

PRIMERA APROXIMACIÓN DE DISEÑO DE UN ROVER MINIMALISTA BIO-INSPIRADO

Mauricio Ramiro Henríquez Schott

Ingeniería Industrial, Universidad Austral de Chile, mauriciohenriquez@uach.cl

Matilde Santos

Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

La competición internacional “Google Lunar X PRIZE” promovió las propuestas para lanzar, alunizar y operar un rover robótico en la superficie lunar. Con ese contexto, en este trabajo se plantean los requerimientos del sistema y escenarios de validación, así como una primera aproximación al diseño un rover minimalista, de reducidas masa y volumen, bio-inspirado en el caminar de los insectos, los cuales evolutivamente están optimizados para caminar en terrenos altamente irregulares como los encontrados en la Luna. Los resultados muestran un correcto desempeño del sistema de tracción y del diseño en general, lo cual valida las premisas del desarrollo y permiten enfocarse en la construcción de un prototipo que será validado en escenarios reales.

Palabras Clave: Diseño bio-inspirado, robótica, rover lunar, espacio

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años la exploración espacial ha ganado un nuevo impulso, esta vez de la mano del sector privado, el cual ha tomado las riendas de este desarrollo debido a los constantes recortes presupuestarios sufridos por las grandes agencias espaciales de Estados Unidos y Europa, resultado de la situación económica mundial. En esta oportunidad, en la llamada “Nueva Carrera Espacial”, el sector privado ha puesto el foco en un desarrollo sustentable del ámbito espacial, creando productos y servicios y optimizando los procesos y tecnologías con el propósito de reducir los costos.

Ejemplos de esto son empresas como SpaceX (desarrollo privado de cohetes), competiciones internacionales como el “Ansari X PRIZE” (vuelos suborbitales reutilizables de uso privado), el “Lunar Lander X Challenge” (desarrollo de vehículo de aterrizaje lunar de segunda generación), “Mars One” (primera misión tripulada a Marte) o el “Google Lunar X PRIZE”. Este último está enfocado al

lanzamiento, alunizaje y operación de un rover robótico sobre la superficie lunar [3].

El presente trabajo se enfoca en los esfuerzos por desarrollar un diseño de rover lunar original, minimalista y de diseño bio-inspirado, el cual sea capaz de cumplir con los requerimientos exigidos por la competición así como también soportar las rigurosas condiciones del ambiente lunar.

Los objetivos de esta contribución son:

- i) abstraer los principios mecánicos del caminar de insectos aplicándolos a un sistema de tracción simplificado.
- ii) Minimizar el tamaño y componentes mecánicos y electrónicos requeridos para el funcionamiento de un robot de exploración de superficie.
- iii) Desarrollar una plataforma de pruebas prototipo con el fin de validar el modelo obtenido.
- iv) Diseñar la versión final del robot considerando las exigencias de una misión lunar.

El documento parte haciendo un análisis de los requerimientos para luego enfocarse en los aspectos del diseño bio-inspirado, y pasar a la implementación de una plataforma y primeros resultados, para terminar con las conclusiones y trabajos futuros.

2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

De acuerdo al perfil de la misión, enfocado en este caso al desarrollo de un rover lunar, y considerando el entorno lunar, así como las exigencias propuestas por la competición, el robot debe ser capaz de soportar las siguientes condiciones [9]:

Vibración y choques: Todo vehículo o dispositivo que es lanzado al espacio debe tolerar vibraciones de entre 5Hz y 50Hz producidas por el cohete durante el despegue, así como ondas de choque (cargas) de hasta 10g creadas ya sea por las separaciones de las etapas del cohete o, en este caso también, por el vehículo de alunizaje o “Lander”. Los valores específicos de tolerancia se definen una vez

seleccionado el vehículo de lanzamiento y de acuerdo a las características del vehículo aterrizador.

Vacío de espacio: Desde la superficie de la tierra hasta el vacío del borde del espacio se produce una diferencia de presión de aproximadamente 15 psi, lo que produce en cualquier material no preparado la liberación de gases (*outgassing*). En este efecto los átomos superficiales son liberados en forma de vapor, potencialmente contaminando otros componentes. Pero además, cualquier micro-burbuja, atrapada ya sea en el metal, electrónica, o cualquier otro componente, puede producir este efecto de liberación de gases (*outgassing*) y subsecuentemente explosiones que destruirían los componentes de no estar preparados. Especificaciones de la NASA requieren que todo componente este preparado para soportar niveles de vacío menores a 0.01 Torr (mmHg) sin liberar gases ni producirse fallas por micro fracturas.

Temperatura y ciclo térmico: En el vacío del espacio se pueden alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto (-270°C). Sin embargo, y debido a las capas aislantes tanto del vehículo de lanzamiento como del posterior vehículo para el traslado lunar y aterrizador, sólo se deben considerar los extremos de temperatura lunar, los que se ubican entre los -233°C en el momento más frío de la noche lunar y hasta +123°C, estando ubicado este máximo en el ecuador en el medio día lunar.

No sólo se deben tener en cuenta los valores extremos sino que también el ciclo térmico, el cual puede pasar de un extremo a otro en pocos segundos. Esto significa que todo material debe estar preparado para soportar estas condiciones tanto como sea posible, teniendo en cuentas las deformaciones producto de la dilatación y contracción de los materiales, puntos de congelamiento y ebullición, entre otros.

Radiación: Todo componente que sobrepasa el límite del espacio exterior (sobre los 100km de altura), está sujeto a una protección cada vez menor, y posteriormente nula, de la magnetosfera terrestre respecto a la radiación solar y cósmica. Este aspecto es de vital importancia para la electrónica de los vehículos, la cual puede verse notoriamente afectada e incluso dejar de funcionar completamente según la duración de la misión y la cantidad de radiación acumulada. Un ejemplo de esto es la masa de partículas de viento solar que impactan la superficie lunar en una proporción de 50gr/s.

Resonancia acústica: El análisis de resonancia acústica del rover, así como del aterrizador y otros sistemas, debe probar que no se acopla acústicamente a la resonancia del vehículo de lanzamiento, de lo

contrario la vibración se autoincrementa hasta destruir los sistemas y potencialmente al cohete entero.

Masa y Tamaño: Tanto la masa como el tamaño del rover tienen una incidencia directa en los costes de lanzamiento. Por ende, es necesario mantener ambos factores lo más bajo posibles, sin afectar los criterios antes mencionados.

Superficie lunar: La superficie lunar es altamente irregular, compuesta de rocas o “regolitos” de diverso tamaño (desde pequeñas rocas del tamaño de un botón, hasta el tamaño de un vehículo pequeño), pendientes prolongadas y una amplia cantidad de cráteres (de hasta aproximadamente 30° de inclinación). Por lo tanto, el vehículo rover que se diseñe debe considerar dichas características de topología.

Además, la superficie de la Luna se encuentra cubierta de un fino polvo tipo “Talco” de entre 2cm y 10cm de espesor, en donde las partículas de incluso menos de 0.1mm son altamente abrasivas y cargadas estáticamente, por lo cual los sistemas deben incluir sellos y protecciones adecuadas. Las condiciones del ambiente lunar se pueden encontrar en [4, 9].

Componentes únicos y sistemas redundantes: Por un lado, debido al alto riesgo de fallos producto de las extremas exigencias del ambiente lunar, los componentes que no sea posible duplicar (por ejemplo los motores eléctricos del robot, que por tamaño no es posible tener de repuesto), deben ser reducidos en número y a su vez ser altamente confiables (sometidos a duras pruebas sobre los rangos de tolerancia mínimos). Por otro, en todos los sistemas que sea viable, se debe considerar un sistema de respaldo o “redundante” que pueda reemplazar al primero en caso de fallos. Un ejemplo de esto puede ser la electrónica del robot, que sí es duplicable sin costo de espacio.

2.1 ESCENARIOS

De acuerdo a lo señalado, sabemos que el rover debe ser capaz de lidiar con el terreno altamente irregular de la Luna. A continuación se enuncian las siete características topológicas lunares más representativas, para las que se diseñará el sistema de tracción del vehículo.

2.1.1 Escenario 1: Mar lunar

Se caracteriza por una superficie relativamente plana, sin grietas ni cráteres comparables al tamaño del rover y con pendientes que no superen los 5° de inclinación, ya sea en ascenso o descenso.



Figura 1: Mar lunar.

2.1.2 Escenario 2 – Pendientes prolongadas (Highland)

Se caracterizan por ser zonas con una inclinación no mayor a 10° y con una extensión mayor a los 50 metros.



Figura 2: "Highland" lunar.

2.1.3 Escenario 3 – Terreno escarpado

Este tipo de terreno es posible encontrarlo en los "Highlands lunares", se caracteriza por grietas de tamaño comparable al de la envergadura del rover, con una distribución irregular de rocas y montículos de tamaño igualmente comparable al del rover.

Se prevé que en esta zona haya material aglutinado, más que fino material con partículas.

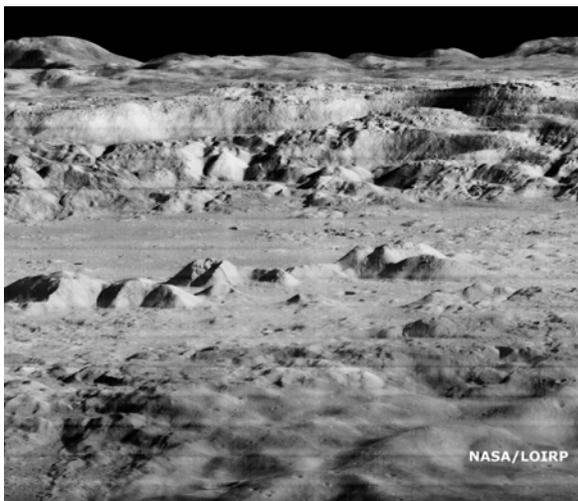


Figura 3: Terreno lunar escarpado.

2.1.4 Escenario 4 – Material con partículas finas

Uno de los principales inconvenientes de la superficie lunar es la presencia de un fino polvo, que puede significar problemas si cubre paneles solares o interfiere con la tracción del rover.

El tamaño de partículas es menor a 0.1 mm y se encuentra en pendientes de hasta unos 20° , con una profundidad de entre 2cm y hasta 20cm.

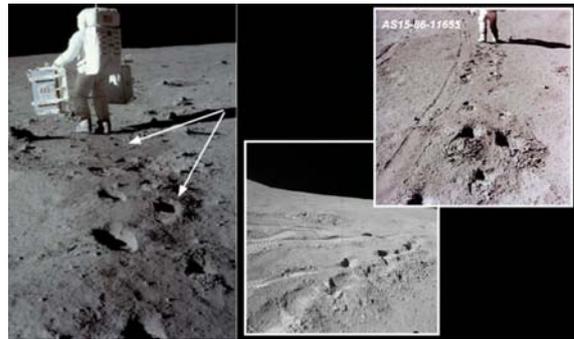


Figura 4: Partículas finas.

2.1.5 Escenario 5 – Regolito lunar

La presencia de rocas (regolito) es una constante en el terreno lunar, con tamaños que van desde los 2cm hasta los 30cm aproximadamente para el caso de pruebas del rover (existen hasta del tamaño de un vehículo pequeño). A diferencia del escenario 3, en este escenario se encuentran rocas y no montículos, entendiéndose que la diferencia radica en la adhesión al suelo que presentan. En este caso, los obstáculos podrían moverse por efecto de la tracción del rover, dificultando el avance.



Figura 5: Ejemplos de regolito lunar.

2.1.6 Escenario 6 – Superficies planas

Este tipo de terreno es más bien horizontal, sin rocas de tamaño considerable ni tampoco con capas de material de partículas, se presenta como una corteza dura.



Figura 6: Superficie lunar plana.

2.1.7 Escenario 7 – Cráteres y agujeros

Los cráteres son eventos frecuentes sobre la geografía lunar, y de acuerdo a algunos mapeos lunares, las pendientes para abandonarlos en promedio se acercan a los 45° de inclinación respecto a la horizontal. Otro evento importante pueden ser las grietas o zanjas, como lo muestra la segunda imagen de este apartado. Se caracterizan igualmente por pendientes superiores a los 40° , con tamaños de profundidad y anchos variados.



Figura 7: Cráteres y agujeros lunares.

3 DISEÑO BIO-INSPIRADO

Las particularidades de la topología lunar discutidas en la sección 2 hacen importante considerar dentro del diseño características propias de un sistema de locomoción adaptado a todos estos tipos de terrenos. Aquí en la Tierra encontramos terrenos similares a los que existen en la Luna y en todos ellos podemos observar insectos perfectamente adaptados a ellos, los cuales pueden recorrer grandes distancias en terrenos que van desde superficies lisas, pasando por arena y rocas de distinto tamaño, pendientes inclinadas y hasta incluso sobre el agua (este último es un escenario que no encontramos en la Luna).

Por otro lado desde hace algunas décadas, la robótica ha tomado aspectos de la naturaleza, concepto

conocido como Bio-Inspiración [2, 5]. En el caso de las patas de los insectos, en tan sólo una de sus seis patas encontramos por lo menos tres articulaciones con sus correspondientes ligamentos así como otras estructuras. Replicar de forma exacta este sistema biológico mediante actuadores u otros mecanismos es complejo y costoso en términos de la cantidad de componentes necesarios [1, 5, 6, 7, 10]. Se ha intentado emular el principio abstracto del funcionamiento con el fin de duplicarlo de forma simplificada manteniendo sus características fundamentales. La figura 8 muestra el proceso lógico por el cual se determinó el diseño básico a seguir:

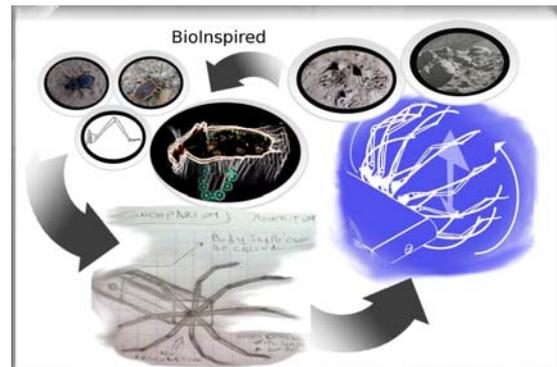


Figura 8: Proceso lógico por el cual se determinó el diseño básico.

Podemos apreciar que el diseño de la pata del insecto ha sido simplificado en su forma curva básica y se ha replicado de forma circular formando una rueda. A este tipo de combinación entre ruedas y patas se le conoce desde hace algunos años como “Wheg” por la composición de las palabras en inglés “Wheel” (rueda) y “Leg” (pierna o pata). La figura 9 muestra en mayor detalle cómo se disponen un número de aspas curvas similares a la pata de un insecto en forma circular para formar una rueda, simulando el proceso de “Ciclo Elíptico” que encontramos en el caminar de los insectos.



Figura 9: “Wheg” de aspas curvas simulando patas de insecto en una rueda.

Además podemos apreciar como la forma curva de cada aspa en contacto con el suelo permite una flexión bajo la carga del robot, almacenando energía potencial que es liberada como energía cinética en el giro de la rueda, impulsando al robots hacia arriba y adelante, simulando la propiedad de “Almacenamiento de Energía” que encontramos en el modelo biológico de la pata de un insecto.

En lo que respecta al “Paso de Trípode Alternado”, característico del caminar de los insectos, fue diseñado mediante dos whegs, dispuestas inicialmente como dos aspas de un lado y una del otro en contacto con el suelo (Figura 10).

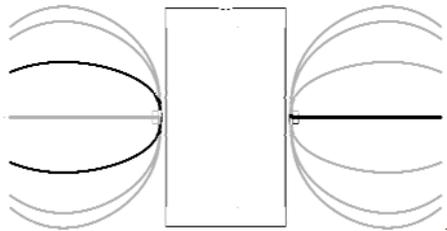


Figura 10: Paso de trípode alternado simplificado con dos whegs.

Como se puede apreciar, inicialmente se sitúan dos aspas del lado izquierdo y una del lado derecho en contacto con el suelo, formando el trípode inicial, alternando el ángulo de giro de la rueda. En la siguiente posición de rotación se forma el segundo trípode con un aspa del lado izquierdo y dos del lado derecho en contacto con el suelo.

Si bien este diseño simplifica en gran medida las propiedades mecánicas del caminar de los insectos, el compromiso que se obtiene entre eficiencia y simplicidad lo hacen ideal para un enfoque minimalista, manteniendo los principios abstractos fundamentales del modelo biológico, aprovechando sus características esenciales.

Producto de lo irregular de la topología lunar, es importante considerar dentro del diseño la posibilidad de reincorporarse ante un vuelco. Esto es una limitación en el diseño de los vehículos de exploración lunar que se han usado hasta ahora, los que en caso de darse la vuelta no pueden recuperarse (Figura 11).

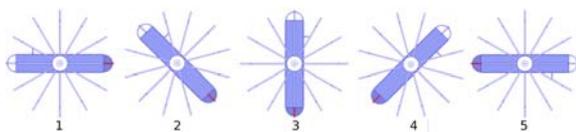


Figura 11: Recuperación ante un vuelco mediante diseño reversible.

El diseño de dos whegs permite la rotación del chasis del robot en su centro. De esta forma en caso de un vuelco el cuerpo del vehículo puede rotar para recuperar su posición correcta o incluso ser manejado de forma invertida.

Para el caso de los vuelcos laterales producto de una diferencia en la altura de las ruedas izquierda y derecha, como muestra la figura 11, la curvatura en la punta de cada aspa permite adaptarse al terreno evitando en gran medida esta situación.

Para el caso extremo de un vuelco lateral en donde el robot quede en 90°, el diseño debe incorporar una diferencia en el tamaño de la mitad de las aspas de la rueda, formando de esta forma un plano inclinado, el cual junto con la rotación del cuerpo del robot provoquen la caída hacia uno de los lados recuperando la posición correcta. Desplazando el centro de gravedad hacia la parte baja del chasis se facilitará esta maniobra, puesto que la rotación provocará un desequilibrio que lo obligará a caer de forma lateral, tal como se muestra en la figura 11.

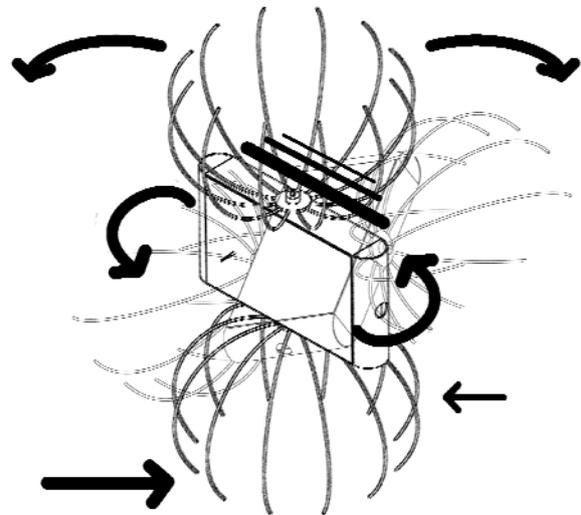


Figura 11: Recuperación ante un vuelco lateral.

4 PLATAFORMA MULTIPROPÓSITO

El diseño general propuesto se presenta como una familia multipropósito de modelos del mismo robot. La figura 12 muestra alguna de las posibles configuraciones:

Micro: Versión con propósitos de demostración y prueba del concepto. Se compone de un panel solar y electrónica básica para mover los motores hacia

adelante. Distintas configuraciones de ruedas pueden ser probadas fácilmente.

Mini: Versión minimalista, mínimo tamaño posible para un robot funcional en términos de una misión lunar. De tamaño Cubesat (<http://www.cubesat.org>) (cubo de 10x10x10cm), es un vehículo básico de procesamiento remoto y simplicidad de sistemas para una misión de corta duración.

Full-Size: Versión de mayor tamaño capaz de cargar experimentos e incorporar interfaces manipuladoras, entre otros. De entre 3 y 5 kg, es una versión de más fácil construcción en forma prototipo.

Heavy-Duty: Versión reforzada para el caso de terrenos incluso más irregulares, en donde sea imposible evitar el rodar por laderas o caer por agujeros. La forma cerrada permite proteger el cuerpo del robot durante impactos.

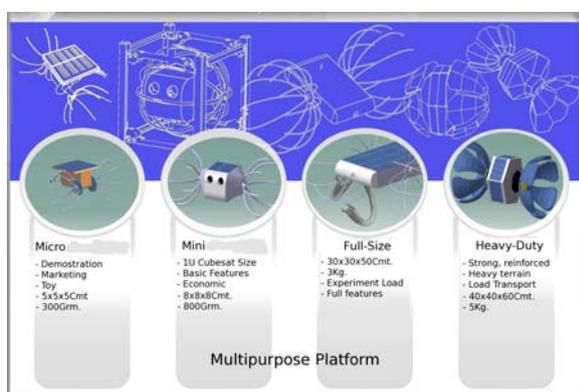


Figura 12: Plataforma Multipropósito.

Para esta misión se selecciona el modelo “Mini” como el más óptimo de ser utilizado en una misión real. Su volumen y peso reducido lo hacen un sistema de bajo costo y simplicidad de funcionamiento. Todos los cálculos y diagramas a continuación lo hacen tomando este modelo como base.

4.1 CONFIGURACIÓN DE ASPAS Y USOS POTENCIALES

Un efecto indeseado del diseño de dos ruedas en donde el cuerpo del vehículo puede rotar en el eje de éstas, es que el diámetro de las ruedas debe ser mayor al largo del chasis. Si consideramos restricciones de volumen, encontramos que el tamaño del chasis se puede ver reducido para acomodar las ruedas. En caso contrario la opción de incrementar el tamaño del chasis implica disminuir el tamaño de las ruedas, lo cual en un tamaño reducido se convierte en un problema, pues ante ruedas pequeñas hasta los más mínimos obstáculos se vuelven considerables.

Dentro del diseño, tal como se muestra en la figura 13, se muestran diferentes opciones a considerar, tales como cerrar o “colapsar” las ruedas en forma de abanico para reducir considerablemente el tamaño durante el transporte, o “esfera” con las aspas hacia adentro, protegiendo el cuerpo durante el lanzamiento. En ambos casos, las aspas se extienden luego del aterrizaje para tomar la forma de exploración, maximizando la relación de tamaño entre el chasis y las ruedas.

Actualmente se realizan estudios específicos sobre potenciales diseños de métodos de cerrado o colapso de las aspas, así como potenciales usos alternativos y tamaños de aspas. Estos estudios no serán abordados en detalle en el presente trabajo.

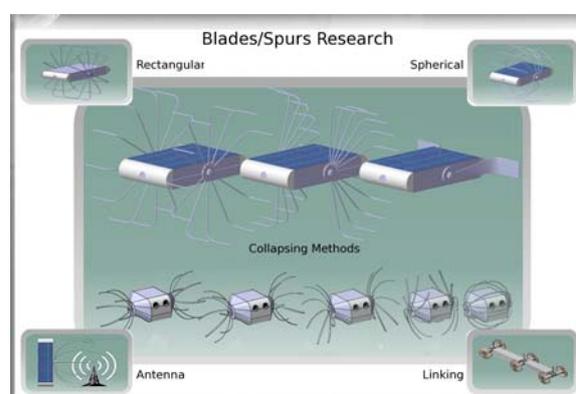


Figura 13: Configuración aspas.

Se han realizado una serie de diseños CAD que detallan la geometría de la versión “Mini” del rover para facilitar la construcción del prototipo.

5 VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Para probar el análisis y diseño se está construyendo el prototipo en su versión Full-Size. Pero además es esencial utilizar un terreno o “mesa de suelos” lo más parecido a los escenarios de topologías lunares que podrían encontrarse en la misión real. Además de probar el sistema de tracción, se deben verificar los sistemas básicos del vehículo, carga de batería, ciclo térmico (lo más cercano al lunar posible) y software, para validar lo más fielmente posible los datos obtenidos. Estas pruebas arrojarán los aciertos y problemas del diseño, los cuales serán aplicados en la versión final del rover.

Para el registro de las pruebas y resultados se graban imágenes y vídeo y, además, se utilizan los datos obtenidos por el software específicamente desarrollado para este propósito y los sensores internos y externos del vehículo, así como también herramientas externas como cinta métrica, instrumentos de laboratorio (testeo electrónico,

medidores de presión y flexión) y también la inspección visual mediante planillas de registro.

5.1 TERRENO DE PRUEBAS

Afortunadamente para este tipo de desarrollos, en Chile contamos con el desierto de Atacama, uno de los más áridos del mundo. En Yungai, sector ubicado a 80 km de la ciudad de Antofagasta, se encuentran las instalaciones “MMARS” (Moon-Mars Atacama Research Stations, por sus siglas en inglés). En éstas se encuentran los terrenos catalogados por la NASA como los más cercanos a la Luna y Marte en nuestro planeta y que nos permite validar los sistemas de tracción en un ambiente muy similar al que se podría encontrar en misiones a Marte o la Luna, algo que tanto la NASA como la agencia espacial europea ESA han realizado anteriormente para probar prototipos de sus vehículos de exploración de superficie.

Pero MMARS no sólo permite probar sistemas de tracción o locomoción, sino que su inhóspito ambiente permite realizar pruebas de rango térmico sobre distintos componentes, carga de baterías mediante celdas solares, transmisiones radiales, e incluso probar instrumental capaz de detectar vida microbiana.

Gracias a la colaboración de la Universidad de Antofagasta, institución a cargo de la administración de estos terrenos, fue posible encontrar y planificar los terrenos en los cuales sería probado el rover desarrollado. Cada una de las siete topologías lunares presentadas en la sección 2 fue posible de localizar en MMARS.

En la figura 14 podemos ver cuatro de las analogías más usadas entre el terreno lunar y el que es posible encontrar en los terrenos de MMARS. Un listado completo de las topologías lunares junto con sus homólogos en el desierto de Atacama lo podemos encontrar en el anexo a este informe.

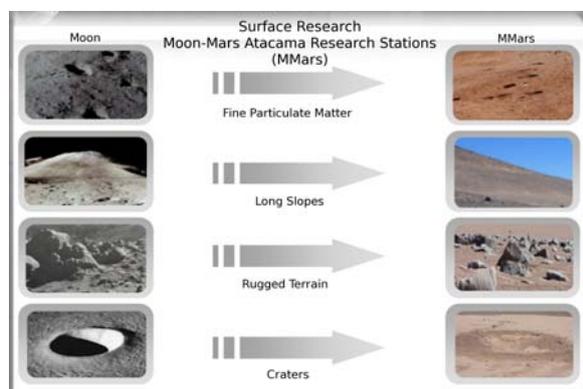


Figura 14: Comparativa MMARS y terrenos lunares.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La tecnología y conocimientos actuales, tanto en el área de la ingeniería aeroespacial como en robótica, permiten el diseño y desarrollo de un rover de exploración lunar minimalista, de reducidas dimensiones y masa, lo cual abarata significativamente los costos de lanzamiento de una misión lunar.

Un diseño bio-inspirado en el caminar de los insectos es aplicable de forma eficiente en un ambiente con superficies altamente irregulares como lo encontrado en la topología lunar. Los principios básicos del sistema de locomoción de los insectos marchadores permiten un óptimo desempeño de un vehículo robótico ante obstáculos de todo tipo, incluyendo: rocas de diferente tamaño, cráteres, grietas y pendientes, demostrando que los principios mecánicos empleados por los insectos en la Tierra son extrapolables a un ambiente lunar de similares características.

Producto de lo irregular de la topología lunar, es importante considerar dentro del diseño la posibilidad de reincorporarse ante un vuelco. Esto es una limitación en el diseño de los vehículos de exploración lunar y marciana que se han usado hasta ahora (sistema de tracción Rocker-Bogie), los que en caso de darse la vuelta no pueden recuperarse. El diseño de dos whegs permite la rotación del chasis del robot en su centro. De esta forma en caso de un vuelco el cuerpo del vehículo puede rotar para recuperar su posición correcta o incluso ser manejado de forma invertida.

En el prototipo para pruebas, se ha calculado que el sistema de tracción permitirá transportar de 1-2kg de carga adicional, además de una cámara de video VGA, una UMI (Unidad de medición inercial), electrónica de control, computadora de abordo, baterías y sistema de transmisión de video y control.

Con toda la información recopilada actualmente se encuentra en construcción la versión final del rover (modelo “Mini”) con componentes de grado espacial.

Referencias

- [1] Bartsch, S. (2013). Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot spaceclimber designed for extraterrestrial crater exploration. *KI-Künstliche Intelligenz*, 1-5.
- [2] Bartsch, S., Birnschein, T., Cordes, F., Kühn, D., Kampmann, P., Hilljegerdes, J., ... & Kirchner, F. (2010, June). Spaceclimber:

- Development of a six-legged climbing robot for space exploration. In Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK) (pp. 1-8). VDE.
- [3] Google Lunar X PRIZE (2015). <http://www.googlelunarxprize.org>
- [4] Heiken, G., Vaniman, D., & French, B. M. (1991). Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon. CUP Archive.
- [5] Machado, J. T., & Silva, M. F. (2012). An overview of legged robots. In International Symposium on Mathematical Methods in Engineering.
- [6] Nishikori, S., Hokamoto, S., & Kubota, T. (2011). Kinematic Discussion and Development of a Multi-Legged Planetary Exploration Rover with an Isotropic Leg Arrangement. *Advanced Robotics*, 25(6-7), 789-804.
- [7] Rohmer, E., Reina, G., & Yoshida, K. (2010). Dynamic Simulation-Based Action Planner for a Reconfigurable Hybrid Leg-Wheel Planetary Exploration Rover. *Advanced Robotics*, 24(8-9), 1219-1238.
- [8] Seeni, A., Schafer, B., & Hirzinger, G. (2010). Robot mobility systems for planetary surface exploration—state-of-the-art and future outlook: a literature survey. *Aerospace technologies advancements*. Intech Publ, 189-208.
- [9] Vaniman, D., Reedy, R., Heiken, G., Olhoeft, G., & Mendell, W. (1991). The lunar environment. *The lunar Sourcebook*, CUP, 27-60.
- [10] Zhang, L., Ma, D. W., Zhu, Z. L., & Hu, J. (2014). New Design, Kinematic and Static Force Modeling of a Bio-Inspired Leg Mechanism for Rough Terrain. *Applied Mechanics and Materials*, 461, 262-270.