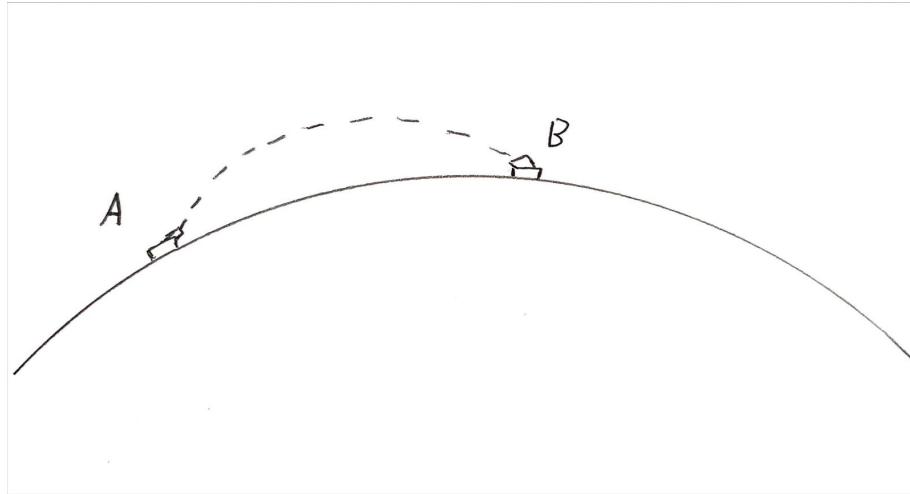


Figura 40: Bosquejo sistema de lanzamiento maglev

8.4. Sistema de túneles maglev

Una opción que podría convertirse en relevante para la investigación de este tema, es la de un sistema de túneles bajo la superficie lunar, evitando los problemas del polvo lunar y la dilatación térmica ya que se encontraría contenido. Otros problemas que un sistema de este estilo podría mitigar son las pendientes y curvas, permitiendo un sistema de velocidad muchísimo mayor. Para que un sistema basado en túneles funcione, los métodos de construcción deben ser optimizados a tal nivel que sea factible la construcción de túneles de largas distancias bajo la superficie lunar.

9. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de un sistema de transporte magneto levítico para la superficie lunar ofrece una alternativa prometedora frente a métodos de transporte convencionales, dadas las condiciones extremas presentes en el entorno lunar.

Entre las condiciones lunares que se detectaron como importantes para este estudio se encuentra la variación de temperatura y las características desgastantes del regolito.

La investigación también incluyó a distintas tecnologías de transporte que podrían servir para resolver el problema planteado, desde tecnologías tradicionales a tecnologías en fase de desarrollo inicial.

A partir de la revisión de la factibilidad técnica, la selección de tecnologías de levitación, y el análisis de la topografía lunar, se concluye que un sistema basado en magnetismo pasivo o semipasivo (Inductrack) podría reducir significativamente los requerimientos de energía y mantenimiento, al mismo tiempo que se logra una operación confiable sobre terrenos con pendientes moderadas.

Asimismo, la posibilidad de transportar grandes volúmenes de hielo desde los polos lunares hacia zonas más próximas al ecuador permite aprovechar de mejor forma el recurso hídrico, tanto para el consumo directo en futuros asentamientos como para la producción de propelente en órbita. Este paso resulta esencial en la visión de una economía cislunar que requiera grandes cantidades de agua de manera sostenible.

La propuesta de diseño se basa en las condiciones y requerimientos de diseño que se establecieron en el informe, donde se buscó realizar una propuesta realizable con tecnologías existentes. Se presentaron además otro tipo de ideas como el lanzamiento de contenedores utilizando tecnología maglev.

En lo que respecta a recomendaciones, se sugiere profundizar en el dimensionamiento energético de la infraestructura, incorporando modelos de generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías o celdas de combustible, de modo de sustentar una operación continua durante la noche lunar. También se propone avanzar en la estandarización de los vagones y estaciones de carga, maximizando la modularidad y la automatización para facilitar el mantenimiento y la

adaptabilidad a distintos volúmenes de extracción. De esta manera, se allana el camino para la futura implementación real de un sistema de transporte lunar que contribuya a la consolidación de un asentamiento permanente y la explotación sostenible de recursos en la Luna. Se debe además revisar la factibilidad real de un sistema maglev Inductrack para el transporte de carga realizando prototipado y ensayos a escala ya que la investigación del tema aún se encuentra en la infancia.

Una investigación de materiales avanzados permitiría resolver varios de los problemas que se presentaron durante esta investigación, especialmente en materiales resistentes a el desgaste y las condiciones térmicas en la Luna.

A futuro se podrían considerar ideas distintas como la de el uso de un sistema basado en imanes superconductores o el uso de sistemas de lanzamiento y captura maglev. Para estos sistemas es necesario resolver problemas energéticos, de materiales y tecnológicos. Específicamente el sistema de lanzamiento y captura podría ser estudiado como una solución a varios problemas de transporte en la luna, incluso podrían ser utilizados para reducir la cantidad de combustible necesario para alcanzar la órbita lunar. Se podría estudiar como resolver la demanda energética de soluciones de este estilo, además de realizar una investigación de sistemas de captura que sean seguros y eficaces. Se pueden considerar también hasta sistemas de túneles, si la tecnología en el futuro permite la construcción conveniente de estos.

Realizar este trabajo ha permitido demostrar las posibilidades de investigación de temas avanzados sin necesitar de estar físicamente en los polos tecnológicos aeroespaciales. El hecho de poder buscar fácilmente artículos y libros en línea, pone en evidencia el nivel de globalización de la investigación y la capacidad de realizar aportes a temas contingentes desde cualquier parte del mundo.

Bibliografía

- [1] KUTTER, Bernard F.; SOWERS, George F. Cislunar-1000: Transportation supporting a self-sustaining Space Economy. En: *AIAA SPACE 2016 Conference & Exposition* (2016, Long Beach, California). AIAA 2016-5491, sep. 2016.
- [2] BENNETT, Trevor; CAIN, Charles; CAMPBELL, Nicholas; GEMER, Andrew J.; GREEN, Thomas; NIEDERWEISER, Tobias. Engineering the CisLunar Economic System based on ULA's CisLunar-1000 Vision. En: *AIAA SPACE 2016 Conference & Exposition* (2016, Long Beach, California). AIAA 2016-5305, sep. 2016.
- [3] UNITED LAUNCH ALLIANCE. Engineering Limitless Possibilities. [Presentación interna]. 20 mar. 2018. (Autor: Tory Bruno).
- [4] WATSON, K.; MURRAY, B.; BROWN, H. On the possible presence of ice on the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 66(5):1598–1600, 1961.
- [5] PAIGE, D.A. et al. The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Space Science Reviews*, 150:125–160, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9529-2>.
- [6] NASA. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). [en línea] Disponible en: <https://science.nasa.gov/mission/lro/> [consulta: 3 feb. 2025].
- [7] HEIKEN, G.H.; VANIMAN, D.T.; FRENCH, B.M. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [8] BRISSET, Julie; MILETICH, Thomas; METZGER, Philip. Thermal extraction of water ice from the lunar surface - A 3D numerical model. *Planetary and Space Science*, v.193, 2020.
- [9] LAI, C.C. et al. Development of a Fiber-Optic Sensing System for Train Vibration and Train Weight Measurements in Hong Kong. *Journal of Sensors*, jul. 2012.
- [10] SAWADA, K. Outlook of the Superconducting Maglev. *Proceedings of the IEEE*, 97(11), nov. 2009. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030246.
- [11] ONO, M.; KOGA, S.; OHTSUKI, H. Japan's Superconducting Maglev Train. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, mar. 2002.

- [12] LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL SECURITY, LLC. United States Patent US 8,578,860 B2.
- [13] POST, R.F.; RYUTOV, D.D. The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. 2000.
- [14] JACOB, A.M.G.; MONTEIRO, N.M.V. A new concept of superelevation in magnetic levitation – ProDynamic. 2018.
- [15] NASA. Polar Resources Ice Mining Experiment-1 (PRIME-1). [en línea] Disponible en: <https://www.nasa.gov/mission/polar-resources-ice-mining-experiment-1-prime-1> [consulta: 3 feb. 2025].
- [16] NASA. Lunar Ice Mining with Microwaves. [en línea] Disponible en: <https://www.nasa.gov/general/lunar-ice-mining-with-microwaves> [consulta: 3 feb. 2025].
- [17] ESA. Lunar Ice Mining Mission by ESA. [en línea] Disponible en: <https://www.esa.int> [consulta: 3 feb. 2025].
- [18] NASA. Aqua Factorem: Ultra Low-Energy Lunar Water Extraction. [en línea] Disponible en: <https://www.nasa.gov/general/aqua-factorem-ultra-low-energy-lunar-water-extraction> [consulta: 3 feb. 2025].
- [19] NASA. Small Nuclear Reactors for Lunar Exploration. [en línea] Disponible en: <https://www.nasa.gov/general/small-nuclear-reactors-for-lunar-exploration> [consulta: 3 feb. 2025].
- [20] ARIZONA STATE UNIVERSITY. LROC QuickMap - An Interactive Map of the Moon. [en línea] Disponible en: <https://quickmap.lroc.asu.edu/> [consulta: 3 feb. 2025].
- [21] FERROCARRIL ANTOFAGASTA BOLIVIA. FCAB pone en marcha la primera locomotora a hidrógeno de Sudamérica. [en línea] 2024. Disponible en: <https://www.fcab.cl/> [consulta: 7 feb. 2025].
- [22] LEWIS, R.; OLOFSSON, U. (Eds.). *Wheel-Rail Interface Handbook*. Cambridge, UK: CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2009.