



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROCESO DE DISEÑO DE ROVER PARA MINERÍA  
LUNAR. “NASA LUNABOTICS MINING  
COMPETITION”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECATRÓNICO**

**P R E S E N T A:**

**JORGE MARIO VILLAFUERTE PEREYRA  
OSCAR NAYAR GUZMAN CRUZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALEJANDRO CUAUHTEMOC RAMIREZ  
REIVICH**

**2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos.

Agradecemos en primer lugar a nuestra Alma Mater la Universidad Nacional Autónoma de México por consolidarnos no solo como profesionistas de alto nivel, sino también con integridad humana.

A nuestra facultad y a los profesores, que además de su conocimiento nos transmitieron su experiencia y las herramientas necesarias para concientizarnos del valor, retos y las responsabilidades de la ingeniería en México.

A nuestro director de tesis el Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich y al Dr. Vicente Borja Ramírez por guiarnos a lo largo de este proyecto, profesional y humanamente.

A nuestros sinodales el Ing. Salvador García Burgos, Dr. Víctor Javier González Villela y M.I. Javier Noé Ávila Cedillo por su apoyo, comprensión y observaciones.

A nuestro buen amigo Gabriel Reyes Díaz por su gran apoyo como aportación al proyecto y a su hermandad brindada. A los integrantes del equipo por la competencia, por siempre dar lo mejor de sí: Cesar A. Serrano, Juan C. Mariscal, Héctor Regalado, Vanía del Río, Carla Tajonar Luis G. Gutierrez, Luis E. Solís, Ricardo Hernández, Balam Morales, Iván Flores, Mariana Gómez, Luis A. Castellano, Jorge A. Díaz y Ricardo Vazquez.

A los patrocinadores del proyecto y al Ing. Felipe Helgueros Ocampo por su confianza y apoyo incondicional en el proyecto.



## **Dedicatoria.**

### **Guzmán Cruz Oscar Nayar**

Más que agradecimiento este título profesional es completamente de mis padres, Jesús Guzmán J. y María de la Luz Cruz R., que siempre han sabido ser los mejores padres en las buenas y las malas. Guiándome con valores y rectitud para ser un ser humano con calidad humana. Papá mil gracias por ser mi héroe, mi orgullo y mi guía. Mamá además de la vida te debo todo lo que soy, gracias por tus consejos, enseñanzas y todos tus esfuerzos por criarme.

Así como también a mi hermano Hugo A. Guzmán por ser mí mejor amigo de toda la vida y siempre estar en los momentos difíciles con una cálida sonrisa.

En general a la vida debo de agradecer por tantas bendiciones, he crecido con una familia única y sin duda alguna la mejor del mundo. Mi padres, que no de nacimiento pero si de crianza Adela Miranda, Francisco Nieto siempre con su amor incondicional, experiencias y tanto conocimiento, mil gracias por todo.

Fidel Guzmán y Emilia, tío mil gracias por hacerme un aventurero explorador. Isabel Cruz, por cuidarme desde pequeño e impulsar mi estudio. A mis "abuelitas" Isabel D.E.P y Lourdes por encaminar a este nieto loco.

A mis hermanos David Nieto, Abril Alonso y Elisa Alonso, mil gracias por tantas aventuras y experiencias.

A todos ustedes, los amo y gracias a ustedes fui, soy y seré.

A mis hermanos y futuros compadres Jorge Villafuerte, por tantas y tantas aventuras, tanto esfuerzo y dedicación en la conclusión de esta tesis, sin duda alguna esto marca en comienzo de un reto aún mucho más grande.

Gabriel Reyes, mi compadre por tanto conocimiento y experiencias de las cuales hemos aprendido, gracias por el apoyo siempre, créeme que es y será reciproco. Héctor Regalado y Cesar Cerrano por tantas aventuras y aprendizaje, sin duda alguna vendrán muchas más y sin ustedes esta tesis no hubiera sido posible.

Gracias a los que están, estarán y estuvieron conmigo....

GO!.

## Dedicatoria.

### Jorge Villafuerte

Dedico este esfuerzo a mi segunda madre Teresita Velázquez Quintana, por ser mi ejemplo a seguir, por ser mi admiración, por estar siempre a mi lado en espíritu, por inspirarme a tomar las decisiones más sabias y por mostrarme la salida cuando no la encuentro.

*“Si en la lid el destino te derriba; si todo en tu camino es cuesta arriba, si tu sonrisa es ansia insatisfecha, si hay faena excesiva y vil cosecha, si a tu caudal se anteponen diques... Date una tregua ¡pero no claudiques!”*

—Rudyard Kipling

Martha Pereyra, te dedico este pequeño logro en mi vida, ya que gracias a ti me has formado para siempre querer más y luchar por ello, por lo que no me detendré aquí. Te lo dedico por ser mi respaldo en todo momento, que me empuja, me hace ser más exigente, saludable y feliz cada día. Por qué me guías, me aconsejas y resaltas mi lado más humano, te amo.

Oscar Villafuerte, te dedico este paso que doy hoy, por ser mi mejor amigo y estar siempre que te necesito, por hacerme ver la vida desde un enfoque diferente, por desacelerarme cuando es necesario y por todo el conocimiento, experiencias, aventuras, viajes y cultura que me has brindado y que han podido ayudarme a formarme como soy hoy.

Ari Villafuerte, gracias por apoyarme en todo momento y en cualquier circunstancia, por ser mi mejor amiga, mi cómplice, mi hermana.

Dominika Woszczyk, también quiero dedicarte este esfuerzo ya que me has apoyado durante esta etapa clave de mi vida, has tenido la paciencia en mis momentos de incertidumbre y has depositado tu confianza en mí y en un futuro, kocham cię.

Nayar Guzman, te agradezco por ser mi compañero, mi amigo y mi hermano en esta etapa de nuestras vidas, por los momentos de frustración, los éxitos escolares y profesionales y por siempre pensar en mí en las oportunidades. Por el futuro que nos aguarda espero que continuemos la aventura como hasta hoy.

Gabriel Reyes Díaz y Gabriel Hernández Pérez les agradezco por ser tan buenas personas, tan buenos ingenieros, que me han ayudado a formarme y que representan una gran inspiración y una amistad de por vida.

Hector Regalado, te agradezco por correr juntos en tantas aventuras. Cesar Serrano por contar contigo en todo momento, y a los dos por brindarme su apoyo, su amistad y sus consejos siempre.



Proceso de diseño de rover para minería lunar. NASA Lunabotics Mining Competition

# Proceso de diseño de rover para minería lunar. 'NASA Lunabotics Mining Competition'





## Contenido General

Introducción.....	11
Objetivo y Alcances.....	12
<b>Capítulo I. Antecedentes</b>	
I.I Mecatrónica en industria aeroespacial.....	14
I.II Exploración lunar.....	17
I.III Ingeniería en condiciones lunares.....	23
I.III.I El efecto de la temperatura.....	23
I.III.II Vacío.....	26
I.III.III Comunicaciones.....	26
I.III.IV Regolito lunar.....	27
I.III.V Gravedad.....	28
I.IV Rovers y robots móviles.....	29
I.V NASA Lunabotics Mining Competition.....	34
<b>Capítulo II. Proceso de diseño</b>	
II.I Metodología para el diseño de productos mecatrónicos.....	40
II.II Propuesta de metodología de diseño.....	50
II.III Conformación del equipo.....	54
<b>Capítulo III. Entendimiento de la necesidad.</b>	
III.I Análisis de necesidades.....	56
III.I.I Comprensión.....	56
III.I.I.I Necesidad.....	57
III.I.I.II Problemática.....	63
III.I.I.III Requerimientos.....	64
III.I.II Experimentación.....	75
III.I.III Observación.....	76
III.II Brainstorming “Origen”.....	78
III.III Investigación.....	79
III.III.I Minería y excavación lunar.....	79
III.III.I.I Cangilones lunares.....	79
III.III.I.II Taladros lunares.....	80
III.III.I.III Tecnología de excavación lunar.....	82
III.III.I.IV The Moonbreaker.....	83
III.III.I.V Excavadora lunar neumática.....	86
III.III.I.VI Excavadoras lunares de percusión.....	88
III.III.II Benchmarking.....	89





## Capítulo IV. Etapa Creativa.

IV.I	Ciclo Creativo 1.....	99
IV.I.I	Brainstorming.....	99
IV.I.II	Prototipo 1 "Lucy".....	100
IV.I.III	Pruebas.....	102
IV.I.IV	Conclusión.....	104
IV.II	Ciclo Creativo 2.....	107
IV.II.I	Brainstorming.....	107
IV.II.II	Prototipo 2 "Cris".....	107
IV.II.III	Pruebas.....	110
IV.II.IV	Conclusión.....	114
IV.III	Ciclo Creativo 3.....	117
IV.III.I	Brainstorming.....	117
IV.III.II	Prototipo 2 "Cougar".....	117
IV.III.III	Pruebas.....	120
IV.III.IV	Conclusiones.....	120

## Capítulo V. Conformación del diseño

V.I	Definición de funciones y estructuras.....	123
V.II	Estructura general del robot.....	125
V.III	Tracción.....	128
V.IV	Suspensión.....	148
V.V	Chasis.....	153
V.VI	Excavación.....	158
V.VII	Depósito.....	180
V.VIII	Energía.....	189
V.IX	Control.....	190

## Capítulo VI. Diseño final y resultados del producto.

VI.I	Diseño final del robot.....	194
VI.II	Prueba de los sistemas.....	197
VI.III	Resultados.....	199
VI.IV	Recomendaciones de implementaciones futuras.....	200

<b>Bibliografía.....</b>	<b>205</b>
--------------------------	------------





## Índice de imágenes y tablas.

### Capítulo I. Antecedentes

Imágenes			
Imagen 1.1	Distribución de la industria aeroespacial en México.	Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología y Federación Mexicana de Industria Aeroespacial Año 2012.	15
Imagen 1.2	Exportaciones e Importaciones Industria Aeroespacial.	Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología y Federación Mexicana de Industria Aeroespacial Año 2012.	15
Imagen 1.3	Misión Soviética "Luna 9" y primera imagen captada desde superficie lunar.	National Space Science. Data Center. NASA.	18
Imagen 1.4	Misión "Surveyor 3" realizó la primera excavación lunar.	National Space Science. Data Center. NASA.	19
Imagen 1.5	Primeros Rovers de exploración lunar teledirigidos Lunokhod 1 (Izq.) y Lunokhod 2 (Der.).	National Space Science. Data Center. NASA.	20
Imagen 1.6	Robot de exploración lunar chino "Conejo de Jade"	China National Space Administration	21
Imagen 1.7	Técnica "Wadis térmico", el regolito sirve como una masa térmica para almacenar energía reflejada durante el día (izquierda), con la ayuda de un paraguas reflejante, el calor almacenado en la masa térmica puede mantener a una temperatura estable los elementos resguardados durante la noche lunar.	Imagen cortesía Gayle Dibiasio, NASA Glenn Research Center.	25
Imagen 1.8	Aglutina lunar, partículas de vidrio fundido con roca formadas durante los impactos de asteroides.	Imagen cortesía David McKay, NASA / JSC.	28
Imagen 1.9	Distancias de exploración extraterrestre.	Torsch con información publicada por la NASA	31
Imagen 1.10	Clasificación general de los robots.	Adaptada de la asociación japonesa de robótica industrial.	33
Imagen 1.11	Robot de excavación del Instituto Politécnico de Worcester, ganador del primer premio.	Foto cortesía de K. Zacny	36
Imagen 1.12	Robot ganador en el proceso de excavación del regolito, extrajo 439 kg en 30 min.	Foto cortesía de K. Zacny	36
Imagen 1.13	Lunabotics Mining Competition en el centro espacial Kennedy 2010. Se muestra robot de excavación construido por Georgia Tech.	Foto cortesía de K. Zacny	37
Imagen 1.14	Rover lunar Astrobotic con taladro de perforación Moonbreaker de Honeybee Robotics.	Foto cortesía de K. Zacny	38
Tablas			
Tabla 1.1	Evolución de los rover espaciales.	Basada en información de NASA Data Center.	30

### Capítulo II. Proceso de diseño

Imágenes			
Imagen 2.1	Etapas de la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	42
Imagen 2.2	Fase de planeación en la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	43
Imagen 2.3	Fase de desarrollo del concepto en la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	44
Imagen 2.4	Fase de diseño a nivel sistema en la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	44





Imagen 2.5	Fase de diseño a detalle en la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	45
Imagen 2.6	Fase de pruebas y refinamiento en la metodología tradicional de diseño.	Basada en el libro "Diseño y desarrollo de productos" Karl T. Ulrich y S.D. Eppinger	46
Imagen 2.7	Metodología Peñuelas para el diseño mecatrónico.	Peñuelas R. Ulises M., Metodología para el diseño mecatrónico, FI. UNAM, 2007.	48
Imagen 2.8	Modelo de innovación de la Universidad Stanford	Cortesía de ME310 Stanford University.	49
Imagen 2.9	Modelo de innovación en diseño de la empresa IDEO.	www.ideo.com	49
Imagen 2.10	Metodología propuesta de diseño.	Desarrollada	51

### Capítulo III. Entendimiento de la necesidad

Imágenes			
Imagen 3.1	Propuesta para un asentamiento lunar.	Luca Oleastri, 2008.	59
Imagen 3.2	Diagrama de la lunarena.	Cortesía NASA Education	65
Imagen 3.3	Clasificación de los requerimientos.	Desarrollada	65
Imagen 3.4	Diagrama del recipiente del depósito.	Cortesía NASA Education	68
Imagen 3.5	Simulante de suelo lunar JSC-1A y pruebas de características.	Fotografías.	75
Imagen 3.6	Experimentación de minería actual en Minera la Negra, Querétaro México.	Fotografías tomadas en minera la negra.	76
Imagen 3.7	Estacion espacial para la sobrevivencia imaginada por Tsiolkovsky 1920.	Tsiolkovsky 1920.	77
Imagen 3.8	Imágenes de las ideas obtenidas en el brainstorm inicial.	Desarrollada.	78
Imagen 3.9	La misión Apolo 12 alunizo cerca del Surveyor 3. En la imagen se aprecia a un astronauta en el Surveyor 3 y en el fondo la nave Apolo 12.	Imagen cortesía NASA, Kennedy Space Center.	79
Imagen 3.10	Fotografía del cangilón del Surveyor 3 tomada por astronautas del Apolo 12.	Cortesía NASA.	80
Imagen 3.11	Astronauta del Apolo practicando en el empleo del Apolo Lunar Surface Drill.	Cortesía NASA.	81
Imagen 3.12	Apollo Lunar Surface Boring y Coring Hardware	Cortesía NASA.	82
Imagen 3.13	Ejemplo de tipos de excavadoras lunares desarrolladas en la Escuela de Minas de Colorado	Cortesía Paul Van Susante	83
Imagen 3.14	Taladro rotativo y de percusión desarrollado por Honeybee Robotics probado en el Ártico.	<a href="http://www.honeybeerobotics.com/">http://www.honeybeerobotics.com/</a>	84
Imagen 3.15	El Moonbreaker permite el almacenamiento de regolito o el análisis directo del mismo.	<a href="http://www.honeybeerobotics.com/">http://www.honeybeerobotics.com/</a>	85
Imagen 3.16	Excavadora Lunar Neumática en fase de pruebas dentro de una cámara de vacío.	(Zacny et al. 2008b)	87
Imagen 3.17	Robot diseñado por Alabama University (izquierda), Diseño de tracción modular (derecha).	Cortesía de la Universidad de Alabama.	90
Imagen 3.18	Excavadora de doble pala modular diseñada por Alabama University	Cortesía de la Universidad de Alabama.	90
Imagen 3.19	Modelo de las llantas usadas por el robot de Alabama University	Cortesía de la Universidad de Alabama.	91
Imagen 3.20	Robot de excavación de la Universidad de West Virginia	Cortesía NASA.	92
Imagen 3.21	Llantas del robot de West Virginia University.	Cortesía NASA.	93
Imagen 3.22	Robot atlas02 diseñado por el NYU poly.	Cortesía NASA.	94
Imagen 3.23	Sistema de excavación del Robot hecho por el NYU poly.	Cortesía NASA.	94
Imagen 3.24	Robot diseñador por Iowa State University (izquierda), Diseño de tracción por orugas (derecha).	Cortesía NASA.	96





Imagen 3.25	Sistema de depósito del Robot diseñador por Iowa State University.	Cortesía NASA.	96
<b>Tablas</b>			
Tabla 3.1	Interpretación de los requerimientos generales.	Desarrollada	68
Tabla 3.2	Jerarquización de las necesidades funcionales.	Desarrollada	70
Tabla 3.3	Jerarquización de los parámetros a considerar.	Desarrollada	71
Tabla 3.4	Métricas de los parámetros del robot.	Desarrollada	72
Tabla 3.5	Matriz de relación entre los parámetros y las necesidades.	Desarrollada	73
Tabla 3.6	Relación de ventajas y desventajas del diseño de Alabama University.	Desarrollada	91
Tabla 3.7	Relación de ventajas y desventajas del diseño de West Virginia.	Desarrollada	93
Tabla 3.8	Relación de ventajas y desventajas del diseño de NYU.	Desarrollada	95
Tabla 3.9	Relación de ventajas y desventajas del diseño de Iowa State University.	Desarrollada	97

## Capítulo IV. Etapa Creativa.

<b>Imágenes</b>			
Imagen 4.1	Brainstorm del primer ciclo creativo.	Desarrollada	99
Imagen 4.2	Cadenas de cangilones y su empleo en minería a cielo abierto.	www.wikipedia.com	100
Imagen 4.3	Primer prototipo funcional "Lucy".	Fotografía	101
Imagen 4.4	Prototipo de la tarjeta controladora de motores.	Fotografía	101
Imagen 4.5	Prueba de llantas en el simulante lunar.	Fotografía	102
Imagen 4.6	Pruebas realizadas al método de excavación con cadena de cangilones.	Fotografía	103
Imagen 4.7	Prueba del sistema de elevadores de tijera.	Fotografía	103
Imagen 4.8	Prueba conjunta del prototipo "Lucy".	Fotografía	104
Imagen 4.9	Brainstorm del segundo ciclo creativo.	Desarrollada	107
Imagen 4.10	Espiral y tornillo de Arquímedes.	www.wikipedia.com	108
Imagen 4.11	Diseño de prototipo de excavación "Cris".	Desarrollada	108
Imagen 4.12	Prototipo de orugas para prototipo "Cris".	Fotografía	109
Imagen 4.13	Prototipo de la suspensión, modelada en SolidWorks y ya realizado el prototipo.	Fotografía	110
Imagen 4.14	Prueba del método de excavación "Cris" con dos materiales cartón (Izq.) PVC (Der).	Fotografía	111
Imagen 4.15	Imagen de las llantas y la suspensión de prueba.	Fotografía	113
Imagen 4.16	Brainstorming del proceso creativo 3.	Desarrollada.	117
Imagen 4.17	Barco de paletas diseñado por Leonardo Da Vinci.	www.wikipedia.com	118
Imagen 4.18	Diseño del prototipo con el software SolidWorks.	Desarrollada	118
Imagen 4.19	Prototipo de excavación Cougar.	Fotografía	119
Imagen 4.20	Proceso del desarrollo del prototipo de cangilón.	Fotografía	119
<b>Tablas</b>			
Tabla 4.1	Resultados de pruebas a llantas.	Desarrollada	102
Tabla 4.2	Resultado de pruebas a excavación con cadena de cangilones.	Desarrollada	103





Tabla 4.3	Resultado de pruebas a excavación con rodillo de excavación Cris.	Desarrollada	111
Tabla 4.4	Resultados de pruebas de ángulo crítico.	Desarrollada	113
Tabla 4.5	Resultados de pruebas a orugas.	Desarrollada	113
Tabla 4.6	Resultado de pruebas a excavación con cadena de cangilones.	Desarrollada	120

## Capítulo V. Conformación del diseño.

Imágenes			
Imagen 5.1	Funciones Generales del robot.	Desarrollada.	123
Imagen 5.2	Distribución de los Sistemas.	Desarrollada.	125
Imagen 5.3	Estructura general e interconexiones.	Desarrollada.	126
Imagen 5.4	Gráfica de velocidad vs potencia requerida.	Todd, D.J, Walking Machines, an Introduction to Legged Robots. Kogan Page Ltd, 1985.	128
Imagen 5.5	Conceptos de métodos de desplazamiento.	Desarrollada.	129
Imagen 5.6	Configuraciones de ruedas.	Desarrollada.	130
Imagen 5.7	Tipos de ruedas.	Desarrollada.	130
Imagen 5.8	Trayectoria de vuelta unidireccional (izquierda) y bidireccional (derecha).	Desarrollada.	131
Imagen 5.9	Configuración de dirección diferencial	Desarrollada.	132
Imagen 5.10	Configuración de dirección Omniwheel.	Todd, D.J, Walking Machines, an Introduction to Legged Robots. Kogan Page Ltd, 1985.	133
Imagen 5.11	Imagen de vehículo usando cintas de desplazamiento.	Todd, D.J, Walking Machines, an Introduction to Legged Robots. Kogan Page Ltd, 1985.	134
Imagen 5.12	Sistema de tracción seleccionado.	Desarrollada.	138
Imagen 5.13	Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.	Desarrollada.	138
Imagen 5.14	Primer diseño de las ruedas del rover.	Desarrollada.	139
Imagen 5.15	Primer diseño de las ruedas del rover.	Desarrollada.	140
Imagen 5.16	Análisis de desplazamiento de la rueda.	Desarrollada.	140
Imagen 5.17	Análisis de Von Mises de la rueda.	Desarrollada.	141
Imagen 5.18	Bandas de rodadura.	<a href="http://www.ehowenespanol.com/tipos-bandas-rodadura-info_241240/">http://www.ehowenespanol.com/tipos-bandas-rodadura-info_241240/</a>	141
Imagen 5.19	Propuestas de ruedas con banda de rodamiento modificada.	Desarrollada.	142
Imagen 5.20	Diseño final del dibujo de la banda de rodadura.	Desarrollada.	143
Imagen 5.21	Perspectiva explotada de la rueda y sus partes. (1) Banda de rodadura. (2) Tapa de acoplamiento con el motor. (3) Rueda. (4) Rodamiento para el motor. (5) Tapa de soporte para el motor.	Desarrollada.	143
Imagen 5.22	Diseño final de la llanta.	Desarrollada.	144
Imagen 5.23	Motoreductor.	<a href="http://www.wikipedia.com">www.wikipedia.com</a>	144
Imagen 5.24	Motor reductor BDPG-60-110-24V-3000-R76, de Anaheim Automation.	<a href="http://www.anaheimautomation.com">www.anaheimautomation.com</a>	145
Imagen 5.25	Proceso de manufactura de las ruedas.	Desarrollada.	147
Imagen 5.26	Llanta final sin capa de Neopreno (arriba) y con neopreno (abajo).	Fotografía.	148
Imagen 5.27	Simulación de la dinámica de la suspensión.	Desarrollada.	150
Imagen 5.28	Diseño de la suspensión.	Desarrollada.	151
Imagen 5.29	Comparación de resortes usados en la suspensión.	Fotografía.	152





## Proceso de diseño de rover para minería lunar. NASA Lunabotics Mining Competition

Imagen 5.30	Suspensión acoplada al rover.	Fotografía.	152
Imagen 5.31	Diseños conceptuales del chasis.	Desarrollada.	153
Imagen 5.32	Distribución del espacio en el rover.	Desarrollada.	154
Imagen 5.33	Perfil de aluminio.	www.metalesdiaz.com	155
Imagen 5.34	Análisis de elemento finito: deformación (Iza) von mises del esfuerzo en el material (Der).	Desarrollada.	156
Imagen 5.35	Proceso de soldadura TIG (izquierda). Soldadura en el chasis (derecha).	Fotografía.	157
Imagen 5.36	Diseño final del chasis (arriba) Estructura del chasis final manufacturada (abajo).	Fotografía.	157
Imagen 5.37	Lluvia de ideas de la excavadora.	Desarrollada.	159
Imagen 5.38	Diagrama del mecanismo de pala.	www.wikipedia.com	161
Imagen 5.39	Imagen de vehículo usando el mecanismo de Pala.	www.wikipedia.com	162
Imagen 5.40	Mecanismo de cangilones. Cadena de cangilones (izquierda), Rueda de cangilones (derecha).	www.wikipedia.com	163
Imagen 5.41	Mecanismo de cilindro giratorio.	Cortesía NASA	164
Imagen 5.42	Prototipos de la excavadora de cilindro giratorio (izq.) y excavadora de cangilones (der.).	Fotografía.	167
Imagen 5.43	Diseño conceptual de la combinación de cangilones y cilindro giratorio.	Desarrollada.	167
Imagen 5.44	Diseño conceptual de la distribución de cangilones.	Desarrollada.	169
Imagen 5.45	Diseño final de los cangilones.	Desarrollada.	170
Imagen 5.46	Calculo del área interior del cangilón.	Desarrollada.	170
Imagen 5.47	Mapa de calor con los resultados del análisis de Von Mises.	Desarrollada.	173
Imagen 5.48	Mapa de calor con los resultados del análisis de desplazamiento.	Desarrollada.	174
Imagen 5.49	Cangilones manufacturados en fibra de vidrio.	Fotografía.	174
Imagen 5.50	Cilindro final de acrílico.	Fotografía.	176
Imagen 5.51	Perfiles de aluminio. Tipo "L", Tipo "Plano", Tipo "T".	www.metalesdiaz.com	177
Imagen 5.52	Ensamble de los cangilones en el perfil "T" (superior); perfiles con cangilones manufacturados (inferior).	Fotografía.	177
Imagen 5.53	Disco de Nylamid diseñado para el exoesqueleto de la excavadora; exoesqueleto final ensamblado.	Fotografía.	178
Imagen 5.54	Diseño final de la excavadora ensamblada (superior); excavadora ensamblada (inferior).	Fotografía.	179
Imagen 5.55	Banda para subir el material.	www.festo.com	180
Imagen 5.56	Sistema de tijeras.	www.wikipedia.com	182
Imagen 5.57	Sistema de husillos.	Desarrollada.	184
Imagen 5.58	Idea gráfica del sistema de depósito.	Desarrollada.	185
Imagen 5.59	Sistema de Elevación y Depósito.	Desarrollada.	186
Imagen 5.60	Concepto del tope.	Desarrollada.	187
Imagen 5.61	Brazos maquillados.	Fotografía.	188
Imagen 5.62	Robot ensamblado, mostrando el sistema de levantamiento	Fotografía.	188
Imagen 5.63	Diagrama eléctrico del circuito de potencia.	Desarrollada.	189
Imagen 5.64	Diagrama del sistema de control.	Desarrollada.	190
Imagen 5.65	Imagen 3D de la tarjeta del microcontrolador maestro.	Desarrollada.	191
Imagen 5.66	Sensor Hokuyo y gráfica de los datos que arroja.	Fotografía.	192
Imagen 5.67	Detección de patrones y filtrado de la cámara web.	Fotografía.	192





Tablas			
Tabla 5.1	Tabla de objetivos.	Desarrollada	127
Tabla 5.2	Ventajas vs. Inconvenientes Dirección diferencial.	Desarrollada	132
Tabla 5.3	Ventajas vs Inconvenientes dirección Omniwheel.	Desarrollada	133
Tabla 5.4	Ventajas vs. Inconvenientes Cintas de desplazamiento.	Desarrollada	134
Tabla 5.5	Configuraciones de movimiento.	Desarrollada	135
Tabla 5.6	<i>Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.</i>	Desarrollada.	136
Tabla 5.7	<i>Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.</i>	Desarrollada.	136
Tabla 5.8	<i>Matriz de decisión de la configuración del sistema de tracción.</i>	Desarrollada.	137
Tabla 5.9	<i>Objetivos de las ruedas.</i>	Desarrollada.	138
Tabla 5.10	<i>Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.</i>	Desarrollada.	138
Tabla 5.11	<i>Comparación de los materiales para las ruedas.</i>	Desarrollada.	139
Tabla 5.12	<i>Material necesario para las ruedas.</i>	Desarrollada.	146
Tabla 5.13	<i>Peso de las ruedas por pieza.</i>	Desarrollada.	147
Tabla 5.14	<i>Tipos de suspensiones.</i>	Desarrollada.	149
Tabla 5.15	<i>Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.</i>	Desarrollada.	154
Tabla 5.16	<i>Comparación del material de la estructura del chasis.</i>	Desarrollada.	155
Tabla 5.17	Tiempos máximos por acción por ronda.	Desarrollada.	158
Tabla 5.18	Resultados de pruebas de ángulo crítico.	Desarrollada.	159
Tabla 5.19	Excavadoras comerciales.	Desarrollada.	160
Tabla 5.20	Ventajas vs Inconvenientes Pala.	Desarrollada.	161
Tabla 5.21	Ventajas vs Inconvenientes del mecanismo de Cangilones.	Desarrollada.	163
Tabla 5.22	Ventajas vs Inconvenientes del mecanismo de cilindro giratorio.	Desarrollada.	164
Tabla 5.23	Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.	Desarrollada.	165
Tabla 5.24	Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.	Desarrollada.	165
Tabla 5.25	Matriz de decisión de la configuración del sistema de excavación.	Desarrollada.	166
Tabla 5.26	Ventajas del nuevo concepto de excavación.	Desarrollada.	168
Tabla 5.27	Cálculos teóricos para los cangilones.	Desarrollada.	171
Tabla 5.28	Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.	Desarrollada.	172
Tabla 5.29	Comparación del material del cilindro fijo.	Desarrollada.	172
Tabla 5.30	Objetivos del cilindro.	Desarrollada.	175
Tabla 5.31	Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.	Desarrollada.	175
Tabla 5.32	Comparación del material del cilindro fijo.	Desarrollada.	175
Tabla 5.33	Ventajas vs. Inconvenientes banda.	Desarrollada.	180
Tabla 5.34	Ventajas vs inconvenientes de sistema de tijeras.	Desarrollada.	182
Tabla 5.35	Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.	Desarrollada.	182
Tabla 5.36	Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.	Desarrollada.	183
Tabla 5.36	Matriz de decisión.	Desarrollada.	185





## Capítulo VI. Diseño Final y Resultados del Producto.

<b>Imágenes</b>			
Imagen 6.1	Imagen del diseño final en CAD SolidWorks.	Desarrollada	194
Imagen 6.2	Imagen del prototipo del diseño final, en su presentación oficial en la FI UNAM.	Fotografía	195
Imagen 6.3	Extracción de ceniza volcánica del Popocatepetl y su posterior tratamiento.	Fotografía	197
Imagen 6.4	Lunarena realizada (Izq.) y pruebas de tracción en el simulante (Der.).	Fotografía	198
Imagen 6.5	Equipo LUNAMbotics en el Centro Espacial Kennedy durante la competencia.	Fotografía	200
<b>Tablas</b>			
Tabla 6.1	Resumen del diseño final.	Desarrollada	195





## Introducción

Desde tiempos inmemoriales la humanidad ha volteado a la inmensa bóveda celeste, en búsqueda de respuestas y nuevas preguntas. Siempre con nuestra naturaleza de rechazo a los límites y con esa hambre de sueños y exploración impresa en lo profundo de nuestro ADN.

¿Por qué?, ¿Qué puedo hacer?... y entonces ocurre. Justo ahí comienza la evolución, con preguntas, las respuestas llegan cuando las preguntas inspiran. En este mundo todo es posible y solo basta una decisión para cambiarlo, rompiendo moldes, cambiando esquemas, creando expectativas.

Basta con observar a nuestro alrededor, millones de ideas empapan nuestra visión del mundo actual. Cientos de productos para cubrir cientos más de necesidades, inspiración y transpiración se funden en procesos de diseño que nos regalan cada día más retos.

Como parte de estos cambios la ingeniería ha tomado papel protagónico en varias áreas y el diseño de productos también ha sufrido transformaciones, la manera de ver el diseño ya no se satisface con solucionar problemas, sino en dar valor agregado al cliente y provocar emociones en los mismos.

La impresionante transición hacia un mundo tecnológico, donde la especialización y la convergencia de múltiples disciplinas son exigidas en el desarrollo de nuevos diseños, ha permitido que la ingeniería mecatrónica tome un papel fundamental en múltiples áreas de desarrollo.

En la presente tesis el lector podrá apreciar con un ejemplo práctico de diseño de un robot móvil para excavación y exploración lunar, un modelo de diseño con ciertos matices diferentes a las metodologías tradicionales del diseño mecatrónico y con lo cual se invita a los lectores a innovar y emprender en cualquier ámbito de la vida. La estructura de la tesis se conforma por seis capítulos (Antecedentes, proceso de diseño, entendimiento de la necesidad, etapa creativa, conformación del diseño y diseño final resultados del producto), que de servirán como plataformas de continuidad para la comprensión y justificación del diseño final.

“Nunca andes por el camino trazado, pues te conducirás hacia donde los otros ya fueron”

Graham Bell





## Objetivos y Alcances

La presente tesis tiene como objetivo explicar el proceso de diseño que se utilizó para la realización de un robot lunar de excavación, para una competencia realizada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) que es la organización estadounidense que gestiona el desarrollo espacial y aeronáutico de esa nación.

Para realizar dicho objetivo, se utilizan bases proporcionadas en cátedras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) como diseño del producto, ingeniería de diseño y temas selectos de diseño. En general la metodología de diseño se basa en la línea de tendencia del departamento de ingeniería de diseño de la Facultad de Ingeniería.

El proyecto en términos generales tiene el objetivo de desarrollar un robot que represente a la UNAM en la justa universitaria y se sitúe a esta casa de estudios en un buen lugar dentro de las 50 universidades internacionales contrincantes, así como cumplir todos los lineamientos que la NASA exige como requisito mínimo para competir.

En cuanto a los alcances de la misma, se realizará hasta la etapa de fabricación de un modelo funcional completo, pasando por varias etapas que servirán para optimizar el diseño conceptual del vehículo de excavación lunar, ya que el diseño conceptual de un producto es la parte del diseño que significa un factor más importante en el éxito del producto.





## Capítulo I.

### Antecedentes





## I.I. Mecatrónica en industria aeroespacial

El sector espacial y aeroespacial ha marcado la pauta del desarrollo tecnológico, social y sobre todo de la ingeniería. Muchas de las tecnologías actuales son fruto de desarrollos en estos campos como el GPS, el teflón, las herramientas inalámbricas, código de barras, el velcro y muchos otros desarrollos que sin duda han marcado la visión de la ingeniería.

Para un país que pretenda desarrollarse plenamente le es indiscutible que deberá tener un programa de desarrollo tecnológico muy remarcado, el sector espacial es un sector a desarrollar con grandes oportunidades, centrándonos en México, con la creación en el año 2010 de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) México comienza a incursionar en el desarrollo de la ingeniería aeroespacial ya con una institución gubernamental regente.

(Duarte, C., 2013) El tener un programa adecuado de investigación espacial permite tener potencialidades como:

- Transmisión de señales desde satélites a diferentes puntos de la Tierra para comunicaciones, posicionamiento y navegación.
- Mejoramiento de diversos tipos de seguridad.
- Visión de la Tierra en su conjunto, para el monitoreo de actividades físicas, naturales y humanas en regiones amplias y en una base global.
- Observación y exploración del universo para expandir el conocimiento científico.
- Uso del ambiente de microgravedad para investigación y producción.
- Transporte desde y hacia el medio ambiente espacial.

México ha tenido ya algunas actividades experimentales, pese a la falta de recursos para el desarrollo de los mismos, en la década de los 50's y 60's la Universidad Autónoma de San Luis Potosí lanzó sus propios cohetes espaciales en Cabo Tuna, en los 70's se creó la Comisión Nacional del Espacio Exterior. Para la década de los 80's se lanzó el sistema "Morelos" de satélites contratado por Hughes y NASA.

Ya para la década de los 90's en México se puso en marcha el sistema de satélites "Solidaridad", contratado con European Space Agency (ESA) y Hughes, desarrollando el microsatélite SATEX-1 y los microsatélites UNAMSAT diseñados en la UNAM. La industria aeroespacial en México apunta notablemente más al área de telecomunicaciones, pero eso no implica que no haya otros desarrollos ni que la industria no tenga potencial en otras áreas.





(Duarte, C., 2013) Actualmente en México se tienen registradas 266 empresas distribuidas en 18 estados y generando más de 32,000 empleos.



Imagen 1.1. Distribución de la industria aeroespacial en México. (Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología y Federación Mexicana de Industria Aeroespacial, 2012.)

La Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología informa que en el año 2012, de esa industria aproximadamente el giro de las corporaciones es:

- 79% en manufactura
- 11% en mantenimiento, reparaciones y operaciones.
- 10% ingeniería y diseño.

Esto genera un margen de exportaciones que en el año 2012 sumo alrededor de 5,000 millones de dólares.

### INDUSTRIA AEROESPACIAL

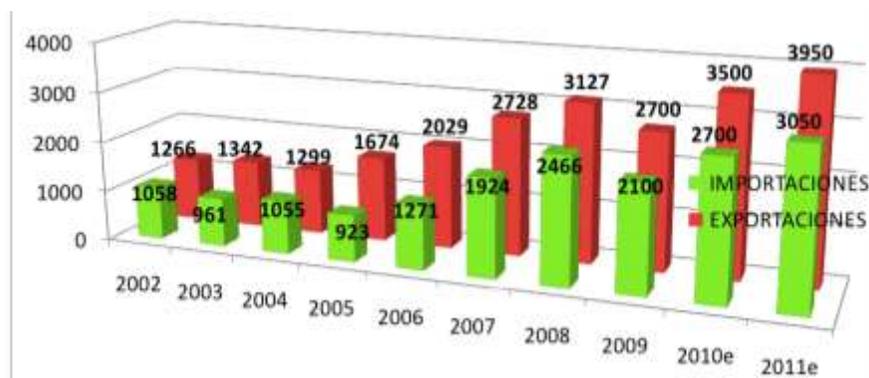


Imagen 1.2. Exportaciones e Importaciones Industria Aeroespacial (Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología y Federación Mexicana de Industria Aeroespacial, 2012.)





(Duarte, C., 2013) Como se puede apreciar en la información anterior México es un país con una importante industria aeroespacial, sin embargo, la mayoría de la industria es de bajo valor agregado:

- Maquila.
- Servicios de reparación.
- Servicios de mantenimiento.

Esto representa una oportunidad para generar industrias de alto valor agregado, para lo cual se hacen presente los sistemas mecatrónicos y el diseño mecatrónico.

El espacio está aquí para quedarse y la ingeniería en México en sectores espaciales no puede seguir estando rezagada. Por lo cual la incursión de la ingeniería mecatrónica en los desarrollos tecnológicos es un gran nicho de negocio y de oportunidad de progreso.

Según la Agencia Espacial Mexicana (Duarte, C., 2013), la visión para el año 2030 para la industria aeroespacial en México se pretende:

- El espacio como gran habilitador de soluciones a necesidades sociales (seguridad, conectividad, desastres, medio ambiente, etc.)
- El espacio como oportunidad de desarrollo industrial
- Satélites de comunicaciones y percepción remota con alta integración nacional.
- Instrumentos espaciales para investigación científica: en satélites y experimentación en microgravedad.
- Infraestructura de transporte suborbital
- Participación en proyectos espaciales internacionales
- Liderazgo espacial en América Latina
- "Apropiación" del espacio por la sociedad mexicana

Y las áreas de oportunidad para el desarrollo de la ingeniería en México:

- Modelado y simulación de sistemas.
- Diseño por computadora.
- Desarrollo de protocolos de comunicación.
- Reconocimiento de patrones y procesamiento de datos.
- Robótica espacial.
- Tecnología de materiales.
- Dinámica aeroespacial y sistemas de control.
- Simulación de vuelos e instrumentación virtual.
- Nuevos sistemas de propulsión.

Como se puede observar la relación entre la ingeniería mecatrónica y la industria aeroespacial es muy estrecha y cada vez se requerirán más una de la otra para lograr un progreso mutuo.





## I.III. Exploración Lunar

“That’s one small step for a man, one giant leap for mankind” esas son las palabras que el astronauta norteamericano Neil Armstrong pronunciaba después de haber tocado por primera vez la superficie lunar. Y con esta histórica frase “Este es un pequeño paso para el hombre, pero un gran salto para la humanidad” coronaba el trabajo de decenas de generaciones de hombres que soñaron con conquistar un cuerpo celeste fuera de nuestro planeta de origen.

La Luna, por ser el cuerpo celeste más cercano a nuestro planeta y claramente visible, fue el primer cuerpo que pudo observar la humanidad, desde hacía ya cientos de años los primeros astrónomos y filósofos de Grecia, Babilonia y Egipto dedicaban noches completas a analizar este astro. Con la invención del telescopio por Hans Lipperhey en 1608 se pudo realizar una observación mucho más detallada de la Luna. Con ayuda de estos telescopios astrónomos como Galileo Galilei no solo pudo observar a detalle la superficie lunar, sino que se pudo descubrir las cuatro lunas más grandes de Júpiter: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto (Ahora llamadas satélites Galileanos).

Posteriormente y gracias a la invaluable curiosidad y sueños de la humanidad se consiguió el siguiente salto que impulsaría el conocimiento extraterrestre, este salto fue posible gracias al desarrollo de los cohetes. Inicialmente los cohetes solo fueron construidos con fines militares. Durante la segunda guerra mundial con los famosos cohetes infames V2 y posteriormente durante la histórica guerra fría con los misiles de balística Inter-continentales (ICBMs) capaces de transportar una ojiva nuclear a través de los océanos. Estos misiles balísticos intercontinentales sentaron las bases para los cohetes espaciales. Incluso hoy en día empresas como Orbital Sciences Corporation utilizan etapas de estos misiles para lanzar satélites a la órbita terrestre.

Ya para la década de los 50’s, se utilizaron los primeros cohetes espaciales para lanzar el satélite soviético Sputnik que sería el primero en circular en la órbita de la Tierra, posteriormente el satélite norteamericano Explorer 1 que descubrió el cinturón de radiación Van Allen. Además de que estos cohetes permitieron la observación del planeta tierra y sus condiciones atmosféricas y de radiaciones electromagnéticas (Carter, McCain, 1993).

Una vez que se aprendió y se dominó el lanzamiento de cohetes a la órbita terrestre, rápidamente se descubrió que la forma más fácil de realizar observaciones a la superficie terrestre es utilizando la técnica de sobrevuelo. Esto se consigue mediante la adquisición de fotografías con zoom desde más allá de la órbita lunar. Lo cual permitió fotografías con





mayor facilidad que tratar de orbitar la Luna y también permitió la adquisición de fotografías del lado oscuro de la Luna. Ya para el año de 1959 la nave matriz soviética Luna 3 (Que fue la tercera nave enviada hacia la Luna) regreso de su misión y regreso con imágenes nunca antes vistas de la cara oculta de la Luna.

Sin embargo esta técnica de sobrevuelo proporciona un beneficio científico limitado, porque las naves espaciales poseen poco tiempo para investigar la superficie, ya que se alejan más y más allá de la Luna. Otro tipo de nave desarrollada que puede entrar en la categoría de “corta-vida” son las de tipo “impactor”. Las naves “impactor” toman fotografías a medida que se acercan a la superficie. Por ejemplo, en 1962 la nave estadounidense Ranger 4 transmitió imágenes de la superficie lunar por 10 minutos antes de estrellarse contra la Luna y a medida que estas naves de corta vida se utilizaban se continuaba con el desarrollo de la tecnología y la mecánica de los denominados orbitadores lunares.

Este tipo de naves orbitadores, tienen la capacidad de orbitar el satélite terrestre por un periodo de tiempo más largo y a una distancia mucho más cercana de la superficie, lo que permitió una mejor investigación. Para 1966 la Luna, nuestro satélite natural ya contaba con un satélite artificial, la nave soviética “Luna 10”, unos meses antes la nave predecesora “Luna 9” había logrado el primer aterrizaje suave en la luna y la transmisión de las primeras imágenes desde la superficie de la Luna.

El aterrizaje de “Luna 9” a la superficie lunar abrió una serie de brechas de investigación relacionados, denominados investigación en sitio. Gracias a los módulos lunares que permitían tener contacto con la superficie lunar se logró obtener fotografías microscópicas e implementar instrumentación en la superficie y más tarde en el subsuelo lunar.

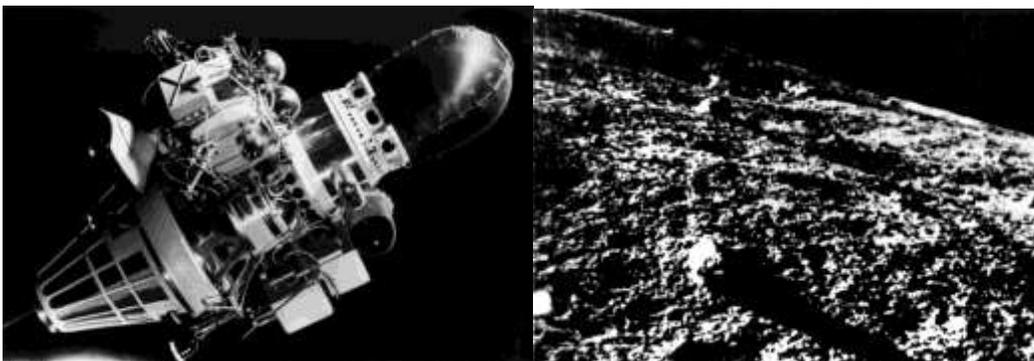


Imagen 1.3. Misión Soviética “Luna 9” y primera imagen captada desde superficie lunar (National Space Science, Data Center, NASA).

La tercera nave espacial en tener éxito al aterrizar en la superficie lunar fue la “Luna 13”, esta fue equipada con brazos con resortes, uno de los





cuales estaba equipado con un penetrómetro diseñado para medir la fuerza necesaria para penetrar la superficie (conocido como regolito lunar por su composición). Esta fue la primera medición geológica de la superficie lunar. Unos meses después la nave estadounidense "Surveyor 3" utilizó un dispositivo similar a una cuchara para cavar el regolito lunar y utilizar los datos de la excavación para determinar las propiedades del suelo lunar.

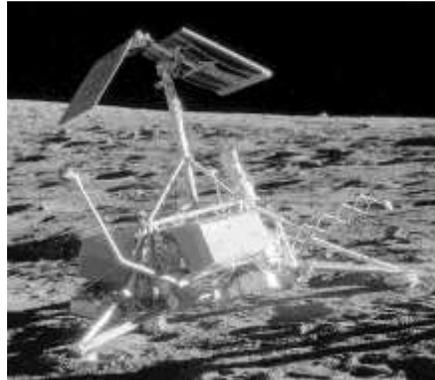


Imagen 1.4. Misión "Surveyor 3" realizó la primera excavación lunar (National Space Science, Data Center, NASA).

Por supuesto estos instrumentos tenían la limitación de un número determinados de pruebas, por lo cual el siguiente paso fue la adquisición de muestras y traerlos a laboratorios terrestres para mayores pruebas con múltiples instrumentos.

Los programas Apolo y Luna fueron los principales programas de exploración emprendidos por los Estados Unidos y la Unión Soviética respectivamente. Durante el programa Apolo 12 astronautas lograron caminar sobre la superficie de la Luna y regresar sanos y salvos a la Tierra. De las 7 misiones del Apolo (de la 11 a la 17) solo el Apolo 13 nunca llegó a la superficie de la Luna (la misión se denominó un fracaso exitoso). Durante las misiones Apolo se tuvieron muchas tareas, estos incluyeron tomas de fotografía, muestras de regolito lunar e implementación de instrumentos de perforación, de hecho, el agujero más profundo de la luna (292 cm) fue perforado durante la misión Apolo 17 (Heiken et al., 1991).

Simultáneamente el programa espacial soviético Luna desplego vehículos robóticos (Lunokhod 1 y 2), así como módulos de aterrizaje. Los dos rovers (Un rover es un vehículo diseñado para desplazarse a través de la superficie de un planeta o cuerpo celeste) Lunokhod fueron controlados a distancia y han sido los únicos dos laboratorios móviles automáticos que han explorado la Luna guiados por control remoto (Heiken et al., 1991).

El Lunokhod 1 fue transportado en la sonda "Luna 17" en 1970, el robot poseía ocho ruedas y un peso de 756 kg. Este robot exploró la superficie lunar por casi un año de actividad transmitiendo más de 20.000 imágenes y 200 vistas panorámicas de una zona de más de 80.000 metros cuadrados.





Logrórealizar cerca de 500 pruebas experimentales sobre el suelo lunar, en las cuales analizó las propiedades físicas del suelo en 500 puntos y las propiedades químicas en 25 puntos.

También el robot contaba con un sistema reflector-laser que hoy en día se encuentra en operación utilizado para la telemetría en distancias de la tierra a la Luna.

El robot Lunokhod 2 alunizó en 1973 a bordo de la sonda “Luna 21”, este robot remodelado y mejorado con respecto a su antecesor pesaba 838 kg y consiguió explorar 37km en un lapso de cuatro meses. En esta misión se realizaron nuevamente pruebas a la superficie lunar y de radiación que consiguió enviar con más de 80.000 imágenes y 86 vistas panorámicas.

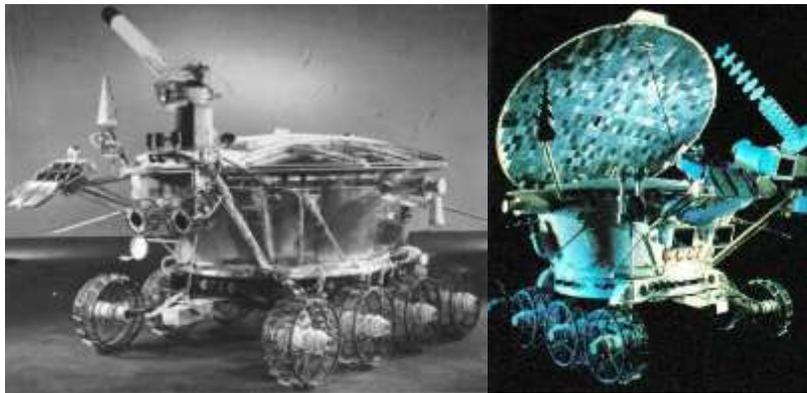


Imagen 1.5. Primeros Rovers de exploración lunar teledirigidos Lunokhod 1 (Izq.) y Lunokhod 2 (Der.).

Otro gran logro que obtuvo el programa espacial soviético y que no se han repetido desde entonces fueron las misiones con retorno de muestras. Las sondas Luna 16, 20 y 24 consiguieron perforar el subsuelo del regolito lunar y regresar a la Tierra. Las dos primeras realizando una simulación de adquisición de regolito a poca profundidad, mientras que la tercera realizó una perforación de 160 cm de profundidad y regreso con 170 gramos de regolito. Cabe resaltar que 3 gramos de estos fueron intercambiados por su contraparte, la NASA por tres gramos obtenidos por astronautas en la misión Apolo.

El análisis de las muestras lunares proporciono gran información, revelo que el regolito lunar contiene una gran cantidad de elementos que pueden ser empleados para la supervivencia humana en la Luna. Por ejemplo, el regolito contiene oxígeno encerrado en un mineral llamado Ilmenita (Gibson, Knudsen, 1985).

Uno de los más recientes descubrimientos realizados por la misión de observación de cráteres lunares y detección por satélite en el 2009 es la presencia de grandes depósitos de hidrógeno, lo que sugiere la presencia de grandes cantidades de hielo de agua en la Luna. Estos depósitos de agua podrían ser un recurso que permita, no solo auxiliar a los humanos a





resistir en la Luna, sino también para apoyar la exploración humana de otros cuerpos del Sistema Solar. De hecho, si tuviéramos que extraer el agua y convertirla en hidrógeno y oxígeno (es decir, el combustible de cohetes y oxidante, respectivamente) podríamos recargar los tanques de cohetes para el viaje de vuelta a casa o viajar a otros destinos planetarios (Calaprete, 2010).

Otro avance, el más reciente para el 2014 es el alunizaje de un robot, esta vez de origen Chino, el denominado “Conejo de jade”, Este robot es el último, después de 40 años del ya mencionado “Lunokhod 2”. Este robot de seis ruedas lleva una carga más sofisticada que incluye un radar con la capacidad de penetrar el suelo lunar y realizar mapeos de la corteza y sus capas inferiores.

Este robot pesa solo 120 kg y puede subir pendientes de hasta 30° de inclinación y moverse a una velocidad de hasta 200 metros por hora. Su fuente de energía principal es de paneles solares, pero además cuenta con unidades de calor de radioisótopos que contienen plutonio para mantener la temperatura constante del robot. Tras esta misión la Administración Espacial Nacional China se prepara para traer muestras lunares en el 2017 y está sentando las bases para futuras misiones robóticas y posiblemente tripuladas en el año 2020.



Imagen 1.6. Robot de exploración lunar chino “Conejo de Jade”

El sector empresarial también está muy interesado en la exploración prioritariamente en los depósitos de agua (Blair, Zacharias, 2010). Sin duda alguna se debe a que el lanzamiento de cualquier misión o sonda desde la superficie lunar, gracias a a que la gravedad es mucho menor, implica un menor costo. Sin embargo actualmente se está desarrollando la llamada tecnología de uso de recursos in situ, que implica un completo desarrollo de la minería y procesamiento del agua en el regolito lunar. ¿En cuánto tiempo se va a desarrollar esta tecnología? Esto aún se desconoce, no





obstante, es solo cuestión de tiempo para que los avances tecnológicos permitan que se dé una explotación de recursos lunar.

Si se realiza una revisión del pasado en las misiones espaciales, una cosa queda clara, nuestra tecnología y niveles de ingeniería han ido mejorando de manera constante y la tasa de éxito de aterrizar en la Luna, paso de 0% en 1958 a un 100% desde 1990. Estos datos son muy alentadores mientras nos preparamos para la próxima década de exploración. Décadas pasadas de exploración nos dieron el conocimiento suficiente para tomar la decisión de que vale la pena seguir realizando exploración lunar.

La Luna nos ofrece una gran cantidad de recursos que podrían permitir la supervivencia humana más allá de la Tierra. El tema de la utilización de recursos in situ es muy amplio y abarca todos los temas sobre asegurar la presencia humana sostenible en la Luna (y otros planetas) e incluye la minería y el procesamiento de los recursos locales. El objetivo de la siguiente sección es sobre las tecnologías de minería y excavación que permitan la exploración humana de la Luna. Se presentan una serie de ejemplos de pasado, presente y tecnologías de excavación lunar (Blair, Zacharias, 2010).





## I.III. Ingeniería en condiciones lunares

En las misiones lunares se ha descubierto que el regolito lunar, combinado con el vacío resulta ser muy abrasivo para los equipos que trabajan en el ambiente lunar aunado a los grandes cambios entre alta y baja temperatura. Por ejemplo, en una de las misiones Apolo el cable de las ruedas malladas del vehículo de exploración lunar se rompía ocasionando que polvo lunar se introdujera en los empaques de los trajes espaciales de los astronautas, lo que ocasionó problemas con el sellado. Esto provocaba que cada vez que realizaban descenso el polvo lunar cubría el traje inicialmente blanco (una superficie blanca tiene una mayor capacidad de reflexión que una oscura) lo cual reducía su capacidad de reflexión derivando en que se sobrecalentara el traje y los sistemas de enfriamiento no pudieran con la temperatura alcanzada.

Con el fin de desarrollar un enfoque correcto para tratar con problemas lunares, primero se tiene que entender a fondo el entorno lunar y sus implicaciones. Sólo entonces, podemos desarrollar las tecnologías y hardware que permitirán al ser humano sobrevivir en aquel entorno o desarrollar presencia robótica en la Luna, no sólo por un par de días, sino durante meses y años.

### I.IIII.I El efecto de la temperatura.

A diferencia de la Tierra las características ambientales térmicas son muy diferentes a las de nuestro satélite natural, la temperatura terrestre se ve influenciada térmicamente por la radiación solar, por la energía geotérmica y por la atmósfera terrestre, en cambio, la temperatura lunar se ve influenciada casi en su totalidad por la radiación solar y en menor medida por la energía geotérmica. Durante el día lunar cuya duración aproximada es de dos semanas se pueden alcanzar temperaturas de 123°C. Sin embargo, durante la noche lunar que igualmente dura dos semanas, las temperaturas de la superficie descienden alrededor de los -153°C (Paige et al. 2010). Mas sin en cambio la temperatura del subsuelo lunar, a causa de la calefacción geotérmica y de la baja conductividad térmica del regolito lunar y el vacío, no presenta grandes fluctuaciones de temperatura. De hecho, la temperatura de solo un metro por debajo de la superficie es casi constante a -19°C (Paige et al. 2010).

Estas grandes fluctuaciones de temperatura en la superficie lunar se requieren considerar en el diseño de rovers e instrumental para este astro, una complicada gestión térmica. Durante un día, el calor generado por el hardware (por ejemplo, los motores eléctricos, generadores de tracción a las ruedas del rover) necesitan grandes radiadores, mientras que durante





la noche, el hardware (y en particular, los componentes electrónicos) deben mantenerse calientes, lo que requiere una fuente de energía (baterías o sistemas basados en energía nuclear). Cuando la temperatura es muy baja, los nodos de soldadura dentro de la electrónica a bordo pueden romperse debido a la expansión térmica desigual entre la propia soldadura del metal y la oblea de silicio. Así como también, muchos elementos basados en silicio constituyen otros problemas en funcionamiento a bajas temperaturas. Esta gestión térmica en la ingeniería espacial es muy costosa, por lo que actualmente el sector privado y académico desarrollan una nueva generación de elementos electrónicos de Silicio-Germanio (Si-Ge) que constituirán dispositivos de alta gama de temperaturas (Olvera-Cervantes et al. 2008).

En los robots espaciales actuales se desarrolla y emplea una denominada "warm box" o caja caliente para contener todos los elementos electrónicos. Estas cajas se mantienen calientes con el empleo de RHU (Radioisotope Heater Units) que son dispositivos de unos 3cm y 40 gramos que proporcionan energía térmica, derivado de la descomposición del elemento radioactivo plutonio 238. Otra manera de mantener a los elementos electrónicos funcionando podría ser el empleo de un Generador Térmico de Radioisótopos RTG (Radioisotope Thermal Generator) que igualmente aprovecha la descomposición del elemento plutonio 238 para generar calor, que a su vez se aprovecha en forma de electricidad a partir de una matriz de termopares.

Un enfoque alternativo para la supervivencia a la noche lunar es el empleo de "Wadi térmicos" (wadi es un vocablo árabe utilizado para denominar los cauces secos o estacionales de los ríos o valles en regiones cálidas y áridas), este concepto propone el almacenamiento de energía solar en forma de calor en una masa térmica para su posterior uso (Wegeng et al. 2007; Sacksteder et al. 2010; Balasubramaniam et al. 2011). El wadi térmico (Imagen 1.7) utiliza una masa térmica hecha de regolito procesado para aumentar su difusividad térmica (valor obtenido de la conductividad térmica de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad y la capacidad calorífica específica del mismo, expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico), esta difusividad térmica alcanza aproximadamente 100 veces más que la roca terrestre. Este incremento, conseguido por la sinterización o fusión del regolito, permite que el calor superficial recibido por el sol penetre más allá de los pocos centímetros que usualmente alcanza durante las dos semanas de día lunar y de esta manera almacene energía aprovechable.

Por lo cual la adquisición de calor en los días lunares se puede conseguir con un sencillo sistema de reflexión solar con seguimiento, como el empleado actualmente en algunos paneles solares pero en función de la latitud lunar. Durante la noche lunar, la implementación de este denominado "paraguas" reflectante ayuda a reducir las pérdidas de calor por radiación al espacio manteniendo la temperatura del wadi arriba de los 0° C durante la noche.





La utilidad de la energía térmica acumulada podría ser sustancial. Estudios recientes de la gestión térmica de los rovers lunares (Thornton et al 2010 ;Jones et al 2011) encontraron que en las dos semanas de oscuridad lunar hay fugas radioactivas en las cajas de calor que se acumulan de manera que se reduce la vida del rover, por lo que es ideal que la protección del rover sea debido al aislamiento térmico y a energía externa almacenada. Además como las dimensiones de los rovers disminuyen, la masa que se requiere para mantener la temperatura sobrepasa la capacidad de carga útil del vehículo. Este concepto “Wadi térmico” puede resolver con eficacia el reto de la supervivencia térmica durante la noche con un simple elemento de infraestructura en la superficie lunar. Por desgracia, no todos los componentes se pueden mantener dentro de un rango de temperatura específico. Las ruedas del vehículo o el cangilón (cuchara) de la excavadora experimentarán estas altas y bajas temperaturas extremas sin sufrir daños. Por lo tanto, estos componentes requieren una minuciosa selección de los materiales y un diseño adecuado. Algunos de los aspectos críticos que requieren ser considerados para el diseño de estos sistemas son la lubricación, expansión térmica y la protección contra el regolito lunar.

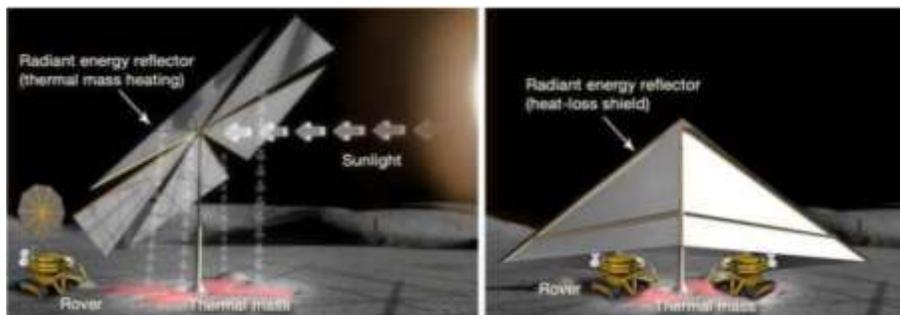


Imagen 1.7. Técnica “Wadis térmico”, el regolito sirve como una masa térmica para almacenar energía reflejada durante el día (izquierda), con la ayuda de un paraguas reflejante, el calor almacenado en la masa térmica puede mantener a una temperatura estable los elementos resguardados durante la noche lunar (Gayle Dibiasio, NASA Glenn Research Center).

La densidad de los lubricantes aumenta a medida que se reduce la temperatura. A cierta temperatura, los lubricantes simplemente se congelan. En la Luna, todos los lubricantes a base de fluidos se congelarían. De ahí que una posible solución podría ser un lubricante seco o materiales de bajo coeficiente de fricción como el teflón (PTFE).

La expansión térmica es importante cuando dos materiales de diferente coeficiente de expansión térmica están en contacto uno con el otro. Con los cambios de temperatura, los dos materiales se expandirían o comprimirían a ritmos diferentes, lo que podría generar tensiones internas en el área de contacto. Estas tensiones podrían provocar la fractura de algún material y así la avería del elemento.

Los materiales con sistema cristalino cúbico (la unidad de la celda del material tiene forma de cubo) que poseen estructura de red, tales como el acero se someten a la transición de dúctil a frágil a medida que desciende





la temperatura. A este intervalo se le conoce como la temperatura de transición frágil-dúctil (DBTT, Ductile to Brittle Transition Temperature). Algunos materiales, como el aluminio, titanio y materiales compuestos tienen una temperatura de transición superior por lo que resultan una mejor elección para el ambiente lunar frío.

### **I.III.II Vacío**

El alto vacío en la superficie lunar ocasiona una serie de problemáticas. Por ejemplo, muchos materiales como el plástico y el caucho, pierden flexibilidad y se vuelven quebradizos debido a la liberación de gases. Los sistemas de enfriamiento que se suelen utilizar en motores y computadoras solo pueden efectuarse a través de una radiación ineficaz ya que la conducción y convección son inexistentes. En la Tierra, la superficie de todos los materiales están recubiertos por una fina capa de óxidos y humedad. En la Luna, estas capas serían rápidamente perdidas pudiendo provocar un cambio en las propiedades de fricción sobre la superficie (Zacny, K, 2011a).

La ionización fotoeléctrica provocada por los rayos ultravioletas y el bombardeo de iones y electrones en las cargas de viento solar, provocan que el regolito lunar posea cargas eléctricas. Dado que estas cargas en el vacío no se pueden disipar tan fácilmente, la carga neta acumulada entre los componentes puede llegar a ser de varios volts positivos en las zonas iluminadas por el Sol y negativos en las zonas de obscuridad. Esto, puede causar fuerzas electrostáticas que contribuyen a la adherencia y cohesión del regolito lunar ultra fino a los componentes. Además, la acumulación de carga, puede ocasionar daños en los circuitos electrónicos (Zacny, K, 2011a).

### **I.III.III Comunicaciones**

La distancia de la Tierra a la Luna es relativamente corta, del orden de 382.500 kilómetros. De ahí que se necesita alrededor de 3 segundos para una comunicación de ida y vuelta. Los cortos retrasos de las comunicaciones hacen que la teleoperación desde la Tierra sea bastante viable. De hecho los rovers soviéticos Lunokhod 1 y 2 fueron controlados de manera remota en la Luna desde la Tierra. Dos equipos de cinco hombres usaron las imágenes proporcionadas por dos cámaras de baja resolución montadas en la parte delantera del vehículo para proporcionar los comandos al rover. Las cámaras enviaban cuadros individuales en intervalos que variaban de siete a veinte segundos (Zacny, K, 2011a).





#### I.III.IV Regolito lunar

John Young, comandante de la misión Apolo 16, comentó que “El polvo es la principal preocupación para regresar a la Luna”. Otros astronautas del Apolo hicieron declaraciones similares, relacionadas a que el polvo lunar implica grandes desafíos para todas las actividades que requieren el funcionamiento de dispositivos mecánicos (Wagner, 2006). Gene Cernan, comandante de la misión espacial Apolo 17 señaló: “Justo en medio o al final de la tercera actividad extra vehicular, las cosas simples, como el cerrado de bolsas y el bloque de compuertas del rover comenzaron no solo a fallar, sino a dejar de funcionar... tienes que vivir con él, es una lucha continua contra el polvo, tanto fuera como dentro de la nave espacial”.

Un análisis detallado de los datos recabados en la misión Apolo ayudó a categorizar los efectos adversos del polvo lunar en las siguientes nueve categorías: pérdida de visibilidad, lecturas falsas del instrumental, recubrimiento de polvo y contaminación, pérdida de tracción, obstrucción en los mecanismos, abrasión, problemas de control térmico, problemas de enfoque y la inhalación e irritación al contacto humano (Gaier, 2005). De estos nueve, todos excepto para la inhalación e irritación al contacto humano, tienen que ser resueltos para lograr desarrollar un sistema de excavación lunar que tenga un periodo de vida que cumpla con su objetivo. Incluso un simple dispositivo, como un anillo de fijación para una pala era difícil de operar después de una primera actividad extra vehicular. Además, parece que el fin de las operaciones del rover Lunokhod 2 fue causado por el polvo lunar. El 9 de mayo de 1973, la tapa abierta del rover durante una travesía en una zanja estrecha tocó una de las paredes de esta zanja ocasionando que se cubriera de polvo lunar, alcanzando los radiadores, mientras que la tapa estaba cerrada por la noche lunar. El próximo día lunar, cuando el rover se reactivó y comenzó a realizar sus actividades, los componentes electrónicos comenzaron a calentarse. Como el polvo lunar es un gran aislante, la temperatura de los circuitos electrónicos se elevó hasta que finalmente el rover fracasó (Chaikin 2004).

Los astronautas también observaron que algunos mecanismos de enganche, como el Velcro, no funcionaron después de que fueron cubiertos de polvo.

El regolito lunar posee características muy abrasivas (las partículas pueden rayar los metales duros), adhesivas (las partículas se adhieren y forman capas en la superficie), y cohesionado (las partículas se adhieren entre sí) debido al vacío y a la radiación que se presentaron durante su formación. En la Tierra las partículas tienden a ser redondeadas por el efecto del agua y del viento. Como la Luna carece de estos elementos, las partículas lunares son extremadamente irregulares. El regolito lunar también está compuesto por partículas denominadas aglutinas (Imagen 1.8), estas partículas se forman durante los impactos de meteoritos y se componen de vidrio fundido y fragmentos de roca. En algunas zonas lunares, este tipo de material llega a suponer el 60% del volumen del suelo lunar (Heiken et al. 1991).





Por lo tanto, con el fin de sobrevivir en la superficie lunar, el hardware tiene que ser tolerante contra el polvo. Hay grupos dentro de Estados Unidos que están buscando la manera de reproducir con precisión el regolito lunar para desarrollar tecnologías tolerantes al polvo. NASA Marshall Space Flight Center, junto con United States Geological Survey (USGS) ha estado desarrollando simulador de regolito, mientras que Orbital Technologies Corporation (Orbitec) ha estado desarrollando comercialmente simulador de regolito. Probar el hardware de los robots lunares en este tipo de simuladores y también en cámaras de vacío es de suma importancia. Por ejemplo, con las pruebas de vacío y polvo realizadas a dispositivos mecánicos y eléctricos desarrollados por la empresa Honeybee Robotics, mostró un aumento significativo en la tracción y resistencia a la abrasión (Herman et al., 2011).

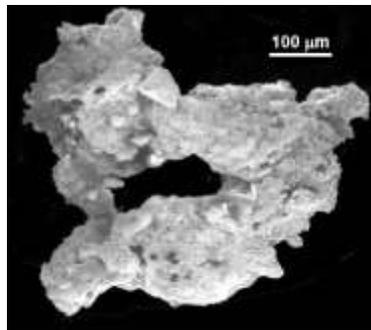


Imagen 1.8. Aglutina lunar, partículas de vidrio fundido con roca formadas durante los impactos de asteroides (David McKay, NASA/JSC).

### I.III.V Gravedad lunar

La gravedad en la Luna es un sexto de la de la Tierra y eso significa que todo pesa seis veces menos. Por ejemplo, una persona de 60 kg con un peso de aproximadamente 600N en la Tierra, pesaría solo 100N en la Luna. Alternativamente, para aplicar la misma fuerza vertical, la masa de un objeto en la Luna tiene que ser seis veces mayor. Esta gran reducción de la aceleración de la gravedad tiene profundas consecuencias en la elección de los métodos de excavación.

Las excavadoras terrestres son masivas y utilizan la fuerza bruta para avanzar a través de la tierra. En la Luna, para generar las mismas fuerzas de excavación, la excavadora tendría que ser hasta seis veces más pesada. El tamaño de la pala de excavación en realidad hace una gran diferencia en el factor de escala de gravedad, por lo tanto, la escala de fuerzas no es simple. Llevar una excavadora muy pesada a la Luna, no sólo sería muy costoso, también puede no ser factible. Esto se debe a que ya no se tiene un cohete capaz de lanzar grandes cargas útiles. La capacidad de lanzamiento del cohete más grande disponible, Delta IV Heavy es cuatro veces menor que la del Apollo Saturn V durante los años 1960 y 1970 (Zacny et al., 2010b).





## I.V. Rovers y robots móviles

Un Rover o también llamado astromóvil, es un vehículo de exploración espacial diseñado para moverse a través de la superficie de un planeta u otro cuerpo celeste que no es la Tierra. Algunos rovers han sido diseñados para el transporte de los miembros de una tripulación de vuelo espacial humano, mientras que otros han sido parcial o totalmente robots autónomos.

Los rovers tienen varias ventajas sobre las sondas fijas: examinan más territorio y pueden ser dirigidos para examinar características interesantes. También permite avanzar en el conocimiento de cómo llevar a cabo funciones remotas de control del vehículo robótico que es usualmente semiautónomo.

Sus ventajas sobre naves espaciales en órbita son que pueden hacer observaciones a un nivel microscópico y pueden llevar a cabo experimentación física. Algunas desventajas de los rovers en comparación con los orbitadores es la mayor probabilidad de fracaso, debido a la necesidad de aterrizaje y otros riesgos inherentes, además que se limitan a un área pequeña alrededor de un sitio de aterrizaje que sólo se puede prever aproximadamente. Los rovers llegan al lugar de exploración gracias a naves espaciales y se utilizan en condiciones muy distintas a las de la Tierra, lo que hace que existan grandes exigencias en la calidad del diseño especializado. Tal como el movimiento de la rueda y partes robóticas.

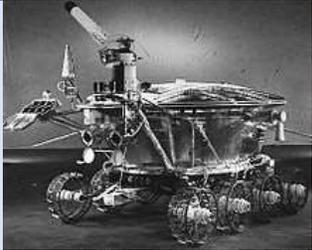
Los rovers tienen que soportar altos niveles de aceleración, altas y bajas temperaturas, la presión, el polvo, la corrosión, los rayos cósmicos, y que puedan trabajar sin ninguna reparación durante un periodo de tiempo necesario. Los rovers se suelen transportar en una nave espacial, por lo que deben de ser muy compactos y de fácil despliegue, ya que las naves tienen una capacidad limitada, y tienen que ser desplegados.

Estos vehículos se posan en los cuerpos celestes lejos de la Tierra, como los Mars Exploration Rovers, no se pueden controlar de forma remota en tiempo real, ya que la velocidad a la que viajan las señales de radio son demasiado lentas para la comunicación en tiempo real o casi en tiempo real. Por ejemplo, el envío de una señal de Marte a la Tierra tarda entre 3 y 21 minutos. Estos rovers son por lo tanto capaces de funcionar de manera autónoma, con poca asistencia de control de tierra en cuanto a navegación y adquisición de datos se refiere, a pesar de que todavía requieren la intervención humana para la identificación de objetivos prometedores y determinar la forma de posicionarse para maximizar la energía solar. Dando al rover algunas capacidades visuales de identificación rudimentaria para hacer distinciones simples que pueden permitir a los ingenieros acelerar el reconocimiento.





La siguiente tabla muestra el proceso de evolución de los rovers a través de la historia (NASA Data Center, 2013).

Nombre	Fotografía	Tiempo de Operación	Distancia Recorrida	Características
Lunokhod 1		Nov (1970) - Sep(1971)	10.5 km	Primer robot a control remoto en la Luna.
Vehículo Lunar todo terreno Apolo XV, XVI y XVII		Apolo XV (1971) XVI (1972) XVII (1972)	XV (27.8km) XVI (26.7km) XVII (35.74km)	Vehículos de exploración control humano.
Lunokhod 2		Ene(1973) - May(1973)	42 km	Robot a control remoto en la Luna.
Sojourner		Mar(1997) - Sep(1997)	100 m	Primer robot a control remoto en Marte
Spirit y Opportunity		Spirit: Ene(2004) - Mar(2010) Opportunity: Ene(2004) - Actualidad	Spirit: 7.7km Opportunity: 38.73 km	Primer robot a control remoto en Marte que realiza excavación con sus ruedas.





Proceso de diseño de rover para minería lunar. NASA Lunabotics Mining Competition

Curiosity		Ago(2012) - Actualidad	4.6 km	Primer robot a control remoto que incluye un complejo laboratorio de experimentación
Yutu		Dic(2013) - Actualidad	Desconocida	Primer robot a control remoto creado por China

Tabla 1.1. Evolución de los rover espaciales (Basada en información de NASA Data Center).

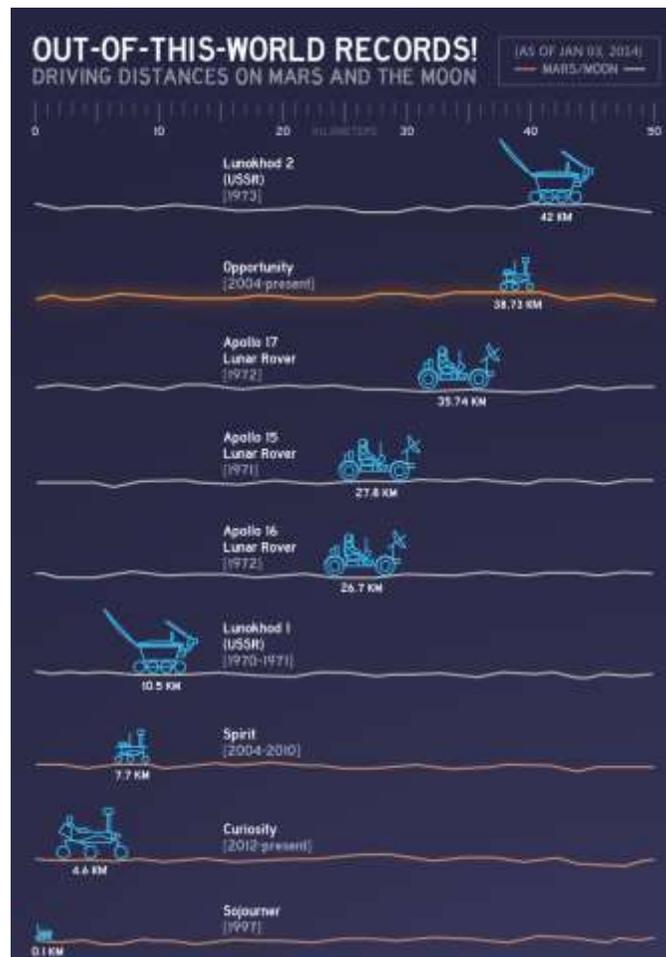


Imagen 1.9. Distancias de exploración extraterrestre (Torsch con información publicada por la NASA).





Desde el punto de vista de la robótica, se requiere definir exactamente lo que es un robot. Para ello hay múltiples definiciones que varían de acuerdo al tiempo y al lugar, una de las definiciones más aceptadas es la propuesta por la Organización Internacional de Estándares (ISO), que define robot como: “Manipulador multipropósito reprogramable y controlado automáticamente en tres o más ejes”.

Así como esta definición de la ISO, la mayoría de las definiciones coinciden en relacionar a un robot con un manipulador, sin embargo una definición mucho más incluyente es la establecida por la Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA): “Los robots son dispositivos capaces de moverse de modo flexible análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, permitiendo respuestas a las ordenes humanas” (Reyes, F., 2011).

Una de las ventajas de la definición anterior es que un gran número de dispositivos automáticos cotidianos son considerados robots. Por ello existe polémica en que es un robot y que no lo es. En realidad tal polémica se trata de un problema de evolución tecnológica y de los robots con ella, es claro que las necesidades cotidianas han cambiado o se han creado nuevas necesidades conjuntamente con el avance tecnológico, los robots simplemente han evolucionado y se han adaptado a estos nuevos requerimientos. A la par de esto han surgido nuevas áreas en la robótica, lo cual hace necesario expandir el concepto que se tiene de un robot, sin caer en el absurdo de considerar como tal a cualquier máquina que sustituya alguna función antes solamente realizada por el ser humano.

Esta evolución de la robótica se ha desarrollado en paralelo a las necesidades de los seres humanos, por lo que cada día es más necesario el desarrollo de investigación en muchas más áreas. En consecuencia es necesario el progreso en áreas de diferentes tipos de robots, que aunque, no estén considerados dentro de una definición internacional, han surgido para satisfacer nuevas necesidades, como: los robots móviles, los robots de exploración espacial, por lo cual ha sido necesario emplear los horizontes de la robótica más allá de la robótica industrial.

El robot industrial tiene sus orígenes en 1954 por George Devol, el cual combinaba la articulación de un teleoperador con el eje servocontrolado de una máquina de control numérico; incluía un dispositivo de transferencia programada articulada, un brazo primitivo que se podía programar para realizar tareas específicas. Así el operador es eliminado del sistema de control, estableciendo las bases del robot industrial moderno (Harris, H.A., 2009).

Los robots actuales han requerido también mayor funcionalidad locomotora, es decir el robot requiere moverse libremente en todo entorno, en contraste con muchos de los robots industriales. Así la necesidad de navegación y locomoción se han incrementado notoriamente, lo cual ha desarrollado nuevas áreas en robótica. Se han requerido nuevos mecanismos para permitir a los





robots moverse a través de áreas concurridas, terrenos irregulares, canales estrechos e inclusive escaleras. Varios tipos de robot con patas han sido estudiados, ya que a diferencia de las ruedas estándar, las patas se adaptan a suelos irregulares. Los robots bípedos han sido estudiados extensamente, resultando en el desarrollo de humanoides. La combinación de ruedas con mecanismos de patas ha desencadenado un mejor desempeño tanto en flexibilidad como en eficiencia, ejemplo de ello es el robot explorador Curiosity.

La navegación es otra función requerida en los robots móviles. Estos robots son equipados con sensores de distancia y sistemas de visión, y son capaces de interpretar estos datos con la finalidad de ubicarse a sí mismos; frecuentemente este robot tiene un mapa del entorno que se utiliza para estimular su ubicación, y aún más basado en datos en tiempo real, el robot es capaz de actualizar el mapa (Reyes, F., 2011).

Actualmente existe una gran variedad de robots con diversas estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y aplicación. Sin embargo, de manera general pueden ser clasificados como se muestra en el diagrama 2:

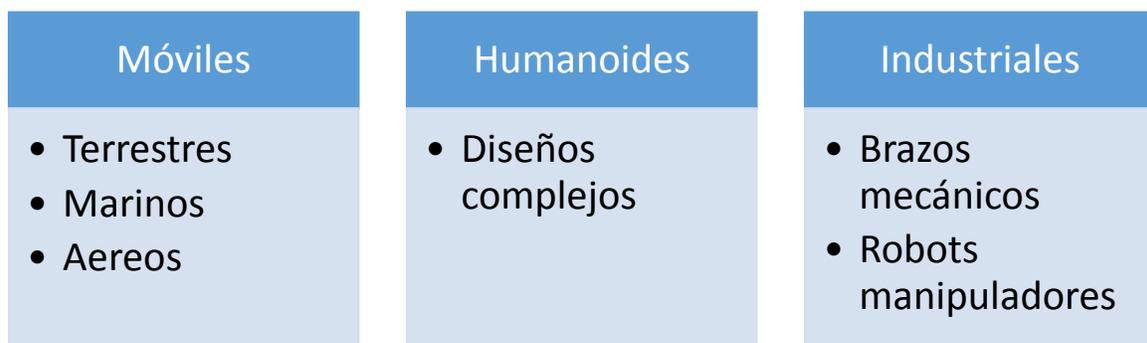


Imagen 1.10. Clasificación general de los robots (Basado en Harris, H.A., 2009).

Los robots móviles se utilizan en el hogar para limpiar y recolectar basura; en hospitales se emplean para trasladar instrumental de quirófano; en investigación científica del espacio se ocupan para analizar y enviar información, etc. Existen diversos tipos de robots móviles, dependiendo de la aplicación es el tipo de estructura mecánica, ruedas o patas. Estos pueden ser clasificados de acuerdo con el medio en que se desplacen: terrestres, marinos y aéreos.

Por ello, un rover de minería lunar, podría clasificarse como un robot móvil, aunque aún no se establece la clasificación adecuada, debido a que el desarrollo de los mismos apenas comienza (Reyes, F., 2011).





## I.VI. NASA Lunabotics Mining Competition

La competencia impulsa la innovación. En la mayoría de los casos, la competencia es impulsada por el entorno geopolítico, por ejemplo, las guerras. Algunos de los principales desarrollos tecnológicos han ocurrido durante la Guerra Fría y la Segunda Guerra Mundial. Durante la Segunda Guerra Mundial se pudo observar el rápido desarrollo de los cohetes y la invención de los radares. Si no fuera por la guerra fría, es posible que nunca hubiéramos conseguido poner un pie en la Luna. Por supuesto, una guerra, en sí misma es perjudicial para cada protagonista y causa grandes pérdidas para todos los involucrados. Pero, ¿Es posible poner simplemente el aspecto competitivo y dejar todo lo demás? Bueno, la respuesta es sí.

Uno de los primeros concursos con premio en efectivo se llamaba el Premio "Longitude" y fue ofrecido por el gobierno británico en 1714. El premio en efectivo de 10.000 Libras esterlinas debía ser otorgado a una primera persona que pudiera idear un método para determinar la latitud y longitud de buques dentro de 60 millas náuticas. Este premio ayudó en el desarrollo de los cronómetros marinos precisos que permiten la navegación en alta mar y, a su vez contribuyó con los descubrimientos de nuevas tierras.

En 1919, el propietario de un hotel de Nueva York Raymond Orteig estableció el Premio Orteig de 25.000 dólares para el primer aviador que consiguiera volar sin escalas desde Nueva York a París o desde París a Nueva York. Su incentivo comercial era aumentar el número de turistas. Ocho años más tarde, Charles Lindbergh se convirtió en un héroe nacional por haber ganado el premio en su avión llamado "Espíritu de St. Louis". El interés del público en los viajes aéreos se disparó y el resto es historia.

En 1996 se estableció la "X Prize". El nombre fue cambiado a "Premio X Ansari" en 2004, después de una donación de varios millones de dólares de los empresarios Anousheh Ansari y Amir Ansari. El premio de \$10 millones de dólares fue ofrecido a la primera organización no gubernamental que consiguiera lanzar una nave espacial tripulada reutilizable al espacio (que se define a más de 100.000 km de altitud) dos veces dentro de un período de dos semanas. El premio finalmente fue ganado por el equipo de Burt Rutan y Paul Allen en octubre de 2004, el primer lanzamiento con éxito se logró el 21 de junio de 2004. El avión espacial fue llamado SpaceShipOne y se llevó a una altura elevada previa por su nave nodriza White Knight antes de ser liberado y disparado por su propio cohete. Aunque el equipo ganó \$10 millones, la inversión total en este proyecto se estima en un orden de magnitud mayor. Como resultado de este éxito, Richard Branson creó la empresa Virgin Galactic con el objetivo de ofrecer vuelos espaciales suborbitales al público, paraefectuar misiones de ciencia espacial y para





proporcionar lanzamientos orbitales de los satélites pequeños. El costo actual por persona es de \$ 200.000 dólares.

En 2003, la NASA siguió este camino de desarrollo tecnológico a través de competencias mediante el establecimiento de los concursos llamados Retos del Centenario (nombrado en honor a los 100 años del primer vuelo de los hermanos Wright). Uno de los primeros desafíos incluyó el concurso de excavación de regolito. El objetivo de este reto era fomentar el desarrollo de nuevas tecnologías de excavación de regolito lunar, necesarias para la presencia humana en la Luna. La Minería del regolito lunar es el primer paso en el proceso de varias etapas del aprovechamiento de recursos en sitio o también denominado In Situ Resource Utilization (ISRU). El objetivo de ISRU es procesar el regolito lunar y hielo de agua en elementos que pueden ser usados para mantener la presencia humana en la Luna y hacer que la exploración planetaria más accesible.

Una serie de equipos integrados por profesionales de la ingeniería, con decenas de años de experiencia en la industria aeroespacial y la robótica, estudiantes universitarios, e incluso estudiantes de escuela secundaria participaron en el concurso. Para ganar el premio, los excavadores robóticos tuvieron que navegar alrededor de rocas, y recoger al menos 150 kg de simulante de regolito lunar, además de depositarlo a un contenedor de almacenamiento dentro de un período de 30 minutos. Para hacer las cosas aún más difíciles, se implementó un retraso de 2 segundos en las comunicaciones de los operadores con los robots para hacer más real el proceso de las comunicaciones lunares. Así los operadores podrían tener la experiencia de primera mano de como funcionarían los robots mineros sobre una superficie lunar.

Después de dos intentos iniciales, en las que ningún equipo logró ganar el premio, finalmente, en el año 2009, tres equipos lograron obtener los premios del primer lugar (\$500.000 USD), el segundo lugar (\$150.000), y el tercer lugar (\$100,000). El Instituto Politécnico de Worcester se llevó a casa el primer premio superando a otros 22 equipos (Imagen 1.11). La excavadora, llamada Moonraker, se las arregló para recoger y vaciar 439 kg de regolito. El equipo utilizó una serie de cámaras colocadas en lugares estratégicos para navegar alrededor de la región de suelo y para depositar el regolito en un contenedor de recolección. Unos días antes de la competición, el equipo realizó un ensayo general en la arena y se dio cuenta de que un proceso de la minería lunar se genera una gran cantidad de polvo que oscurece la vista de las cámaras. Por lo tanto para ayudar en su navegación, el equipo instaló cuatro diodos LEDs azules en cada una de las cuatro esquinas del área de competencia. Estos cuatro puntos de referencia resultaron indispensables durante la competencia real en el que se utilizó el regolito lunar, en lugar de arena de la playa (Imagen 1.12). Debido a que el regolito lunar contiene una gran fracción de partículas pequeñas, del tamaño de micras e incluso de tamaño inferior a la micra, lo que genera una gran cantidad de polvo.





Imagen 1.11. Robot de excavación del Instituto Politécnico de Worcester, ganador del primer premio (K. Zacny, 2011).



Imagen 1.12. Robot ganador en el proceso de excavación del regolito, extrajo 439 kg en 30 min (K. Zacny, 2011).

Cabe señalar que algunos de los enfoques mineros empleados durante la competencia (por ejemplo, sistema de cadena de cangilones) no son adecuados para el ambiente lunar polvoriento. Sería sólo cuestión de tiempo antes de que algunos de los mecanismos se pudiesen obstruir debido al polvo y dejar de operar. Desde el punto de vista empresarial, la competencia genera una inmensa rentabilidad en el campo de la robótica espacial. Suponiendo que cada excavadora robótica costaría 500.000 dólares para construir por contratistas independientes, la inversión financiera total sobre el curso de tres años podría ser valorada en más de \$10 millones de dólares. Eso es, al menos, diez veces menos que el premio total en efectivo.





Inspirado por el éxito de estas competencias, Robert Mueller, del Centro Espacial Kennedy de la NASA, creó la “Lunabotics Mining Competition” o la competición de minería lunar en la NASA en el Centro Espacial Kennedy (Lunabotics 2011). El Concurso Minería Lunabotics está diseñado para equipos universitarios de todo el mundo, con el objetivo general innovación y estimular el interés de los alumnos en las ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas. El primer concurso realizado en 2010 atrajo a 30 equipos de Estados Unidos y este grupo de universidades proporcionó una gran cantidad de ideas innovadoras y conceptos de excavación lunar, algunos de ellos que algún día se pudieran ocupar para excavadoras lunares reales (Imagen 1.13) (Lunabotics Mining Competition, 2013).



Imagen 1.13 Competencia Lunabotics Mining Competition en el centro espacial Kennedy 2010. Se muestra robot de excavación construido por Georgia Tech (K. Zacny, 2011).

El concurso del 2010 exigía a los estudiantes diseñar y construir un sistema de minería que tuviera la capacidad de recoger un mínimo de 10 kg de simulante lunar (BP-1), y depositarlo en un recipiente de almacenamiento. Esto tenía que ser logrado por medio de una operación remota o haciendo al robot plenamente autónomo en un período de 15 minutos. La competición tuvo tanto éxito, que la segunda competencia Lunabotics tuvo que ser trasladada a un lugar más grande para dar cabida a más de 60 equipos de Estados Unidos e internacionales. Aunque los premios del concurso son mucho menores que lo que la competencia “Centennial” de excavación de la NASA, el Lunabotics Mining Competition no es por los premios monetarios. Se trata de la innovación, el trabajo en equipo y la fraternidad de universidades alrededor del mundo, sin embargo competitiva. De hecho, los equipos, a pesar de que competían entre sí, se ayudaban mutuamente con consejos, piezas de repuesto y mano de obra. Este es un ejemplo de un concurso de ganar-ganar para todos. Los estudiantes obtienen experiencia práctica mediante la aplicación de sus ideas innovadoras para resolver problemas prácticos y la NASA recibe docenas de conceptos probados que pueden ser empleados en una futura misión.





Otra competición que se desarrollo es por el premio de \$30 millones de dólares es la denominada "Google Lunar X Prize". El premio será entregado al primer equipo que financiándose con fondos privados consiga aterrizar un robot en la superficie lunar, recorra 500 metros y consiga enviar imágenes y datos a la Tierra. Uno de los competidores por el premio es el robot Astrobotic, desarrollado por la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburg.

El rover Astrobotic en realidad es lo suficientemente grande como para ser capaz de transportar y desplegar una serie de cargas útiles, de las cuales la más atractiva es el taladro. Por lo tanto, el taladro lunar Honeybee Robotics, el Moonbreaker ha sido rediseñado para adaptarse a este rover (Imagen 1.14). El taladro tiene previsto viajar a la Luna en 2014 y esta sería la primera misión lunar de perforación desde la misión soviética Luna 24 que retorno en 1976.



Imagen 1.14. Rover lunar Astrobotic con taladro de perforación Moonbreaker de Honeybee Robotics (Honeybee Robotics, 2012).





## Capítulo II.

### Proceso de diseño





## II.1. Metodología para el diseño de productos mecatrónicos

La mecatrónica es una rama de la ingeniería que se creó a partir de la necesidad de generar carreras multidisciplinarias que entiendan y desarrollen tecnología. La integración cada vez más estrecha entre ramas como la mecánica, la electrónica y la computación permiten que la mecatrónica evolucione con sistemas automatizados y productos cada vez más especializados, todos estos constituidos de mecánica de precisión, electrónica de control y sistemas cada vez más inteligentes.

La sinergia de estas disciplinas crea un panorama relativamente nuevo en cuestión de diseño de productos, que evoluciona a pasos agigantados en paralelo a los desarrollos tecnológicos. La aplicación de la mecatrónica no se centra en un área en específico brindando una amplia gama de sectores de integración, permitiendo que la mecatrónica pueda amalgamarse con prácticamente cualquier área de tecnología; desde luego una de estas áreas de integración es la robótica (Bishop, R.H., 2006).

Para proseguir es necesario hablar de los productos mecatrónicos y con ello definir lo que es un producto. En nuestro entorno, si somos observadores, conseguiremos aislar cada uno del sinnúmero de productos con los que nos interrelacionamos diariamente, sin duda, muchos de ellos no solo forman parte de nuestras actividades cotidianas, sino que son imprescindibles para las mismas, esto debido a que fueron especialmente diseñados para desempeñar dicha actividad o inclusive para la persona por la que son empleados. Por lo cual podemos definir al producto como un ente o artefacto no natural, concebido y producido para satisfacer una necesidad, que posee propiedades y funciones a desempeñar.

Un producto, de acuerdo a la perspectiva de la observación posee características muy diferentes debido a que puede tener connotaciones psicológicas, estéticas, económicas, mercadológicas, técnicas, etc. Por ejemplo, para un consumidor un producto es algo que se compra y se utiliza, para un ingeniero es un sistema técnico-físico que debe funcionar eficiente y confiablemente, mientras que para un diseñador industrial un producto es un objeto cuyas funciones y sentido psicológico encarnan valores culturales. Al final, el producto tiene la misión de satisfacer una necesidad y de acuerdo a ese nivel de satisfacción es el nivel del éxito del producto (Roozenburg, N.F.M, 1996).





De esta infinidad de productos que nos rodean, existe una gran gama que son productos mecatrónicos. Un producto mecatrónico es aquel que cuenta con sistemas mecánicos de precisión, electrónica de control y son programados por medio de sistemas computacionales. Algunos ejemplos que usamos cotidianamente son las computadoras, los automóviles, los teléfonos, los equipos en hospitales.

Esos productos debido a su naturaleza requieren un trabajo en perfecta armonía, donde cada una de sus partes o sistemas interactúen en tiempo y forma exactamente como fueron diseñados, este nivel de exigencia requiere que el diseño de estos productos sea muy preciso, por lo que es imposible el diseño de sistemas de manera individual, por el contrario debe de realizarse un diseño integral, donde cada uno de los sistemas sea planeado y desarrollado considerando al resto de los sistemas.

En el año de 1970 la sociedad japonesa para la promoción de maquinaria industrial realizó una propuesta para la clasificación de los productos mecatrónicos, organizándolos en cuatro categorías (Bishop, R.H., 2006).

- Clase I. Productos principalmente mecánicos con electrónica incorporada para mejorar su funcionalidad. Por ejemplo máquinas de control numérico y controladores de variación de aceleración en máquinas de manufactura.
- Clase II. Sistemas mecánicos tradicionales con una parte significativa de dispositivos electrónicos adicionados. Las interfaces externas con el usuario no son modificadas, Por ejemplo la máquina de coser y sistemas de manufactura automatizados.
- Clase III. Sistemas que mantienen la funcionalidad del sistema mecánico tradicional; pero los mecanismos internos son reemplazados por electrónica. Por ejemplo los esterilizadores para instrumentos médicos.
- Clase IV. Productos diseñados con tecnologías mecánicas y electrónicas a través de una integración sinérgica. Por ejemplo fotocopiadoras, lavadoras y secadoras inteligentes y hornos automáticos.

Con estas clasificaciones es posible conocer de mejor manera a los productos mecatrónicos. El producto que se toma como caso de estudio en la presente tesis es un robot móvil de excavación lunar, el cual es conceptualizado desde un inicio como un producto mecatrónico.

Por lo que el proceso de diseño respecta, existen varias metodologías aplicables al diseño mecatrónico, que es muy empleada la metodología Peñuelas, desarrollada por el Mtro. en Ingeniería Ulises Peñuelas Rivas, profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, mismo que en su tesis de maestría 2007 generó una metodología especializada en el diseño mecatrónico. Esta metodología junto con algunas otras como las desarrolladas en los libros: "Diseño y desarrollo de productos" por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger, "Diseño en ingeniería mecánica" por Joseph





E. Shigley y Charles R. Mischke y el “Diseño de elementos de máquinas” por Robert. L. Mott se amalgaman en una propuesta de proceso de diseño específica para productos mecatrónicos, con peculiar desarrollo de productos de robótica espacial.

Dentro de las metodologías tradicionales para el desarrollo de productos se analiza el proceso de desarrollo de los productos, se describe la secuencia de pasos o actividades que una empresa o ingeniero utiliza para concebir, diseñar y comercializar productos (Ulrich, D., Eppinger, S., 2009). Además del éxito económico que implica la implementación de un proceso de desarrollo del producto, existen factores que son necesario mencionar para comprender la importancia del mismo, un proceso bien definido de desarrollo es útil por las siguientes razones (Ulrich, D., Eppinger, S., 2009):

- Aseguramiento de calidad: Durante el proceso de desarrollo se establecen puntos de inspección, lo cual asegura la calidad del producto.
- Coordinación: Un proceso bien definido y estructurado permite la distribución de actividades y responsabilidades durante el desarrollo del producto, lo cual es clave para el éxito de cada una de las etapas de desarrollo.
- Planeación: El establecimiento de plazos y tiempos para finalizar cada etapa del proceso de desarrollo resulta de vital importancia para el programa general de desarrollo.
- Administración: Se requiere de la evaluación continua del trabajo de desarrollo, a fin de identificar posibles áreas problemáticas.
- Mejora: La documentación del proceso de desarrollo ayuda a identificar oportunidades de mejora.

Para poder participar en el proceso de desarrollo de un producto se requiere conocer al menos cada una de sus fases, ya que es un proceso en muchas ocasiones complejo, e inclusive se sabe que ocasiones llevar a término cada una de las etapas de este proceso se requiere al menos de un año.

Como se mencionó, la metodología tradicional para el desarrollo de productos, se suele dividir en etapas o fases. Y éstas son seis (Ulrich, D., Eppinger, S., 2009):



Imagen 2.1 Etapas de la metodología tradicional de diseño (Ulrich, D., Eppinger, S., 2009).

Cada una de estas fases conlleva tareas, responsabilidades y características especiales de organización y administración. Con la finalidad de detallar y clarificar un poco más cada una de las fases de





este proceso de desarrollo, se muestra una breve descripción de las mismas (Ulrich, D., Eppinger, S., 2009):

**Fase 1. Planeación:** El proceso de planeación del producto tiene lugar antes de que el proceso de desarrollo del producto se apruebe de manera formal, tiene como finalidad identificar la cartera de productos a desarrollar por la organización y la coordinación en tiempos para su introducción al mercado. Esta actividad garantiza que los proyectos de desarrollo del producto apoyen la estrategia general de negocios de la compañía. Básicamente tiene como finalidad declarar la misión para el grupo de desarrollo de productos; en esta etapa se genera información muy valiosa, tal como segmentos de mercado que deben ser considerados al diseñar el producto y desarrollar sus funciones, qué nuevas tecnologías (si las hay) deben incorporarse en el nuevo producto, cuales son los objetivos y restricciones de manufactura y servicio, cuales son los objetivos financieros para el proyecto y finalmente cual es el presupuesto y marco de tiempo para el proyecto.

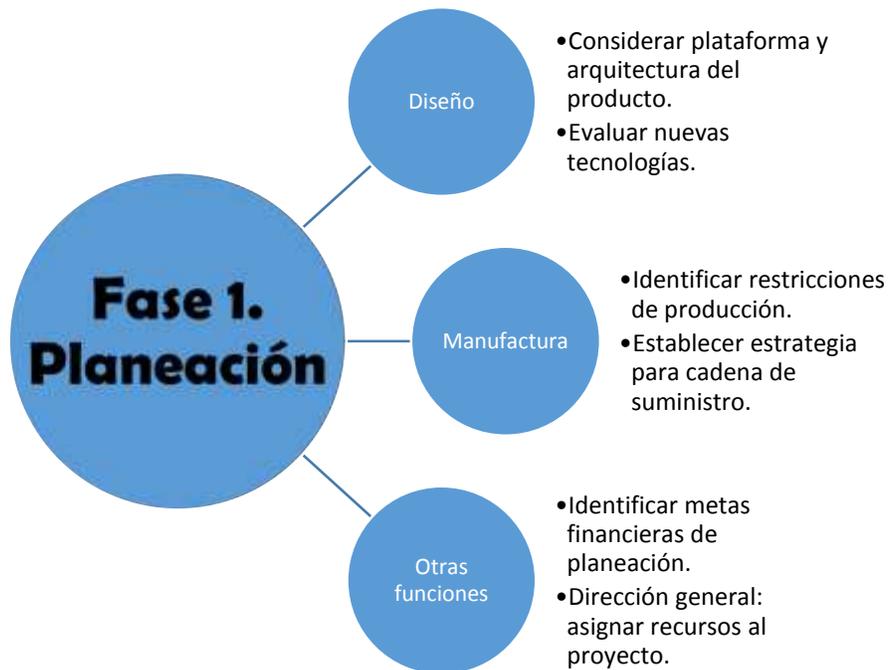


Imagen 2.2. Fase de planeación en la metodología tradicional de diseño (Basado en Ulrich, D, 2009).

**Fase 2. Desarrollo del concepto:** En esta fase se busca identificar necesidades del mercado objetivo, generar y evaluar conceptos alternativos de producto, y uno o más conceptos se seleccionan para el desarrollo y pruebas adicionales. Un concepto es una descripción de la forma, función y características del producto, y por lo general está acompañado por un conjunto de especificaciones, un análisis de productos de la competencia y una justificación económica del proyecto.



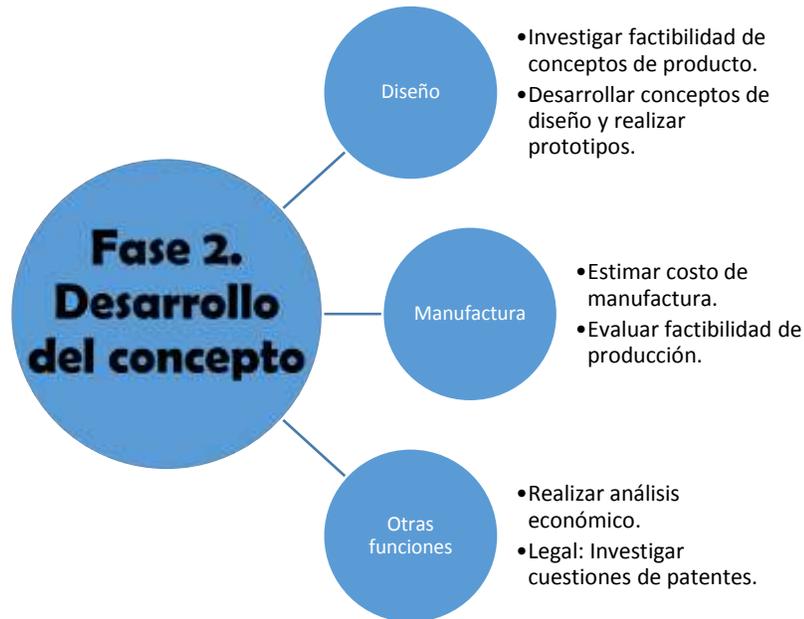


Imagen 2.3. Fase de desarrollo del concepto en la metodología tradicional (Basado en Ulrich, D, 2009).

**Fase 3. Diseño a nivel sistema:** La fase de diseño a nivel sistema incluye la definición de la arquitectura del producto y la descomposición del producto en subsistemas y componentes. El esquema de ensamble final para el sistema de producción suele definirse también durante esta fase final. El producto de esta etapa es el diseño geométrico del producto, una especificación funcional de cada uno de los subsistemas de los productos y un diagrama de flujo preliminar del proceso para el ensamble final.

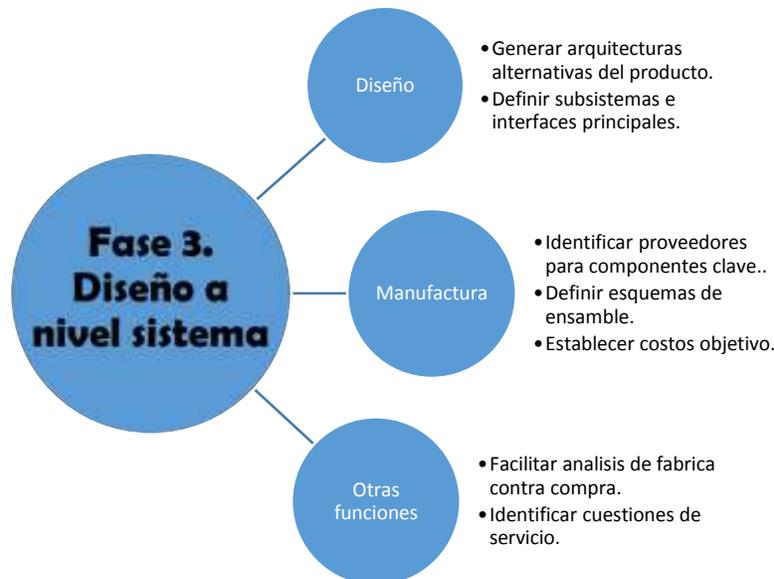


Imagen 2.4. Fase de diseño nivel sistema en metodología tradicional (Basado en Ulrich, D, 2009).





**Fase 4. Diseño a detalle:** La fase de diseño a detalle incluye la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto y la identificación de todas las partes estándar a ser adquiridas de proveedores. El producto de esta etapa es la documentación de control del producto, es decir, los dibujos o archivos de computadora que describen la geometría de cada una de las piezas y su herramental de producción, las especificaciones de las piezas compradas, y los planes de proceso de fabricación y ensamble del producto.

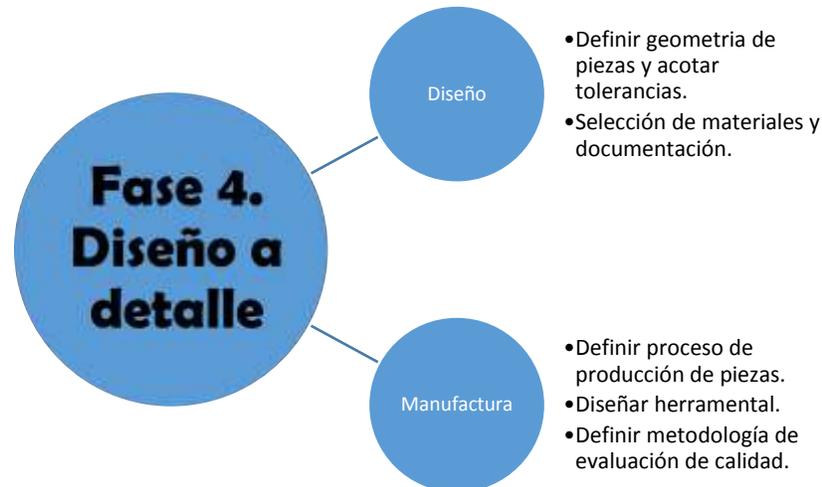


Imagen 2.5. Fase de diseño a detalle en la metodología tradicional (Basado en Ulrich, D, 2009).

**Fase 5. Pruebas y refinamiento:** Esta fase consiste principalmente en la elaboración de prototipos. Generalmente se manejan dos tipos de prototipos, los primeros, prototipos alfa tienen como objetivo determinar si el producto funcionara como está diseñado y si el producto satisface las necesidades claves del cliente; para la elaboración de estos prototipos se emplean piezas de la misma geometría y propiedades de material con las que fueron planeadas originalmente, pero no necesariamente son fabricadas con los procesos reales de producción a emplearse. Los siguientes prototipos, llamados prototipos beta dan información sobre la operación y confiabilidad para identificar cambios de ingeniería en el producto final, tales prototipos son evaluados de forma interna por la empresa y también probados por clientes en su propio ambiente de uso. Los prototipos beta son fabricados con la geometría, materiales y procesos de producción seleccionados para el producto real, pero no es empleado el proceso de ensamble seleccionado.



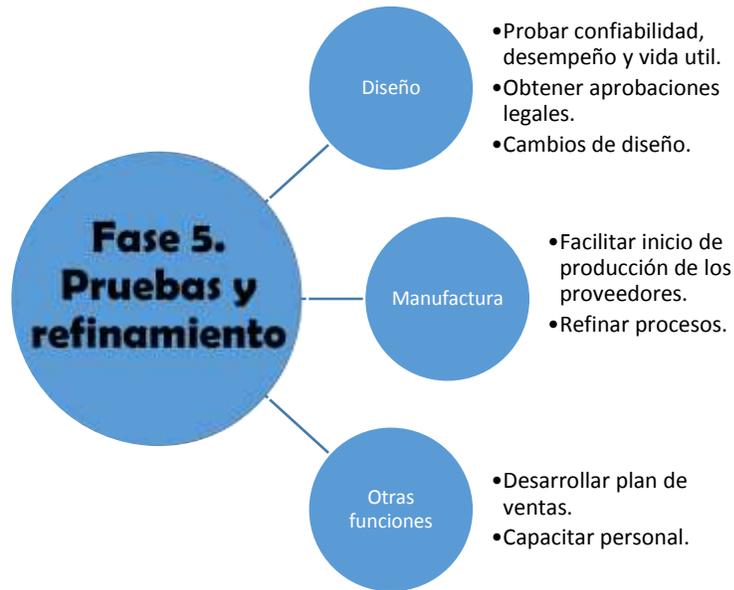


Imagen 2.6. Fase de pruebas y refinamiento en la metodología tradicional de diseño (Basado en Ulrich, D, 2009).

**Fase 6. Inicio de producción:** En esta fase el producto se hace usando el sistema de producción pretendido. El propósito del inicio es capacitar al personal y resolver cualquier problema en los procesos de producción. Los productos producidos durante el inicio se proporcionaran a clientes preferidos y son cuidadosamente evaluados para identificar cualquier falla. La transición de inicio de producción a producción en curso suele ser gradual. En algún punto de esta transición, el producto es lanzado y queda disponible para su distribución generalizada. Para esta etapa en cuestión de diseño solo hay evaluación.

La metodología anterior, como se mencionó es la metodología básica empleada en desarrollo de productos, por lo cual es de suma importancia su consideración ya que los productos mecatrónicos no dejan de ser productos. Pero debido a sus características resulta necesario algunas modificaciones o usar metodologías específicas, que contemplen más amplia e integralmente los factores involucrados en este tipo de productos, productos mecatrónicos.

El objetivo de describir el proceso o metodología de diseño para productos mecatrónicos, es generar una guía que sirva de base para que un producto mecatrónico se desarrolle, respetando su naturaleza de producto y basándose en la premisa de sus particulares requerimientos y sus características multidisciplinarias, proporcionándole un enfoque más adecuado, que agregue valor agregado y sobre todo considere como un factor en la toma de decisión a los sistemas que enlazan a sus componentes. Este replanteamiento de la metodología de diseño representa un reto debido a que en los productos no solo se incluye la parte de elementos mecánicos





clásicos, sino que añaden elementos electrónicos y de programación, lo cual dificulta caracterizar al producto y definir las fronteras que separan los subsistemas. Un ejemplo de metodología especializada en productos mecatrónicos es la metodología propuesta por Peñuelas mostrada en la imagen 2.7.

Al igual que la metodología básica, esta se divide en etapas que orientan al diseñador desde la identificación de necesidades, hasta la obtención de un modelo funcional. Tanto como para Peñuelas como para Ulrich el proceso más importante del diseño es el diseño conceptual. De hecho asegura Ulrich que la calidad del diseño conceptual del producto podrá determinar el éxito del mismo. De igual manera en nuestra propuesta de diseño para productos mecatrónicos, específicamente para el producto de excavación lunar, nuestro punto focal es el diseño conceptual, pero se dará un mayor énfasis a la necesidad de innovación y de dar valor agregado a los productos.

La innovación es la acción de crear o modificar algo, introduciendo novedades o características que hagan a un producto único y siempre orientado en la mejoría de la experiencia al usuario. Sin duda alguna en la actualidad la innovación se ha convertido una necesidad de las empresas y diseñadores, debido a que es un elemento clave para la competitividad. La innovación se caracteriza por no estar restringida a la creación de nuevos productos, a nuevos desarrollos tecnológicos y a ideas revolucionarias. De hecho la innovación se ha vuelto tan importante en nuestros días que hay instituciones como la Unión Europea que han creado programas como el programa marco para la competitividad e innovación cuyo único propósito es propiciar estos factores en los ámbitos gubernamentales y empresariales.



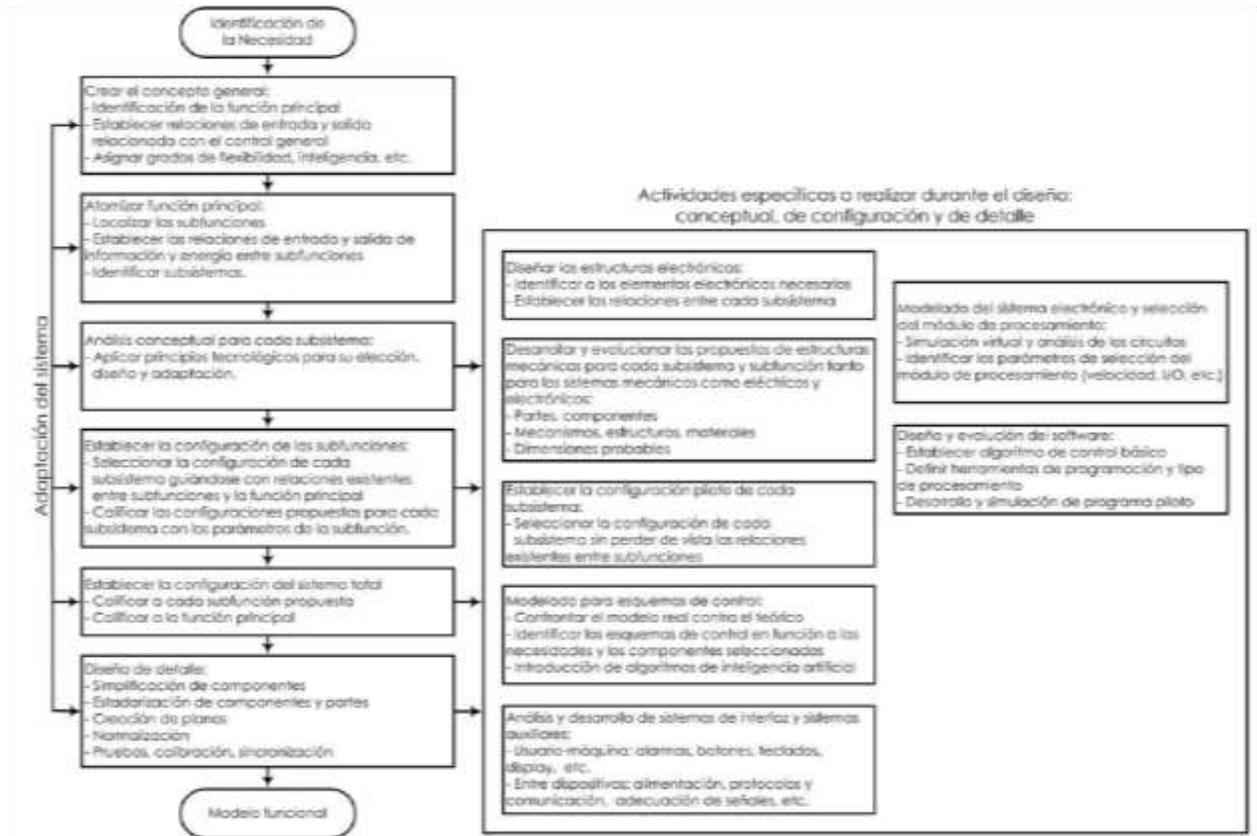


Imagen 2.7. Metodología Peñuelas para el diseño mecatrónico (Peñuelas, U., 2007).

Esto sin duda ha marcado cambios en la manera de diseñar, al grado de la creación de modelos de diseño basados en la innovación, como el creado por la Universidad estadounidense Stanford, denominado ME310 (Imagen2.8) y que se está desarrollando actualmente por 14 universidades alrededor del mundo (Incluida la Universidad Nacional Autónoma de México) o el desarrollado empresarialmente por IDEO, los cuales le dan un alta prioridad de aprendizaje a la realización de prototipos y un alto número de reiteraciones (Imagen2.9), esto con el objetivo de entender a un mayor nivel el producto desarrollado y poner en marcha la mayoría de las ideas que puedan surgir, sin restricciones al tipo de ideas que tengan los diseñadores.



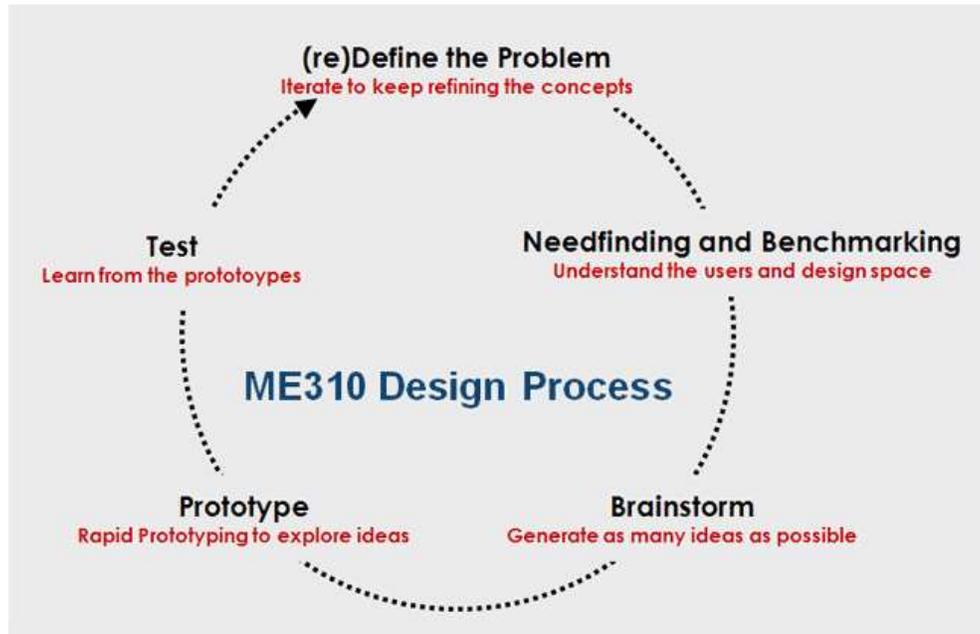


Imagen 2.8. Modelo de innovación de la Universidad Stanford (<http://web.stanford.edu/>).

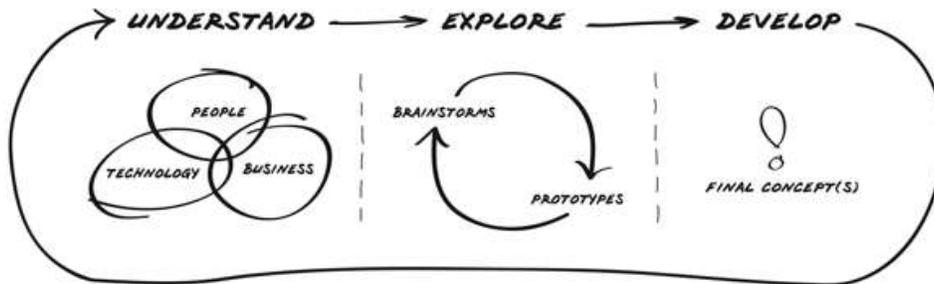


Imagen 2.9. Modelo de innovación en diseño de la empresa IDEO ([www.ideo.com](http://www.ideo.com)).





## II.II. Propuesta de metodología de diseño

Como se puede observar en las imágenes 2.8 y 2.9, para generar innovación en el diseño, se propone un indefinido número de reiteraciones que permiten un mejor entendimiento de la problemática y que a cada iteración, el diseñador renueva la visión del problema y de la manera o metodología de solución. Por esta razón decidimos realizar una amalgama ideológica entre las metodologías tradicionales de diseño y de diseño mecatrónico con las nuevas tendencias y necesidades del diseño actual, tomando con preponderancia el factor de la creatividad e innovación del producto final. En el imagen2.10 se podrá visualizar la propuesta de diseño establecida para este proyecto y se explicara más adelante.

La metodología de diseño que se propone, se puede dividir en tres secciones que a su vez contienen una serie de sub-etapas que guían al diseñador a lo que se espera sea un producto final mecatrónico e innovador. La primera etapa denominada de entendimiento, la segunda etapa, puramente creativa, llamada creación y la tercera y última etapa nombrada de conformación, se explicaran más a detalle en los siguientes párrafos, con sus debidas consideraciones.

**Entendimiento de la necesidad:** En el diseño mecatrónico la identificación de la necesidad es primordial, es tan importante que en esta metodología de diseño no se calificó como identificación, sino entendimiento de la necesidad. Esta etapa consiste en la obtención de toda la información posible de la problemática o del cliente. La primera parte es el análisis de necesidades o problemáticas, mediante la realización de tres actividades: Comprender, experimentar y observar. La comprensión radica en entender las necesidades, las causas y las consecuencias que esta repercute, la experimentación consiste en que el diseñador emule o trate de simular la problemática y finalmente la observación conlleva en realizar un análisis de como las personas y el entorno reaccionan ante la problemática y si esta problemática involucra seres humanos, cómo responden o como llegan a solucionar esta necesidad, todo esto para llegar a definir una función principal y entender todo lo que rodea a esta función.

Posteriormente a la realización del análisis de necesidades, se propone que se realice un "Brainstorming origen", esta actividad es una lluvia de ideas que suponga una generación natural de alternativas de solución, esta lluvia de ideas (Brainstorming) pretende sea lo menos influenciada por ideas o métodos de solución ya establecidos. El resultado de ésta se analizará más adelante.



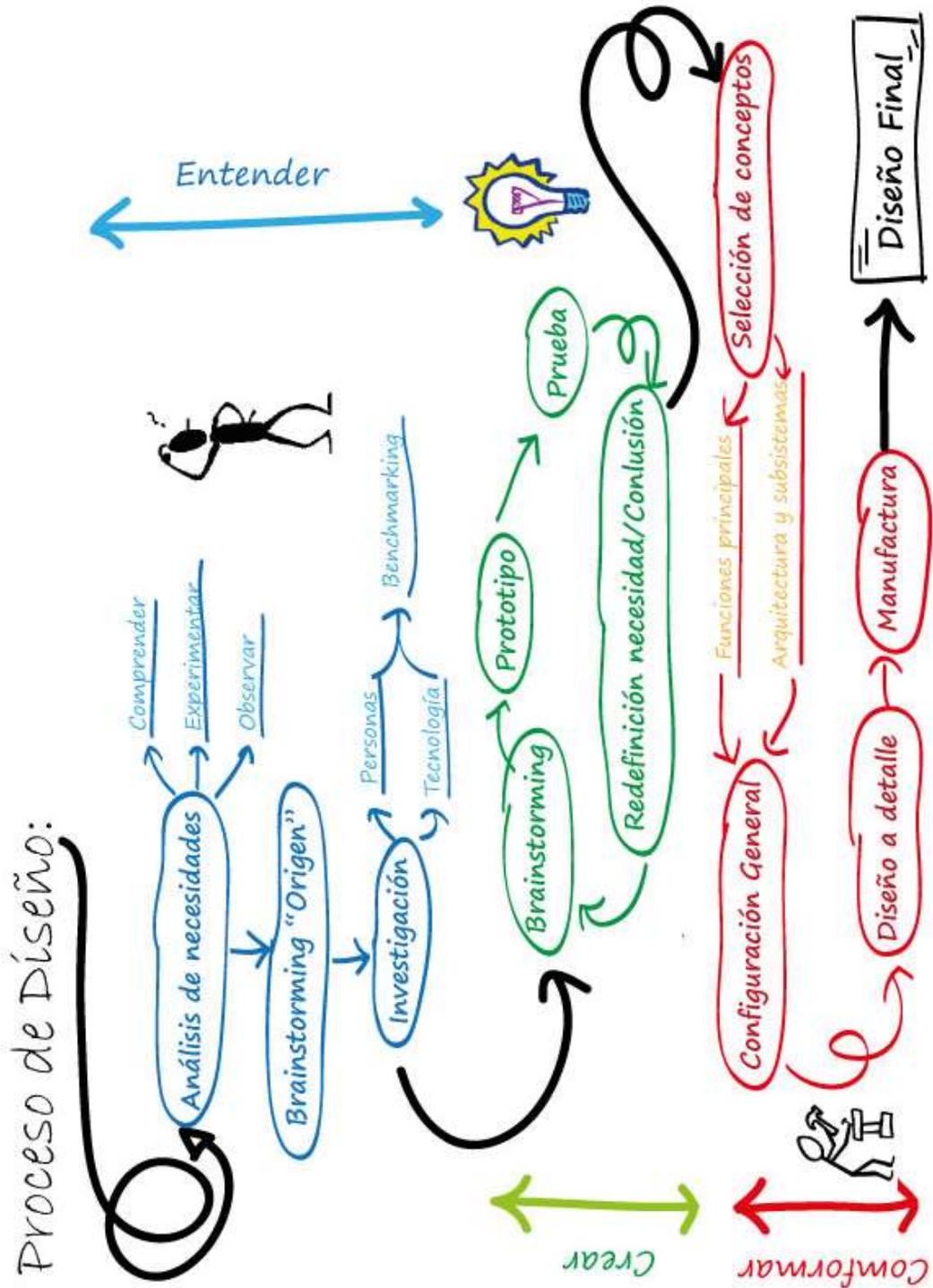


Imagen 2.10. Metodología propuesta de diseño.





Después prosigue la última sub-etapa nombrada investigación, en esta se pretende que el diseñador realice una completa documentación de personas o empresas que han resuelto esa necesidad y las características tecnológicas que estas implican. También se conoce como la realización de un benchmarking, consiste en un proceso sistemático para evaluar comparativamente los productos, servicios o procesos que satisfagan la misma necesidad que se está desarrollando.

Todas estas necesidades encontradas se deben traducir a requerimientos, éstos deben reflejar características mecánicas, electrónicas y de control, a desarrollarse en la etapa creativa. Lo más importante en esta fase para el diseño mecatrónico es poder ubicar las necesidades, y analizar su función principal, pues al estar en este punto de partida se puede elegir cualquier camino para llegar a resolver el problema, se puede aplicar en cantidad de ideas e innovaciones tecnológicas, entregando a la salida un producto nuevo e innovador.

**Diseño Creativo del concepto:** Esta etapa es básicamente un ciclo que se repetirá a consideración del diseñador y tantas veces como sea posible, éste consiste en reiteraciones entre cuatro actividades: Brainstorming, prototipo, pruebas y redefinición de la necesidad o conclusión. El Brainstorming o lluvia de ideas es una herramienta de trabajo grupal e interactivo que permite y facilita el desarrollo de ideas sobre un problema o tema determinado y cuya única normativa es aplazar el juicio, es decir que al inicio toda idea es válida y no debe ser rechazada.

Con las ideas recabadas en esta lluvia de ideas, aunadas a la primera, realizada antes de la investigación o denominada Brainstorming origen, se llega a una discusión ordenada donde se debaten los pros y contras de las ideas, finalmente llegando a una o dos ideas finales, estas ideas pasan al siguiente paso. Lo consecuente es la realización de un prototipo de esa o esas ideas, un prototipo se denomina al primer ejemplar de alguna cosa, que se toma como modelo para crear otros de la misma clase y su finalidad es probar su capacidad de desarrollar esa función crítica, que es la función que resuelve el o las problemáticas para las que se está realizando el diseño.

Finalmente con ese prototipo, que no precisamente debe ser muy elaborado sino que simplemente ejemplifique y permita la visualización de su funcionamiento o del desarrollo de la denominada función crítica, se realizan pruebas de evaluación de su comportamiento, características, ventajas y desventajas. Al finalizar estas pruebas se requiere que se redefina el problema desde la nueva perspectiva y con los nuevos aprendizajes del prototipo o se concluya al respecto, para repetir el ciclo o pasar a la etapa de conformación del diseño.

Se recomienda que este ciclo se repita al menos dos ocasiones, para que el diseñador situé de mejor manera el panorama de diseño y tenga una mayor oportunidad de innovar en el producto final. El objetivo de esta etapa es





generar el mayor número de ideas y perspectivas de solución de la problemática con la premisa de innovación en cualquier aspecto del producto. Al final de esta etapa se tienen una, dos o hasta tres ideas que se desarrollaron con sus determinadas características, las cuales facilitarían una toma de decisiones en la siguiente etapa, la denominada conformación del producto.

**Conformación del producto:** En esta tercer y última etapa se realiza una construcción del diseño final como tal y se compone por varias sub-etapas que permiten un desarrollo congruente de éste. Para comenzar con esta etapa se requiere una selección de conceptos finales, para ellos es muy útil el empleo de matices de decisión, al final de ésta se deberá tener una decisión de cuáles son los principios de funcionamiento básicos que se emplearán en el diseño, aunado a los principios de funcionamiento o funciones principales, se debe de desarrollar la arquitectura del producto, donde se deberán desarrollar y enmarcar los sistemas principales mecánicos, electrónicos y de control, así como también sus interfaces de comunicación, realizando preferentemente con un grupo multidisciplinario o especializado en las diferentes áreas de la mecatrónica para establecer la configuración general del sistema. Para esto es muy útil el empleo de cajas negras inicialmente y diagramas funcionales para conclusión de la misma.

Ya que se tiene una configuración general, tanto mecánica, electrónica y de control se procede al diseño a detalle, donde se realiza un análisis de ingeniería de cada componente y se realizan retroalimentaciones del diseño de acuerdo a selección o disponibilidad en el mercado de componentes específicos, sin alterar la naturaleza del diseño. El objetivo de esta etapa es la obtención de planos de manufactura, lista de componentes, instrucciones de manufactura, manuales de mantenimiento, consideraciones a los usuarios, proveedores y reportes de ingeniería de los componentes y del diseño en general.

Finalmente todos estos resultados se llevan a la última etapa que es la manufactura, en la cual todos los elementos son elaborados mediante las especificaciones determinadas, los cambios y retroalimentaciones entre esta sub-etapa y la anterior se recomiendan que sean los mínimos necesarios, para realizar más eficiente el proceso de diseño. Después de la manufactura y el ensamble de los componentes se llega a un producto final.

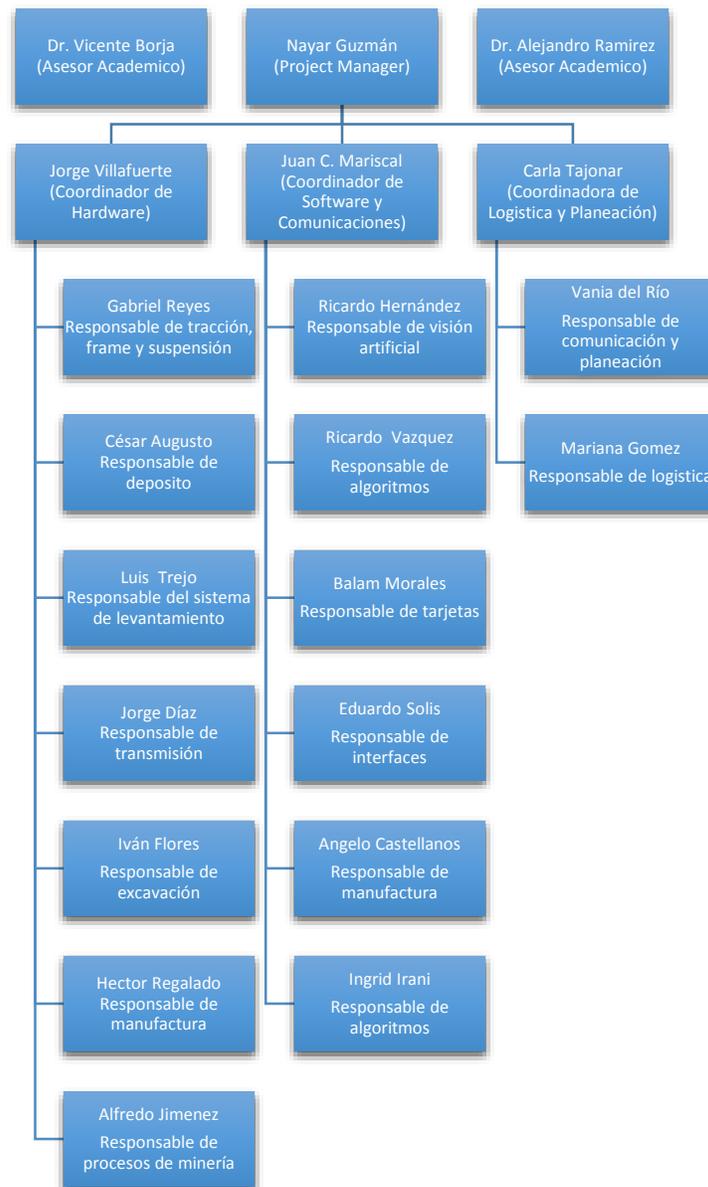
Después de este producto final es recomendable realizar múltiples pruebas de confianza y funcionamiento, así como pasado algún lapso de tiempo, realizar iteraciones nuevamente al inicio del proceso de diseño para obtener el máximo de innovaciones en el producto.





## II.III Conformación del Equipo

Para desarrollar el diseño, construcción, implementación, puesta a punto del robot, se requirió de una ardua labor de un equipo de ingenieros de diferentes carreras que pudieron así crear de forma integral el excavador lunar.





## Capítulo III.

### Entendimiento de la necesidad





El entendimiento de necesidades es la primera etapa de la propuesta de metodología de diseño, donde se analiza a fondo la problemática, las necesidades y los requerimientos. Esto con la finalidad de situar al diseñador en un contexto donde se posea la mayor información posible respecto a su futuro diseño y las consideraciones que deberá tener para el mismo. Esta etapa se secciona en tres partes: El análisis de necesidades, el Brainstorming “Origen” o la lluvia de ideas inicial y la investigación. A continuación se ejemplificará el empleo de esta etapa en el caso concreto del diseño de rover para minería lunar, de acuerdo a los requerimientos para la NASA Lunabotics Mining Competition ya referenciada anteriormente.

## III.I Análisis de necesidades

El análisis de necesidades se enfoca a adquirir la mayor información posible respecto la problemática a resolver, delimitando la obtención de la información a las habilidades de comprensión, observación y experimentación, de ser posible que se efectúe de primera mano por los diseñadores. En esta sección se limita a la investigación y entendimiento de la necesidad, nunca de las maneras de resolver la misma. Esta etapa podrá variar de acuerdo al tipo de necesidad a satisfacer.

### III.I.I Comprensión.

La comprensión es un proceso de creación mental por el que, partiendo de ciertos datos o ideas, el individuo crea una imagen mental. Para ello es necesario interpretar esos datos. El proceso de comprensión, contrariamente a lo que habitualmente se cree, no es un proceso pasivo. Por el contrario, es un proceso que exige un gran ejercicio de aislar, identificar y relacionar de forma coherente la información que se recibe, con la información que ya se dispone.

Para un diseñador esto representa uno de los mayores retos, ya que es necesario que realice todo este proceso mental con la información del futuro diseño, de las necesidades, del entorno de la misma, de los datos del cliente o usuarios y además de sus conocimientos para generar una completa imagen mental de la problemática.

Para este caso en concreto se decidió realizar un análisis de la necesidad, la problemática, los requerimientos y la información del cliente, que es la NASA para este diseño en particular.





### III.I.I.I Necesidad.

La necesidad de expansión de los seres humanos, con un satélite natural tan cercano (en términos astronómicos) y tan importante, conlleva a los deseos de querer colonizarlo a través de la construcción de bases lunares.

La colonización de la Luna es la propuesta de creación de las comunidades humanas permanentes o industrias robóticas en la Luna. Una indicación reciente de que el agua puede estar presente en cantidades notables en los polos lunares ha aumentado el interés por la Luna. Colonias polares también podrían evitar el problema de las largas noches lunares - cerca de 354 horas, un poco más de dos semanas - y aprovechar el sol de forma continua, por lo menos durante el verano local. (Eckart, 2006).

La presencia humana permanente en un cuerpo planetario aparte de la Tierra es uno de los temas más comunes de la ciencia ficción. Como la tecnología ha avanzado, y la preocupación por el futuro de la humanidad en la Tierra se ha incrementado, el argumento de que la colonización del espacio es un objetivo alcanzable y que vale la pena ha cobrado impulso. Debido a su proximidad a la Tierra, la Luna se ha visto como la expansión natural más evidente después de la Tierra.

En 1954, el célebre autor de ciencia ficción Arthur C. Clarke (1954) propuso una base lunar de módulos inflables cubiertos de polvo lunar para el aislamiento. Una nave espacial, reunidos en la órbita baja de la Tierra, que lanzará a la Luna, y los astronautas que establecería los módulos de iglús y como una antena de radio inflable. Los pasos siguientes serían la creación de una cúpula permanente más grande, una base purificadora de aire, un reactor nuclear para el suministro de energía, cañones electromagnéticos para iniciar la carga y facilitar de combustible a buques interplanetarios en el espacio.

Proyecto Horizon fue un estudio de 1959 sobre el plan del Ejército de los EE.UU. para establecer un fuerte en la Luna en 1967. Heinz-Hermann Koelle, un ingeniero de cohetes alemán de la Agencia de Misiles Balísticos del Ejército dirigió el estudio del Proyecto Horizon. El primer desembarco se llevó a cabo por dos "soldados-astronautas" en 1965 y más trabajadores de la construcción que pronto seguirían. A través de numerosos lanzamientos, 245 toneladas de carga serían transportados al puesto en 1966. (Eckart, 2006).

John DeNike y Stanley Zahn (1962) publicaron su idea de una base de sub-superficie situada en el Mar de la Tranquilidad. Esta base albergaría una tripulación de 21 astronautas, en los módulos colocados cuatro metros





debajo de la superficie, que se cree que proporcionan protección contra la radiación, así como lo hace la atmósfera de la Tierra. DeNike y Zahn favorecieron reactores nucleares para la producción de energía, porque eran más eficientes que los paneles solares, y también superar los problemas con las largas noches lunares. Para el sistema de soporte de vida, se propuso un intercambiador de gas basado en algas.

Jim Burke (2007) de la Universidad Internacional del Espacio de Francia dijo que las personas deben de estar preparadas para poder preservar la cultura de la humanidad en caso de un impacto de un asteroide con la Tierra. Se propuso un Arca de Noé lunar. (Simon & Schuster, 2007).

A partir de esto la NASA publicó un nuevo plan a largo plazo que incluía la construcción de una base lunar como un punto de partida para la exploración en Marte. Este plan previó un puesto de avanzada lunar en uno de los polos lunares para el 2024 que, si se localiza bien, podría ser capaz de aprovechar continuamente la energía solar, en los polos, los cambios de temperatura en el transcurso de un día lunar también son menos extremos, las reservas de agua y minerales útiles se pueden encontrar relativamente cerca. Además, la Agencia Espacial Europea tiene un plan para construir una base lunar habitable de forma permanente para 2025. Rusia también ha anunciado planes similares para enviar un hombre a la Luna en 2025 y establecer una base permanente allí varios años más tarde.

La construcción de una colonia en la luna implicaría una amplia fuente de material para la construcción y otros usos en el espacio, incluyendo blindaje de la radiación cósmica. La energía necesaria para enviar objetos de la Luna al espacio es mucho menor que de la Tierra a espacio. Esto podría permitir a la Luna servir como una fuente de materiales de construcción dentro del espacio. Cohetes lanzados desde la Luna requerirían menos combustible producido a nivel local que los cohetes lanzados desde la Tierra. Algunas propuestas incluyen el uso de dispositivos de aceleración eléctrica para propulsar objetos frente a la Luna sin la construcción de cohetes. Por otra parte, la Luna tiene muy poca gravedad, que la experiencia humana indica que puede ser vital para el desarrollo fetal y la salud humana a largo plazo. Es posible que la poca gravedad de la Luna pueda ser adecuada para este propósito, sin embargo, es incierto aún. (Eckart, 2006).





Imagen 3.1. Propuesta para un asentamiento lunar por Luca Oleastri, 2008.

Por otra parte, la Luna es el cuerpo más cercano en el sistema solar de la Tierra. Mientras que algunos asteroides ocasionalmente pasan cerca, la distancia a la Luna es siempre dentro de un pequeño rango de cerca de 384400 kilómetros. Esta proximidad tiene varias ventajas:

Una base lunar podría ser un sitio para el lanzamiento de cohetes con combustible localmente fabricados para planetas lejanos como Marte. El lanzamiento de cohetes desde la Luna sería más fácil que desde la Tierra porque la gravedad de la Luna es más baja.

La energía necesaria para enviar objetos desde la Tierra a la Luna es menor que para la mayoría de los otros cuerpos celestes.

El tiempo de tránsito es corto. Los astronautas del Apolo hicieron el viaje en tres días y las tecnologías del futuro podrían mejorar el tiempo y la velocidad del viaje.

El tiempo de tránsito corto también permitiría suministros de emergencia para llegar rápidamente a una base lunar desde la Tierra, o permitir que una tripulación humana pudiera evacuar de forma relativamente rápida la Luna en dirección de la Tierra en caso de emergencia.

Si la Luna fuera colonizada, entonces podría ser probada si los seres humanos pueden sobrevivir en condiciones de poca gravedad. Estos resultados podrían ser utilizados para la viabilidad de una colonia en Marte también.

La demora en las comunicaciones con la Tierra se encuentra en menos de tres segundos, lo que permite una conversación de vídeo y de audio casi en tiempo real, permitiendo que algunos tipos de control remoto de las máquinas de la Tierra que no son posibles para cualquier otro cuerpo celeste puedan ser utilizados. El retraso para otros cuerpos del sistema solar está a





minutos u horas, por ejemplo, el tiempo de comunicación de ida y vuelta entre la Tierra y Marte varía de unos ocho minutos a unos cuarenta minutos. De nuevo, esto sería de especial valor en una colonia temprana, donde podrían producirse problemas potencialmente mortales que requieren la asistencia de la Tierra.

Una base lunar sería un excelente lugar para cualquier tipo de observatorio. No hay prácticamente ninguna difracción atmosférica. Las observaciones pueden ser hechas de forma continua.

Una granja en el polo norte lunar podría proporcionar ocho horas de luz solar por día durante el verano local mediante la rotación de cultivos dentro y fuera de la luz del sol que es continua para todo el verano. Una temperatura beneficiosa, la protección radiológica, los insectos para la polinización, y todas las demás necesidades de la planta se podrían proporcionar artificialmente durante el verano local por un bajo costo. Una estimación sugiere que una granja de 0.5 hectáreas podría alimentar a 100 personas. (Eckart, 2006).

También existen varias desventajas en la Luna como un sitio para colonizar:

La larga noche lunar impediría la dependencia exclusiva de la energía solar y se requeriría diseñar la colonia de modo que pudiera soportar temperaturas extremas.

La Luna se ha reducido considerablemente en elementos volátiles, tales como el nitrógeno y el hidrógeno. Hay posibilidades de que el carbono, que forma óxidos volátiles, también se agote.

No está claro si la baja gravedad en la Luna es lo suficientemente fuerte como para evitar efectos perjudiciales para la salud humana a largo plazo. La exposición a la ingravidez durante periodos largos hablando de meses ha demostrado que causa el deterioro de los sistemas fisiológicos, como la pérdida de masa ósea y muscular y un sistema inmunológico deprimido. Efectos similares pueden ocurrir en un ambiente de baja gravedad, aunque prácticamente todas las investigaciones sobre los efectos de salud de baja gravedad se ha limitado a la gravedad cero. (Eckart, 2006).

La falta de una atmósfera sustancial resultado del aislamiento de las extremas temperaturas, hace que las condiciones de la superficie de la Luna algo así como un vacío del espacio profundo. También deja la superficie lunar expuesta a la mitad de la radiación como en el espacio interplanetario, el aumento de los números de la amenaza de salud de los rayos cósmicos y el riesgo de exposición al protón del viento solar.





Cuando la Luna pasa a través de la cola magnética de la Tierra, la lámina de plasma azota a través su superficie. Los electrones se estrellan contra la luna y son liberados de nuevo por los fotones UV en la parte que se encuentra de día, pero se acumulan tensiones en el lado que esta de noche. Esto provoca una carga negativa acumulada que varía de -200 V a -1000 V. (Mendell, 1986).

La falta de una atmósfera aumenta las posibilidades de ser golpeada por meteoritos. Incluso las pequeños piedras y polvo tienen el potencial de dañar o destruir las estructuras insuficientemente protegidas.

El polvo lunar es una sustancia vítrea extremadamente abrasiva formada por micrometeoritos y no redondeada debido a la falta de la intemperie. Se pega a todo y puede dañar el equipo, y puede ser tóxico.

Los cultivos en la Luna se enfrentan a muchos retos difíciles, debido a la larga noche lunar, las variaciones extremas de la temperatura superficial, la exposición a las erupciones solares, a la carencia en elementos vitales como el nitrógeno del suelo y la falta de insectos para la polinización. Debido a la falta de cualquier atmósfera en la Luna, las plantas tendrían que ser cultivadas en cámaras selladas, aunque experimentos han demostrado como las plantas pueden prosperar a presiones mucho más bajas que las de la Tierra. El uso de la iluminación eléctrica para compensar la noche 354 horas podría ser difícil: un solo acre de plantas en la tierra disfruta de un pico de 4 megavatios de energía proporcionada por la luz del sol al mediodía. Los experimentos llevados a cabo por el programa espacial soviético en la década de 1970 sugieren que se puede hacer crecer los cultivos convencionales con la luz de 354 horas. Se ha propuesto una variedad de conceptos para la agricultura lunar, incluyendo el uso de la luz artificial mínima para mantener las plantas durante la noche y el uso de cultivos de crecimiento rápido que podrían ser sembradas como las plantas normales con luz artificial y ser cosechables en el extremo de un día lunar. (Mendell, 1986).

Una de las dificultades menos obvias no con la Luna misma, sino más bien con los intereses políticos y nacionales de los países que participan en la creación de una colonización. Suponiendo que los esfuerzos de colonización fueran capaces de superar las dificultades mencionadas anteriormente probablemente habría cuestiones relativas a los derechos de las naciones y sus colonias para explotar los recursos de la superficie lunar, para hacer valer las reclamaciones territoriales y otras cuestiones de soberanía que tendrían que acordar antes de que uno o más naciones establecieran una presencia permanente en la Luna. Las negociaciones en curso y el debate sobre la Antártida es un buen caso de estudio para los esfuerzos de colonización lunar prospectivos, ya que pone en evidencia las





numerosas trampas de desarrollo para habitar un lugar que esté sujeto a las reclamaciones de más de una nación soberana. (Mendell, 1986).

Sobreponiéndose a las ventajas y desventajas que brinda la Luna se tendría que ir experimentando con la construcción de bases lunares para ello se tiene que pensar en las problemáticas y soluciones que esto conlleva, ya que no es tan simple como mandar personas a éste cuerpo celeste y empezar a construir.

Se sabe que la Luna tiene reservas de titanio, depósitos de metales y reservas de agua en forma de hielo, los cuales son factores que simplifican la construcción de bases y sedimentos, sin embargo como en todos los proyectos que existen se busca optimizar los recursos, solución que la da el rover de minería lunar. El robot nos podrá proporcionar más datos, realizar tareas que requieren mucho tiempo o que son repetitivas e implican la manipulación de grandes masas con gran precisión y con un menor costo, tendrá ventajas como el poder de regular su temperatura, ya que en la Luna la temperatura puede alcanzar hasta los  $-180^{\circ}\text{C}$ , entre muchas otras ventajas que se presentan al utilizar robots en vez de enviar humanos, ya que cuando se involucran éstos últimos se incurren en costos de múltiples factores como son: alimentos especiales, provisión de oxígeno, sistemas de reciclado de la atmósfera y de la nave, protección contra radiaciones, tratamiento de los desechos de los astronautas, entre muchos otros. Para evitar el envío de humanos a la Luna el rover debe tener autonomía, en este contexto, la autonomía se entiende como la independencia del robot con respecto al control humano. El operador humano puede encontrarse a miles de kilómetros del sistema robótico y el robot debe poder reaccionar frente a un entorno hostil y difícil de maniobrar. (Mendell, 1986).

Enviar máquinas al espacio no resulta una solución tan factible en especial por su peso y volumen, lo que limita el tipo de máquinas que se pueden mandar y su capacidad para realizar las tareas necesarias como recolectar, excavar, transportar, cargar, etc.

En conclusión a lo anterior y como ya se mencionó, la solución está en un rover lunar, teniendo en cuenta el ambiente y el material en el que se va a desarrollar, surge la necesidad de crear un elemento, una máquina que a pesar de ser limitada en su volumen y peso sea una máquina que pueda ayudar, explorar, limpiar y desarrollar tanto bases como construcciones en la Luna. Una máquina que pudiera tanto excavar como transportar el regolito lunar sin la necesidad de ser manipulada presencialmente, así no se arriesgarían vidas humanas y entonces pudiera convertirse en una solución real para empezar a construir.





### III.I.I.II Problemática.

Las condiciones lunares son muy diferentes a las de la Tierra por lo que existen dificultades para construir tanto el rover como la base lunar. La gravedad está reducida a un sexto de la de la Tierra, la ausencia de atmósfera conlleva a necesitar una presión de aire, y al no tener atmósfera la radiación del sol es más directa y dañina, la abrasión acumulada por los rayos cósmicos de alta energía, la necesidad de tener un escudo para estar protegidos tanto de los meteoritos de alta velocidad como de la radiación, los efectos del vacío sobre los materiales de construcción, las variaciones tan extremas de temperatura, y las contaminaciones originadas por el polvo lunar. Todas las características mencionadas presentan un reto a resolver y a tener en cuenta en cada parte de la planificación y construcción.

Con estas adversidades podemos irnos enfocando en algo más básico como el de poder excavar en la misma Luna. Sin la amortiguación del aire alrededor de las herramientas de perforación, la fricción dinámica se amplificará durante éste tipo de tareas, lo cual generará grandes cantidades de calor. Las rocas y las brocas podrían fusionarse, obstaculizando el progreso de la tarea.

La superficie lunar está hecha por un material llamado regolito que se compone de materiales poco compactos como fragmentos de roca, polvo lunar y suelo, que puede tener profundidades de hasta 5 metros. En la NASA se creó un simulante del regolito lunar llamado BP1 (véase Anexo BP1) el cual consta de propiedades físicas muy similares y con él que se puede experimentar para el tema de la excavación.

Otra de las adversidades es el transporte, el transporte de seres humanos, de máquinas y/o de material. Cuesta muchísimo dinero y muchos años para preparar una misión lunar, no podrían solo ir personas y empezar a construir, ya que para empezar no podrían contar con muchos recursos para su propia supervivencia, la construcción sería más lenta y el costo se elevaría de sobremanera.

Como se mencionó en el punto II.I.I otro factor a tener en cuenta es el peso del rover, éste debe ser lo suficientemente ligero como para poder volar en un cohete pero lo suficientemente pesado como para poder moverse por superficies con menos gravedad que la Tierra, en este caso es imprescindible llegar a un equilibrio en el que se logren ambas metas, su envío y permanencia en la Luna.

La automatización del rover no debe presentar tanta problemática, lo único a considerar es el retardo de la señal que no debe superar los 3 segundos, sin embargo ésta se puede duplicar al bajar la información de monitoreo en el enlace de regreso.





### III.I.I.III Requerimientos.

En el afán por satisfacer la necesidad antes descrita, la NASA creó la competencia Lunabotics Mining Competition como se describe en la historia de la competencia en el apartado NASA Lunabotics Mining Competition del capítulo I (véase apartado I.VI), La competencia se centra en invocar el talento, la tecnología y la ingeniería de diferentes países en las áreas de Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas al tratar de desarrollar un robot capaz de desenvolverse en condiciones lunares, en un área de pruebas de ambiente controlado, probando su habilidad de identificar su localización y su posición, moverse a través de una zona de obstáculos (rocas de 20 a 30 cm con una masa aproximada de 7 a 10kg, cráteres de 30 cm de anchura y 30 cm de profundidad) para llegar a una zona de excavación donde deberá extraer y recolectar simulante lunar BP-1 (véase anexo BP-1), transportándolo de regreso y depositarlo en un lugar específico. La competencia usa el proceso de excavación como un primer paso necesario para la extracción de recursos del suelo lunar y posteriormente crear bases lunares, empezando así una colonización en el satélite natural de la tierra.

Realmente la NASA busca nueva tecnología para avanzar en las investigaciones al tratar de lidiar con la dura y difícil tarea de la excavación lunar basada en condiciones muy diferentes a las que conocemos aquí en la tierra (gravedad, temperatura, atmosfera) dejando la excavación como un verdadero reto para los ingenieros de hoy en día y más que una competencia se puede visualizar a la "NASA Lunabotics Mining Competition" como una unión de ideas y tecnología que se expone mundialmente para poder enfrentar este tipo de retos tecnológicos globales.

Dentro de la competencia hay diferentes aspectos a calificar, así como diversas categorías en las que participar, entre las más importantes está la de minería y la de diseño e innovación. Dentro de la de minería se califican aspectos técnicos como el peso del robot, la protección de los componentes, la cantidad de simulante BP-1 recolectado y depositado, aspectos energéticos, de seguridad, transferencia de datos eficiente y autonomía del robot. En la parte del diseño e innovación se califican aspectos como la eficiencia del robot al desplazarse, tecnologías usadas, innovación en los procesos como el de escavar o trasladarse, almacenamiento, depósito y visión artificial, también se califica el aspecto físico del robot y su manipulación.



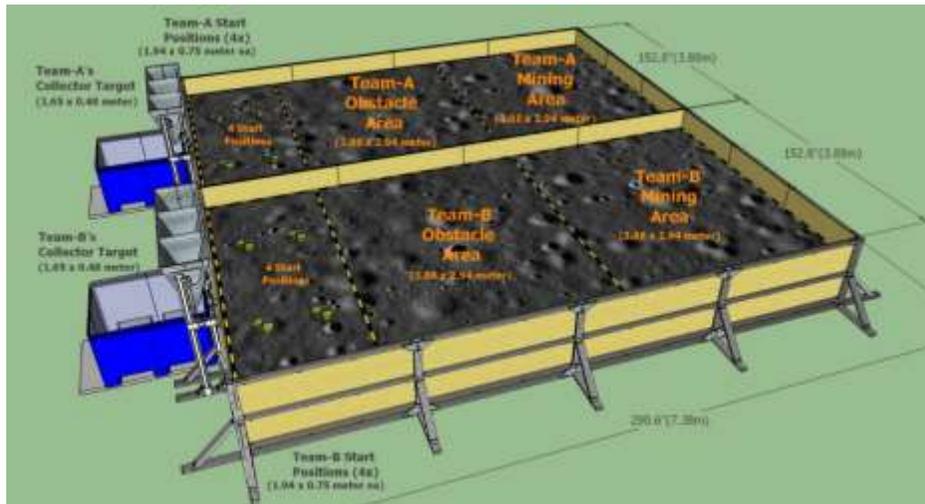


Imagen 3.2. Diagrama de la lunarena.

Durante 2 intentos de 10 minutos cada equipo tiene la oportunidad de recolectar la mayor cantidad de simulante lunar BP-1, transportarlo y depositarlo en el lugar asignado para que se pese el contenido del material recabado, cabe mencionar que se tienen que cumplir los tres objetivos para que la ronda se pueda tomar en cuenta.

Para poder iniciar con el proceso de diseño se tienen que conocer diferentes aspectos que la NASA especifica en una serie de requerimientos que se deben cumplir a plenitud para considerarse una posible solución viable. Se clasifican en varios rubros como se muestra en la imagen 3.3.

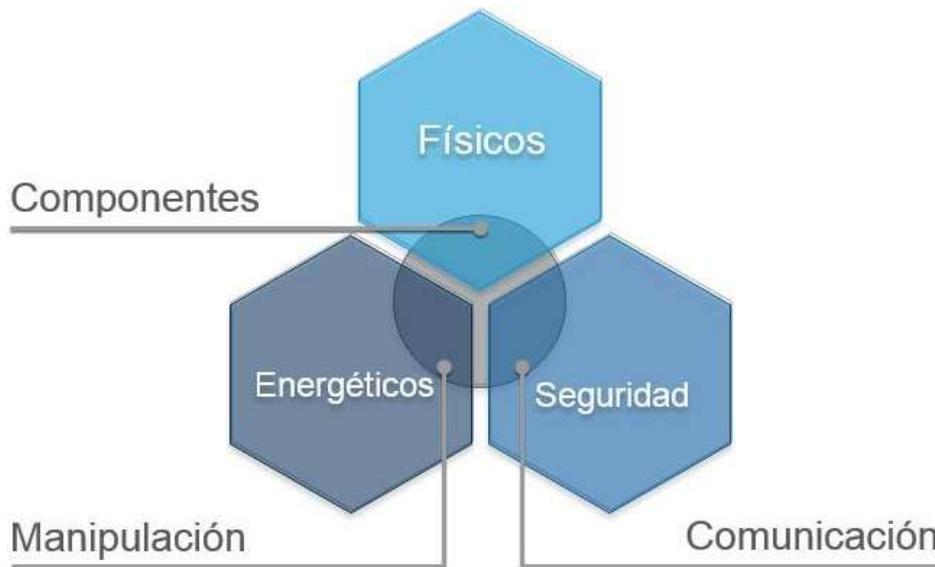


Imagen 3.3. Clasificación de los requerimientos.





Dentro de los aspectos físicos se incluyen las medidas máximas del tamaño del robot así como su peso máximo, ya que es muy importante considerarlo por el alto costo que tiene mandarlo al espacio también su manipulación en el descenso. Se tienen que tomar en cuenta materiales de alta resistencia pero que a su vez sean ligeros. Por otro lado la capacidad del robot para aprovechar al máximo sus habilidades de excavación, almacenamiento y movimiento con medidas restringidas.

- El robot debe excavar, transportar y depositar al menos 10 [Kg] de simulante lunar BP-1
- El robot no debe pesar más de 80 [Kg] en su totalidad
- El robot debe estar contenido en 1.5 [m] de largo x 0.75 [m] de ancho x 0.75 [m] de alto, al inicio de cada ronda.
- El robot puede expandir sus medidas al iniciar la ronda, solo respetando un máximo de 1.5 [m] de altura.

En los aspectos energéticos encontramos que se debe hacer eficiente el uso de la energía eléctrica ya que el robot no puede usar una fuente de energía permanente ni podría estar recargándose en alguna estación de carga, por lo tanto se debe desperdiciar lo menos posible de energía y también se debiera poder monitorear su consumo.

- El robot debe incluir su propia fuente de poder y esta debe estar considerada en el peso total del robot.
- La fuente de poder debe ser suficiente para suministrar energía para una ronda de 10 minutos con el pleno uso de todas las funciones.
- Al final de cada ronda el robot de ser apagado en su totalidad.
- La energía consumida por el robot de estar monitorizada.

Dentro de la seguridad existen varios aspectos a cubrir como la protección de materiales del robot que pueden ser dañados por lo abrasivo del simulante lunar BP-1, también protección de las baterías para no estar expuestas a radiación o a otras sustancias que puedan hacerlas inestables. Tener en cuenta casos de emergencia que se puedan presentar y poder apagar el sistema.

- El robot debe contar con un botón de paro en caso de emergencias. Que debe cortar la energía de todo el sistema instantáneamente.
- Debe contar con protección contra la abrasión del simulante BP-1, así como contra el polvo lunar.





- No se pueden usar procesos que puedan alterar física o químicamente las propiedades del simulante BP-1.
- Se puede utilizar tecnología láser mientras cumpla con la norma de seguridad A.

Los componentes que conforman el sistema no pueden ser deliberadamente elegidos ya que muchos materiales pueden dañar las muestras de BP-1 o bien por las condiciones físicas de la luna no se pueden usar, y aunque las condiciones del área donde se va a desempeñar el robot no son las mismas que las de la luna se tiene por objetivo simular en lo posible las variables de las condiciones del satélite natural de la tierra.

- No se podrán emplear mecanismos de proyectiles o artillería, el robot debe desplazarse sobre la superficie del simulante BP-1.
- Aunque se intenta hacer un prototipo para la luna sus componentes no deben ser certificados para el espacio (para ambientes de aspiración, electromagnéticos y térmicos).
- Se pueden usar baterías sellado de plomo (SLA), hidruro metálico de níquel (NiMH).
- Se pueden utilizar materiales plásticos o de goma. Pero no neumáticos que estén rellenos de aire o algún tipo de gas.
- Se pueden utilizar detectores de proximidad, sensores de efecto Hall. Pero no se pueden usar sensores ultrasónicos.
- Se pueden utilizar estructuras del tipo Honeybee, siempre y cuando sean seguras.
- Está prohibido el uso de sistemas hidráulicos. Sistemas que contengan agua, aspiración o refrigeración en un proceso.
- Está permitido el uso de la neumática siempre y cuando el robot tenga su propia fuente de aire.

Para poder manipular el robot se debe tomar en cuenta que debe poder moverse por diferentes superficies, debe poder ser capaz de sobrepasar o esquivar diferentes obstáculos como cráteres y rocas. También debe ser capaz de reaccionar y tomar decisiones por su cuenta por medio de una autonomía propia, o en su defecto poder ser teledirigido y poder manipular todas sus funciones.

- El robot puede ser completamente autónomo, semi autónomo, o teledirigido
- El robot de poder excavar, transportar y depositar un mínimo de 10 [Kg] de simulante BP-1 por cada ronda.
- El robot debe ser capaz de orientarse hacia el objetivo no importando la posición inicial.





- El robot debe de llegar a una zona destinada para poder empezar a excavar.
- El robot debe poder atravesar la zona de obstáculos que incluyen rocas de hasta 30 [cm] de diámetro y 10 [Kg] de peso, y también cráteres con diámetros variantes y hasta un máximo de 30 [cm] de profundidad puestos aleatoriamente. Y debe regresar para poder depositar el simulante BP-1 recolectado.
- El robot no puede salirse de los límites de la arena.
- Debe de depositar el simulante BP-1. En un recipiente a una altura de 0.5 [m].

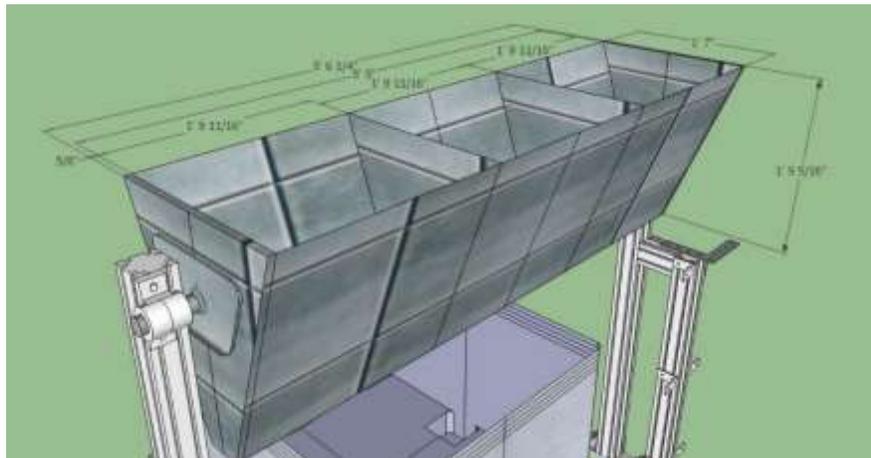


Imagen 3.4. Diagrama del recipiente del depósito.

La comunicación es de las cosas más importantes a tener en cuenta al diseñar el robot, pues se debe tomar a conciencia el retraso que hay en comunicaciones inalámbricas con el espacio, también debe considerarse el uso de la cantidad de transferencia de datos para una comunicación eficiente y estable. El recopilar datos acertados de sensores y otro tipo de información del robot es de alta importancia.

- Si se usa un sistema autónomo, solo se debe tener un botón de inicio y de paro.
- Se debe usar un sistema de comunicación WIFI en una red local.
- El centro de mando estará a una distancia de 15 [m] de la arena. Y a una altura de 2 [m] sobre el nivel de la tierra.
- Se debe de usar el protocolo estándar USA IEEE 802.11 b/g
- El promedio de ancho de banda no debe exceder los 5 [megabits/s]
- Habrá un retraso de 2 [s] en la comunicación con el robot





- Se usara una cámara fija dentro de la arena para la manipulación del robot.

Con los requerimientos dados por el cliente se establecieron requerimientos generales para poder concretar un objetivo en el diseño del robot, luego de analizarlos el robot en general debe contar con lo siguiente:

- Se requiere de un sistema semi-autónomo o completamente autónomo, que sea capaz de realizar una recolección de material mínima de 10kg.
- Depositar el material recolectado en un contenedor a 50 cm del nivel del suelo.
- Trayecto; la arena se divide en 3 partes, una de comienzo/deposito, posterior una de obstáculos y finalmente la zona de excavación.
- El sistema deberá de ser estable, ya que el perder el centro de gravedad y volcar podría significar el fin de la misión a realizar.
- Se requiere de un sistema de tracción capaz de no perder tracción en condiciones de simulante BP-1.
- El sistema deberá de ser capaz de detenerse en cualquier momento de manera manual, (botón de Alto Total en el robot).
- El sistema no deberá de exceder las siguientes dimensiones: 150x75x75 cm, y 80kg.
- El sistema deberá de ser preferentemente compacto y liviano para evitar problemas de movilidad.

Una vez identificados los requerimientos generales, se interpretaron con el fin de poder entender con mayor claridad las necesidades y requerimientos para el diseño del robot.

	Observación de los requerimientos	Interpretación
Función	El sistema deberá de ser capaz de detenerse en cualquier momento de manera manual, (botón de Alto Total en el robot).	Botón de Stop, para emergencias.
	Depositar el material recolectado en un contenedor a 50 cm del nivel del suelo.	El sistema de depósito del robot deberá alcanzar 50cm como mínimo.

Tabla3.1. Interpretación de los requerimientos generales.





	Se requiere de un sistema semi-autónomo o completamente autónomo, que sea capaz de realizar una recolección de material mínima de 10kg.	El sistema debe de realizar ciertas tareas de manera automática, dependiendo de la situación en la que se encuentre, y la capacidad mínima de excavación y transporte de material deberá de ser de 10kg.
	Trayecto a realizar; la arena se divide en 3 partes, una de comienzo/deposito, posterior una de obstáculos y finalmente la zona de excavación.	El robot no podrá excavar en el lugar de inicio, por lo que deberá recorrer las 3 partes de la arena, para excavar y posteriormente regresar con el material.
Condiciones	El sistema deberá de ser preferentemente compacto y liviano para evitar problemas de movilidad.	El sistema debe de ser compacto y no rebasar las medidas.
	El sistema no deberá de exceder las siguientes dimensiones: 150x75x75 cm, y 80kg.	
	El sistema deberá de ser estable, ya que el perder el centro de gravedad y volcar podría significar el fin de la misión a realizar.	El sistema puede llegar a volcar o enterrarse, por lo que se debe de tener un diseño que lo haga estable y confiable.
Calidad	Se requiere de un sistema de tracción capaz de no perder tracción en condiciones de simulante BP-1.	Deberá de ser confiable bajo condiciones de trabajo adversas.
	Deberá ser resistente para soportar las condiciones de trabajo.	Deberá de realizarse a bajo costo.
	Tratar de realizar el desarrollo y manufactura al menor costo posible, sin que esto afecte la calidad final.	

Se debe establecer una clasificación entre los requerimientos que se interpretaron como una función o restricción necesaria para que idealmente el robot pueda cumplir con sus objetivos y otra sección para los parámetros necesarios y específicos que el cliente en este caso la competencia "Lunabotics Mining Competition" ha pedido. Posteriormente se procesara la información para lograr una jerarquización de la importancia relativa de cada interpretación del requerimiento basada en la observación y análisis de las necesidades, objetivos y requerimientos provistos por el cliente. Se partió de que se consideraba más importante o esencial para el producto hasta lo que era irrelevante.





1. La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5. La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

Necesidades Funcionales	Importancia
Botón de Stop, para emergencias.	2
El robot deberá alcanzar 50cm como mínimo.	5
El sistema debe de realizar ciertas tareas de manera automática, dependiendo de la situación en la que se encuentre, y la capacidad mínima de excavación y transporte de material deberá de ser de 10kg.	3
El robot no podrá excavar en el lugar de inicio, por lo que deberá recorrer las 3 partes de la arena, para excavar y posteriormente regresar con el material.	5
El sistema debe de ser compacto y no rebasar las medidas.	5
El sistema puede llegar a volcar o enterrarse, por lo que se debe de tener un diseño que lo haga estable y confiable.	4
Deberá de ser confiable bajo condiciones de trabajo adversas.	3
Que se realice a bajo costo.	2

Tabla3.2. Jerarquización de las necesidades funcionales.





Parámetros		Importancia
1	Dimensiones menores a las especificadas.	5
2	El menor peso posible, menor al especificado.	5
3	No usar sistemas hidráulicos ni neumáticos.	2
4	No usar procesos que involucren oxígeno.	2
5	No desplazarse apoyándose de las paredes.	2
6	Excavar con eficiencia un mínimo especificado.	4
7	Realizar todo el ciclo de excavación en un tiempo determinado.	2
8	Abastecimiento energético propio.	3
9	Autonomía al mayor nivel posible.	2

Tabla3.3. Jerarquización de los parámetros a considerar.

Teniendo definidos los parámetros y las necesidades funcionales del robot podemos describir las especificaciones como las descripciones precisas de que tiene que hacer el robot, estas se establecen antes de entrar en la parte técnica y las restricciones como el tiempo y costo son totalmente consideradas a partir de identificar y determinar por completo las necesidades del cliente. Con los parámetros definidos se creó una tabla de métricas para poder hacerlos medibles y poder empezar la parte técnica del diseño del robot.





# de parámetro	Métrica	Jerarquización	Unidades
1	Valor máximo de dimensiones.	5	m
2	Valor máximo de peso.	5	g
7	Tiempo mínimo de ciclo de trabajo.	4	s
1,2	Rigidez mecánica del robot.	4	kN/m
6,7	Capacidad de excavación.	3	g/s
1,2	Costo de manufactura.	3	\$
7	Tiempo de ensamble/desensamble.	2	s
1,7	Herramientas especiales necesarias para mantenimiento.	1	Lista
7	Ciclos de trabajo antes de la falla.	3	Ciclos
6	Material depositado.	4	g
1,2	Resistencia a la corrosión del robot.	2	Tablas
5,7	Velocidad del robot.	2	m/s
1,2	Estabilidad Mecánica.	4	Subj
9	Autonomía.	3	Kbytes/s
8	Gasto energético.	3	Watts/s
1,7	Seguridad.	2	Fallas/ciclo

Tabla3.4. Métricas de los parámetros del robot.





A continuación se muestra en la matriz de necesidades funcionales y como se relacionan estas con los parámetros requeridos, así se puede modelar mejor los alcances del diseño y poder acercarse lo más posible a las necesidades de la competencia.

Necesidad	Parámetro									
	Botón de paro de emergencia	Deberá alcanzar 50cm como mínimo	Debe de realizar ciertas tareas de manera automática	Capacidad mínima debe ser de 10 [Kg]	No podrá excavar en el lugar de inicio.	Deberá recorrer las 3 partes de la arena	Debe de ser compacto	Debe de tener un diseño que lo haga estable	Deberá de ser confiable	Que se realice a bajo costo
Dimensiones menores a las especificadas.		.					.	.		
El menor peso posible									.	.
No usar sistemas hidráulicos ni neumáticos		.								
No usar procesos que involucren oxígeno		.								
No desplazarse apoyándose de las paredes			.			.				
Excavar con eficiencia un mínimo especificado				.	.					
Realizar ciclo de excavación en un tiempo determinado				.		.				
Abastecimiento energético propio	.									
Autonomía al mayor nivel posible			.							

Tabla 3.5. Matriz de relación entre los parámetros y las necesidades.





### III.I.II Experimentación

La experimentación es un método comúnmente empleado que consiste en el estudio de un fenómeno, reproducido generalmente en condiciones controladas o usualmente en el entorno natural del fenómeno, esta experimentación genera experiencia en el diseñador. La experiencia es una forma de conocimiento o habilidad que se derivan de la observación, participación o vivencia de un evento o fenómeno, que en el caso del proceso de diseño, la experimentación de la necesidad o de la problemática generara esa experiencia que brindara un mayor criterio y entendimiento del mismo.

Para el caso en concreto de este diseño, debido a que es muy complicado el realizar de primera mano experimentos de excavación en el satélite natural terrestre, lo que se decidió realizar son pruebas de laboratorio y pruebas de minería terrestre.

La primera parte de nuestra etapa para experimentar la excavación lunar consistió en pruebas de laboratorio, como resulta muy costoso el realizar pruebas con las condiciones de temperatura, presión y gravedad lunar, se decidió realizar una experimentación enfocada al suelo lunar. Para esto y con apoyo de la empresa DICA SA. de CV., obtuvimos completamente patrocinado 10 kg de simulante lunar JSC-1A de la empresa estadounidense Orbitec cuya composición es muy similar al simulante lunar que emplea la NASA (BP-1) y al suelo lunar. Con el simulante de suelo lunar y se realizaron pruebas (Imagen 3.5) para conocer tangiblemente el suelo lunar y generar experiencia para los nosotros, los diseñadores, con estas pruebas entendimos más a fondo la problemática de la alta compactación del suelo, su baja granulometría (tamaño de grano o de partículas) y la alta generación de polvo con su manipulación.



Imagen 3.5. Simulante de suelo lunar JSC-1A y pruebas de características.

Para la segunda parte de la experimentación y gracias al apoyo de la empresa Minera la Negra SA. de CV., se realizó una experimentación de las técnicas y características de la minería actual en el planeta, de la mano de expertos en minería. Para ello el equipo de diseño visito la mina en el estado de Querétaro (Imagen 3.6), México. Para conocer los procesos y características que se deben de tomar en cuenta en el proceso minero. Con esta actividad





se buscó enriquecer el panorama para la búsqueda de innovación y mejorar el proceso de diseño.



Imagen 3.6. Experimentación de minería actual en Minera la Negra, Querétaro México.

Esta etapa de experimentación sin duda alguna cambia la perspectiva del diseñador y sitúa de mejor manera las necesidades que se deben de considerar.

### III.I.III Observación

Nuestro mundo se expande muy rápido, cada vez hay más casas, más autos, más gente Y menos espacio donde ubicarlos, a la vez que la contaminación incrementa proporcionalmente. Esto no es algo nuevo desde el siglo XVIII Thomas Robert Malthus un economista inglés publicó un ensayo sobre el principio de la población en esta teoría Malthus expuso que las personas se reproducen más rápido que los alimentos y que cada 25 años la población se duplicaría llegando a su extinción por falta de alimentos a doscientos años de enunciada esta teoría, se puede afirmar claramente que la profecía de Malthus fue errónea. Por una parte, pasó por alto diversos frenos al Crecimiento de la población, como las modernas técnicas de control de natalidad. Por otro lado, subestimó el progreso de la tecnología agrícola. Pero, principalmente, las teorías de Malthus tenían errores metodológicos. Por ejemplo, a la conclusión del aumento de la población llegó más bien por intuición, ya que su postulado tiene un escaso respaldo empírico (se basó en estadísticas poco fiables de la población norteamericana). El segundo postulado sobre el lento Crecimiento de los alimentos no estaba respaldado en los hechos, ni siquiera en forma aproximada como la primera afirmación. Pero a pesar de estar incorrecta su teoría mucha gente se puso a pensar en qué tal si pasara algún día.

Esto conlleva a pensar como seres humanos que somos, la necesidad de sobrevivir porque de eso se trata siempre, expansión y sobrevivencia, a





pesar de que vivimos en un mundo muy grande en un futuro no muy lejano éste quedara pequeño bajo la mentalidad de algunos visionarios. Tal es el caso del físico ruso Konstantín Tsiolkovsky quien fue uno de los primeros en pensar en una colonización lunar. Angelo (2003).

Tsiolkovsky pensó que si se tuviera un acceso sencillo y relativamente barato al espacio, la humanidad podría extenderse por otros planetas evitando la superpoblación pronosticada por Malthus de tal forma que "La mejor parte de la Humanidad, con toda probabilidad, no perecerá nunca; migrarán de sol a sol mientras se alejan. Y así no habrá final para la vida, el intelecto y la perfección del hombre. Su progreso será eterno".

En sus quinientos trabajos sobre el espacio (de los cuales el más conocido es un tratado sobre cohetes "La exploración del espacio cósmico por medio de los motores de reacción" (1903), el matemático ruso determinó la velocidad de escape, propuso como mejor solución la utilización de cohetes por etapas impulsados por hidrógeno y oxígeno líquidos, estableció la ecuación que relacionaba la masa del cohete, la del combustible y la velocidad de propulsión, diseñó sistemas de guía, cohetes y cámaras presurizadas, imaginó los tipos de vida que podrían existir en ambientes escasos de oxígeno, especuló acerca de la colonización y la vida en el espacio, propuso la ya mencionada idea del ascensor espacial... si tenemos en cuenta que muchos de estos trabajos fueron escritos antes de que el primer avión efectuara su vuelo, no puede extrañar que Tsiolkovsky sea considerado, con toda justicia, el padre de la astronáutica. Angelo (2003).

Pero sus visionarias ideas no hallaron expresión únicamente en tratados técnicos. Desde el principio teorizó sobre el vuelo espacial y el viaje interplanetario en obras de ciencia-ficción, un medio que a sus ojos era perfecto para popularizar sus ideas más revolucionarias relacionadas con la transcendencia de la humanidad. Angelo (2003).



Imagen 3.7. Estacion espacial para la sobrevivencia imaginada por Tsiolkovsky 1920.





## III.11 Brainstorming “Origen”

El brainstorming origen como ya se mencionó con anterioridad, tiene el objeto de capturar el mayor número de ideas de soluciones potenciales únicamente con la información recabada con la experimentación de la necesidad, es decir que se vea influenciada en menor medida por ideas ya implementadas para la resolución de la necesidad. Esto con la finalidad de propiciar la creatividad desde este punto y tener un mayor número de ideas de soluciones potenciales a analizar. Estas ideas se analizarán más adelante y servirán de recurso creativo. El brainstorming se muestra en la Imagen 3.8.

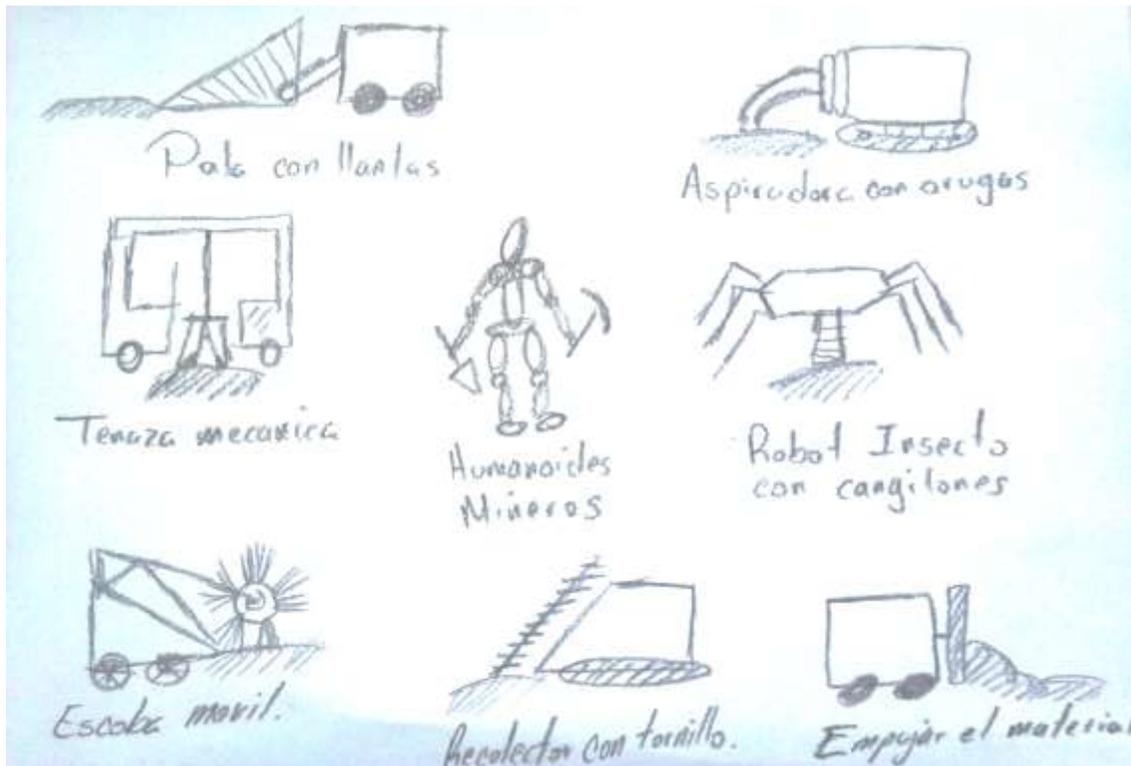


Imagen 3.8. Imágenes de las ideas obtenidas en el brainstorm inicial.

El brainstorm se delimita a ideas que pudiesen funcionar en el entorno lunar, debido a que metodologías de detonación de explosivos, con sistemas hidráulicos entre otras ideas resultaban no viables con la tecnología actual.





## III.III Investigación

### III.III.I Minería y excavación lunar.

El legado de los sistemas de excavación lunares es bastante limitado y se remonta a finales de 1960 y principios de 1970. Las herramientas de excavación incluyen palas, taladros, rastrillos y que muestreaban el suelo. Las cucharas o cangilones son muy útiles para recoger la tierra suelta, pero tienen el inconveniente inherente de no poder excavar en terrenos rocosos y tienen un grado de complicación en terrenos altamente compactados. Taladros, por otro lado, pueden penetrar incluso las rocas más duras conocidas por el hombre, sin embargo, pueden necesitar la recolección de muestras adicionales y mecanismos de transferencia del material además de no ser adecuados para recoger grandes cantidades del material.

#### III.III.I.I Cangilones lunares

Los primeros cangilones o palas desplegadas en la Luna fueron a bordo de la sonda espacial Surveyor. Estas sondas Surveyor se lanzaron entre 1966 y 1968 como precursores de la misión Apolo y para demostrar la viabilidad de un aterrizaje suave en la Luna (Imagen 6). De las siete misiones Surveyor, solo dos fallaron: Surveyor 2 se estrelló y Surveyor 4 perdió contacto.

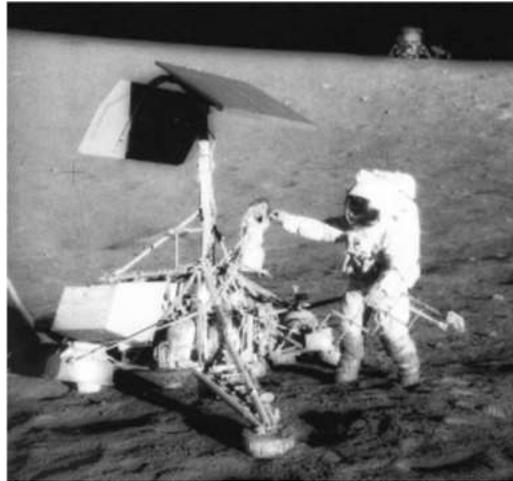


Imagen 3.9. La misión Apolo 12 alunizo cerca del Surveyor 3. En la imagen se aprecia a un astronauta en el Surveyor 3 y en el fondo la nave Apolo 12 (Fotografía: Kennedy Space Center, NASA).

Las siete naves espaciales Surveyor siguen en la Luna, aunque algunas partes (incluyendo una cámara) de Surveyor 3 fueron devueltos a la Tierra por los astronautas del Apolo 12.





El propósito del cangilón usado en la misión Surveyor (Imagen 7) fue para realizar experimentos geológicos en la superficie lunar, específicamente medir la fuerza de apoyo de la capa superior del suelo y también para cuantificar las fuerzas necesarias para realizar una excavación. El cangilón tenía dimensiones aproximadas de 12cm de largo y 5 cm de ancho, consistió en un contenedor y una cuchilla afilada. Este cangilón tenía la capacidad de almacenar un máximo de 100 cm<sup>3</sup> de regolito lunar y fue montado sobre un brazo de pantógrafo (mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos) con la capacidad de extenderse de 0 a 1.5 m. teniendo una libertad de mover el cangilón de 40° a -72° y ser elevado 13 cm, utilizando un motor eléctrico. Este sistema de excavación contaba con un sistema de almohadillas que buscaban realizar pruebas de rodamientos. Este sistema realizó siete pruebas de rodamiento, cuatro pruebas en zanja y trece ensayos de impacto. De hecho solo el Surveyor 3 y 7 lograron medir directamente la excavación real y las fuerzas necesarias para la excavación de zanjas. Empujando el cangilón hacia la nave mientras se empuja hacia abajo para cavar zanjas, se midieron las fuerzas de excavación (Zeng et al. 2010).



Imagen 3.10. Fotografía del cangilón del Surveyor 3 tomada por astronautas del Apolo 12.

El examen de la superficie lunar realizada por los astronautas del Apolo demostró que la capa superior de regolito lunar es bastante flojo. Por lo cual, desde el punto de vista de la excavación, tiene sentido solo el excavar la capa suelta del regolito en lugar de tratar de profundizar en el regolito compactado duro (Bucek et al. 2008).

### III.III.I.II Taladros lunares

Solo dos países lograron desplegar taladros en la Luna, que fueron los Estados Unidos y la Unión Soviética. El programa estadounidense Apolo uso a un astronauta para maniobrar un taladro de percusión rotatoria denominado





“Apollo Lunar Surface Drill” (ALSD), este sistema logro adquirir regolito compactado a una profundidad de hasta tres metros y desplegar dos sondas de flujo de calor a una profundidad de 2.4m (Imagen 8). El taladro fue fabricado por Martin Marietta, y fue uno de los primeros taladros inalámbricos que usan batería. El motor de accionamiento del taladro funcionaba con 23 Volts con una potencia de 430 Watts. Teniendo la capacidad de girar a 280 revoluciones por minuto y el sistema de rotomartillo dar 2270 golpes por minuto, entregando una fuerza de impacto de cada golpe de 4.4 Joules. Solo se utilizó este sistema ALSD en las últimas tres misiones del Apolo, 15, 16 y 17.



Imagen 3.11. Astronauta del Apolo practicando en el empleo del Apolo Lunar Surface Drill (Imagen: NASA).

Todo el paquete de perforación ALSD pesaba 13.4 kg. La perforación de un agujero en realidad era relativamente fácil y tenía un promedio de entre 5 a 15 minutos por agujero. Cada una de las misiones Apolo 15, 16 y 17 perforaron tres agujeros, dos para sondas de flujo de calor y uno para recolección de regolito.

Durante la primera misión de perforación, es decir, el Apolo 15, se encontraron problemas durante la perforación para una sonda de calor y una perforación para adquisición de regolito. En particular, los tubos de revestimiento carecían de estrías en las uniones del taladro y el vástago, lo que ocasiono que se impidiera la limpieza del denso regolito. Ambos tubos dejaron de penetrar en la profundidad de poco más de un metro. El vástago del Apolo 16 y 17 se rediseño para incluir un barreno continuo y permitir la limpieza del regolito. Después de esto, la perforación de 3 metros de profundidad fue bastante fácil, pero lo que se dificulto fue la extracción de los agujeros de los tubos de revestimiento.

El taladro para perforación de regolito en realidad se mantenía en un agujero mientras el resto de las tareas se completaban. Al final de la





segunda actividad extra vehicular ambos astronautas tuvieron que trabajar con el límite de sus fuerzas para tirar de la barra de perforación del agujero. El astronauta Scott, de hecho durante ese tiempo sufrió un esguince de hombro. La solución se consiguió con nuevo instrumental para la remoción de estos tubos de revestimiento en las misiones Apolo 16 y 17 (Imagen 9).

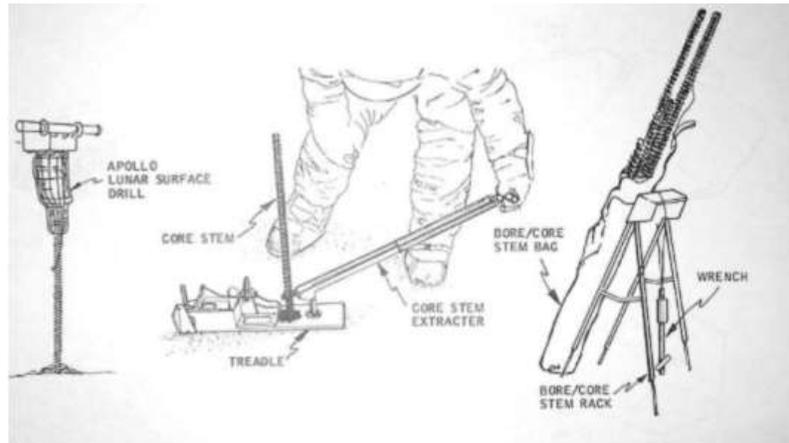


Imagen 3.12. Apollo Lunar Surface Boring y Coring Hardware (Imagen NASA)

Las tres misiones soviéticas Luna 16, 20 y 24 realizaron una hazaña que no se ha repetido hasta ahora. Las tres misiones consiguieron perforar el subsuelo, adquirir núcleos de regolito (regolito comprimido) y cada una de ellas regresar a la Tierra. Todo esto se realizó a principios de 1970 (Johnson 1979).

El taladro de Luna 16 perforo hasta una profundidad de 35 cm antes de encontrarse probablemente con una roca dura o fragmentos de roca. La columna de regolito en el tubo de revestimiento se transfirió al recipiente almacenador de las muestras y se selló herméticamente. Los 101 gramos de material recolectado fueron devueltos a la Tierra el 24 de septiembre de 1970. Luna 20 regreso con 30 gramos de muestras recogidas de manera similar en 1972.

En 1974 Luna 24, que fue la última nave espacial de las misiones Luna y la tercera en recuperar muestras de suelo lunar. Sin embargo, en lugar de poseer un corto brazo de perforación, poseía un taladro desplegable de 2m consiguiendo exitosamente recolectar y depositar 170.1 gramos de una profundidad de 1.6 m.

### III.III.I.III Tecnología de excavación lunar

A través de los años se han concebido docenas de proyectos de desarrollo tecnológico relacionados con la perforación y excavación planetaria. Muchos de estos sistemas desarrollados utilizan métodos empleados en las aplicaciones de minería y perforación terrestres, estos sistemas han sido





mejorados y rediseñados para hacer frente a las duras condiciones extraterrestres específicamente lunares (Mueller and van Susante 2011; van Susante and Dreyer 2010; Zacny and Bar-Cohen 2010c; Bar-Cohen and Zacny 2009; Zacny et al. 2008a; Bernold 1993). En la imagen 10 se puede ejemplificar, algunas excavadoras desarrolladas a lo largo de los años en la Escuela de Minas de Colorado. En esta sección se incluyen algunos ejemplos no solo de los enfoques más convencionales, sino algunos diseños más radicales que por diversas razones son muy adecuados para el ambiente lunar (van Susante and Dreyer 2010).



Imagen 3.13. Ejemplo de tipos de excavadoras lunares desarrolladas en la Escuela de Minas de Colorado (van Susante and Dreyer 2010).

#### III.III.I.IV The Moonbreaker (El deshace lunas)

El reciente descubrimiento de grandes de agua en forma de hielo, hace que se incremente el hambre por la exploración lunar. Esta agua puede ser extraída y procesada para separar el oxígeno y el hidrogeno para poder ser aprovechada como combustible para cohetes que podrían regresar a la Tierra o reducir el costo a más de la mitad de nuevas expediciones lunares. Esta idea indica que en algunos años podrían existir bases de reabastecimiento de la estación espacial internacional, satélites y naves espaciales. Podría hacer mucho más rentable debido a la menor gravedad lunar que requeriría mucha menor energía de envío e infraestructura, que la que se requiere actualmente en la Tierra.

Sin embargo, antes de enviar esas grandes misiones de creación de plantas de generación energética en sitio mediante el procesamiento del hielo y regolito lunar, es necesario primero enviar misiones de reconocimiento más pequeñas y menos costosas, cuyo objetivo debería ser el reconocimiento del suelo y confirmar los hallazgos orbitales. Estas misiones usarían taladros para penetrar la superficie al menos por un metro de profundidad para adquirir muestras para ser analizadas. Hay por lo menos dos proyectos de desarrollo de ingeniería lunar con el objetivo de generar un taladro que pueda ser utilizado eficazmente en la superficie lunar. El primero es un taladro para núcleos de regolito desarrollado por Northern Centre for Advanced Technology Inc. (NORCAT) que está financiado por la Agencia Espacial Canadiense. El segundo, llamado "Moonbreaker" está siendo desarrollado por Honeybee Robotics y es financiado por la NASA.





El “Moonbreaker” que se puede apreciar en la Imagen 11, es un sistema de rotación y percusión, basado en el sistema que tuvo éxito en la perforación del suelo lunar de la misión Apolo. La principal diferencia es que el Moonbreaker consume menor energía y no necesita la cabeza de perforación para ser contenido dentro de un tubo presurizado. La cabeza de perforación rotatoria fue encerrada dentro de un recipiente a presión, lleno de nitrógeno en forma de gas. Este nitrógeno en etapa gaseosa permite una disipación de calor y la lubricación de las piezas móviles. El Moonbreaker utiliza nuevos materiales (que no estaban disponibles en la década de los 60’s cuando el Apolo fue construido) y también utiliza nuevos lubricantes secos (Okon 2010).

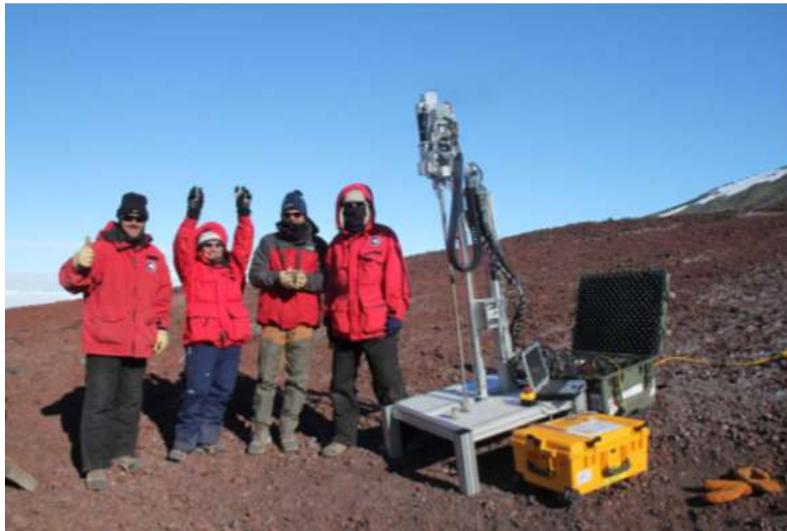


Imagen 3.14. Taladro rotativo y de percusión desarrollado por Honeybee Robotics probado en el Ártico.

Este diseño de broca posee una técnica que no adquiere los núcleos de regolito. En lugar de ello, los cortadores se desplazan hasta las estrías del barreno todo el camino hasta un sistema de muestreo donde caen a la entrada del instrumental de medición (Imagen 3.14). Aunque la extracción de un núcleo de regolito es científicamente más interesante que la obtención del núcleo cortado, es robóticamente más simple y por lo tanto más fiable.

En la misión Apolo se logró la obtención de núcleos de regolito que no fueron analizados en la Luna y cuyos sistemas de excavación utilizaron tubos independientes para evitar la pérdida de regolito y permitir el envío completo hacia la Tierra, donde se abrieron manualmente y se analizaron cuidadosamente (Bucek et al. 2008).





Imagen 3.15. El Moonbreaker permite el almacenamiento de regolito o el análisis directo del mismo

El taladro Moonbreaker ha sido probado en una cámara de vacío y en varios simulantes lunares, para su optimización y mejora continua. Datos de perforación revelaron que el Moonbreaker logro alcanzar una profundidad de un metro en una hora, empleando 100 Watts de potencia y 100 Newtons de fuerza (Paulsen et al. 2011).

Entre los principales logros, está la poca necesidad de empleo de fuerza para la perforación de rocas. Naturalmente, el dispositivo tiene que emplear más fuerza en la perforación de rocas duras que en las suaves. En la Tierra esto en realidad se da por sentado debido a que la gravedad es relativamente alta. Sin embargo, en la Luna, la misma plataforma de perforación sería solo capaz de proporcionar una fuerza seis veces menor. Por ejemplo, si una plataforma de perforación en la Tierra nos proporciona 600N, en la Luna nos proporcionaría solo 100N (seis veces menos) (Zacny et al. 2006). Esto es muy significativo, por lo que la solución ha sido el empleo utilizar taladros de percusión (en lugar de los puramente rotativos). Un taladro de percusión o también conocido como “Rotomartillo” no solo gira, sino que al igual que los martillos provoca intervalos de golpes en la roca, lo que facilita la fractura de la superficie. La desventaja que presenta este tipo de taladros de percusión es que requiere mayor energía de un taladro puramente rotativo, debido al empleo de un actuador adicional requerido para accionar el mecanismo de percusión. Sin embargo por la rapidez de perforación del taladro de percusión, este resulta mucho más eficiente.

Este taladro “Moonbreaker” fue montado en las laderas del monte Erebus, un volcán activo. La superficie de perforación estaba compuesta por depósitos glaciares y ceniza volcánica comprimida, lo cual lo vuelve una superficie muy similar a la del regolito lunar (Imagen 3.15.). Los depósitos glaciares se encontraban a una profundidad de entre 15 y 20 centímetros. El





Moonbreaker funcionó correctamente y logró la adquisición de muestras a un metro de profundidad en una hora.

Uno de los peligros del empleo del taladro en formaciones de hielo es que la perforación podría generar el calor necesario alrededor de la broca para descongelar el hielo y con la temperatura exterior se vuelva a congelar alrededor de la misma, atrapándolo en el agujero. Si esto ocurre, el taladro se pierde para siempre ya que al tratar de sacarlo lo más probable es que se rompa en lugar de liberarlo de la tierra helada. Por esa misma razón, el Moonbreaker tiene un sensor de temperatura incorporado en el interior. Este sensor supervisa las temperaturas durante el proceso de perforación y proporciona datos para el algoritmo. Si la temperatura aumenta demasiado, el algoritmo ralentiza el taladro o broca, en el caso extremo extrae completamente la broca y proporciona un periodo de enfriamiento a la misma fuera de la perforación (Paulsen et al. 2011).

El equipo del Moonbreaker ha realizado pruebas de la teleoperación desde California hasta la Antártica, donde estudiantes de 5º grado de la escuela Valley View consiguieron muestras de 30 cm de profundidad, demostrando la facilidad de la teleoperación, siendo exitosa hasta por estudiantes de quinto grado (Zacny 2011).

### III.III.I.V Excavadora lunar neumática

La misión soviética Lunokhod se declaró que llegó a su fin debido al polvo lunar (Chaikin 2004). Durante una de sus travesías el Lunokhod 2 descendió a un cráter angosto de unos 15 pies de ancho. Durante esta travesía la tapa abierta del robot contacto con la pared del cráter, raspando algo del polvo lunar en la misma. Cuando la tapa se cerró en la noche lunar, el polvo lunar se depositó en el radiador, que fue diseñado para proteger del calor del día lunar al robot. El polvo lunar combinado con el vacío forma un gran aislante térmico, por lo que cuando el robot Lunokhod 2 reanuda operaciones durante el día lunar este elevó su temperatura a tal punto que los componentes electrónicos dejaron de funcionar.

Por lo tanto, los mecanismos que operen en la superficie de la Luna tienen que ser tolerantes al polvo o de alguna manera sellados durante la Misión. El diseño y la construcción de un sistema de este tipo no sólo es difícil, sino también es cara y no se garantiza el éxito (Herman et al. 2011).

En la Tierra, las aspiradoras trabajan en ambientes con polvo y consiguen realizarlo muy bien. En realidad, están diseñados para recoger la suciedad y el polvo. La razón de su buen funcionamiento radica en el hecho de que utilizan aire y no un sistema mecánico, para mover partículas a través de grandes distancias (desde la boquilla hasta el recipiente de almacenamiento). No hay partes móviles involucradas en la recolección, solo un tubo con una entrada abierta a un costado y en el otro una bolsa en el lado opuesto. Las aspiradoras, por supuesto funcionan mediante el principio de diferencia de presión. La succión del lado de la bolsa de almacenaje,





provocan una presión menor a la exterior, provocando que el aire y el polvo o suciedad exterior sea “aspirado” a través de la boquilla y conducido por el tubo o manguera hacia el lugar de almacenaje (Zacny et al. 2004). Por supuesto una aspiradora de este tipo no podría cumplir su función en la Luna, debido a que no hay atmosfera para “aspirar”, sino más bien un extremadamente alto vacío. Sin embargo, ¿Por qué no en lugar de tratar de crear succión en la entrada de la boquilla, se crea una presión alta? Si una boquilla está lo suficientemente bien sellada, al inyectar gas se lograría acelerar las partículas del suelo a lo largo del tubo para conducir las al lugar de depósito. Un separador ciclónico como los que se utilizan en la Tierra conseguirían fácilmente separar las partículas del gas (Oravec 2009).

Una excavadora que opera basada en ese principio fue construida y probada en un simulador de suelo lunar y en el interior de una cámara de vacío. Este hardware de excavación neumática fue construido y montado sobre un mini rover K10, desarrollado por NASA Ames Research Center.

Durante la fase de desarrollo, se han desarrollado una serie de boquillas para identificar las características más significativas de la misma. La boquilla en realidad es el componente más crítico. El propósito de la boquilla es de evitar la salida del gas, mantenerse en el suelo y desplazar una parte del material lunar a través del el tubo. La idea era que el suelo restante en la entrada de la boquilla actuara como un enchufe y evitara que el gas se escape hacia el exterior. La configuración final de la boquilla funcionó muy bien y hubo casi nula pérdida de gas hacia el exterior (Imagen 3.16.). Se usó el separador de ciclón montado por encima del depósito del suelo para separar el gas de las partículas de regolito. Las partículas caerían al depósito de debajo mientras que el gas se purga hacia la cámara anterior. Este gas, sin embargo, podría ser capturado y reciclado de nuevo, haciendo el sistema aún más eficiente. La principal ventaja de este método de muestreo es que prácticamente no hay partes móviles. Un brazo de despliegue sólo tiene que bajar la boquilla en el suelo, y la acción restante de recoger del suelo se realiza con gas.

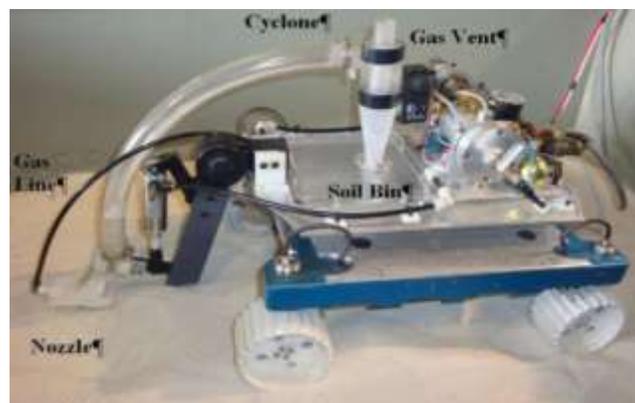


Imagen 3.16. Excavadora Lunar Neumática, fase de pruebas dentro de cámara de vacío (Zacny et al. 2008b).





La eficiencia del sistema neumático también se ensayó durante vuelos de microgravedad. El experimento se diseñó para medir la masa de las partículas del suelo levantadas como una función de la presión del gas y la masa del gas. Una gran cámara de vacío se monta en el interior del avión para permitir la prueba en ambas condiciones, de vacío y de gravedad lunar. Los datos de las pruebas revelaron que sólo un gramo de gas a 7 psi (es decir 50 % de la presión atmosférica) podría desplazar 6000 gramos de simulante de suelo lunar a velocidades de alrededor de 5 m/s (Zacny et al. 2010a). De esta manera, con un kilogramo de gas a 7 psi se podría obtener, alrededor de 6 toneladas de suelo lunar.

Estos altos rendimientos se atribuyen principalmente a la condición de vacío y la gravedad más baja. En el vacío, la velocidad de salida del gas es proporcional a una relación de presión entre la presión del cilindro y la presión en el exterior. Si la presión en el exterior es prácticamente cero (es decir, vacío), la velocidad de salida alcanza una alta velocidad. Dado que el impulso del gas es proporcional a la velocidad, el alto dinamismo de las partículas de gas que consiguen que al salir de un tanque de presión en vacío se intercambien con las partículas del suelo, esto literalmente provoca que sean propulsados a distancia (Sullivan et al. 1993).

El beneficio de gas a presión en vacío ha sido ya aplicado a los propulsores de cohetes. Una serie de propulsores de gas frío están reemplazando a los propulsores de convencionales para el control de altitud, por ejemplo, el gas frío es un propulsor de cohete que utiliza un gas (típicamente inerte) como la masa de reacción. Estos propulsores de gas frío se utilizan principalmente debido a su simplicidad y fiabilidad, consisten en un tanque de gas a presión, una válvula, y una boquilla. Por lo tanto no hay muchos elementos que puedan fallar.

Aunque el gas puede ser visto como consumible, hay una serie de potenciales fuentes de gas en la Luna, haciendo de este enfoque bastante sostenible. Además, hay una serie de subproductos en las reacciones de sinterización y obtención del gas, y éstos podrían ser utilizados para la minería u otras actividades. Por lo tanto, este enfoque particular, sería no sólo es eficaz sino también sostenible.

### III.III.I.VI Excavadoras lunares de percusión

En la actualidad la minería es una de las actividades más importante en nuestro planeta y se ha desarrollado tecnología en estos campos. Excavadoras terrestres, tales como retroexcavadoras, usan la fuerza bruta para excavar, excavadoras más grandes son utilizadas para suelos duros e incluso rocas, mientras que las excavadoras más pequeñas se usan para suelos blandos. Sin embargo este tipo de tecnología y maquinaria no es un enfoque que se considere muy viable para usar en la Luna que tiene una sexta parte de la gravedad terrestre (Bernold 1993). Además que transportar ese tipo de maquinaria sería excesivamente caro. Una alternativa al uso de





la fuerza bruta, es el empleo de sistemas de percusión. Las excavadoras de percusión tienen la capacidad de excavar el suelo usando hasta 95% menos de fuerza (Zacny et al. 2008c). Esto se traduce en una gran reducción en la masa de la excavadora. Otros también han encontrado que la vibración de las palas bulldozer ha conseguido reducir la fuerza de tracción de hasta 93% (Shabo et al. 1998).

(Lin et al., 1994) El principio detrás de reducción de la fuerza es, de hecho, que los sistemas de percusión tienden a transmitir vibraciones al suelo que está en contacto con la cuchilla. Esto reduce en gran medida la fricción entre la hoja y las partículas del suelo. Además, al vibrar las partículas del suelo tienen menor densidad ya a su vez pueden reorganizarse más fácil que las partículas compactadas. El efecto de la densidad es bastante considerable.

Como con cualquier enfoque, hay ventajas y desventajas. La ventaja del sistema de percusión está claro. Las fuerzas de excavación requeridas son más bajas, la masa total de la excavadora disminuye considerablemente, menor masa en el lanzamiento, requiere un cohete más pequeño, cohete menos costoso, disminución en los costos generales de la misión. La principal desventaja de una excavadora de percusión o vibración es que requiere energía adicional para ejecutar el motor de percusión y que necesita otro mecanismo (el mecanismo de percusión), lo que implica un elemento más que como cualquier elemento puede presentar fallas. Para hacer frente a un riesgo potencial de perder a un actuador de percusión, valdría la pena tener un sistema redundante (es decir, contar con dos actuadores para la misma función, contando que el segundo pueda hacerse cargo una vez que falle el primario).

### **III.III.II Benchmarking.**

El estudio de Benchmarking se refiere a comparar enfocada mente un diseño o proceso y algunas métricas con los mejores productos de la industria con sus ventajas y desventajas, en el caso de la competencia serian robots que estén participando en esta. Las métricas más comunes son calidad, tiempo y costo. El benchmarking nos permitiría a nosotros como diseñadores ver las ventajas de algunos diseños y poder mejorar los nuestros. Dentro del estudio de Benchmarking que se realizó de la competencia Lunabotics Mining Competition, se analizaron 4 de los mejores robots de la competencia.

El primer diseño a evaluar es el robot diseñado por Alabama University el cual consta de un rover con cuatro llantas diferenciales giratorias, esto quiere decir que cada llanta puede girar en referencia al centro de masa del motor hasta 90 grados mediante dos motores y una configuración de engranes dándole libertad al robot para moverse tanto de atrás hacia adelante como de derecha a izquierda, esto da una gran ventaja para evitar





obstáculos o trasladarse más rápidamente sin necesidad de describir una trayectoria curva al evadir obstáculos. También podría presentarse una desventaja ya que se usarían por lo menos 2 motores más que representan más peso a la vez que tardaría más en estar cambiando las ruedas de dirección cada vez que se necesite.

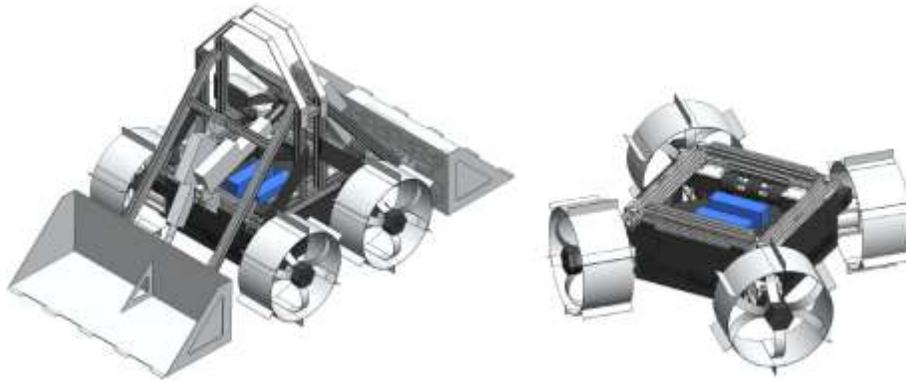


Imagen 3.17. Robot diseñador por Alabama University (izquierda), Diseño de tracción modular (derecha).

Otro Punto a destacar del robot de Alabama University es la excavadora; cuenta con una excavadora de doble pala, una al frente y una por detrás, esto da una ventaja muy grande para excavar grandes cantidades en poco tiempo, además que balancea el peso añadido por una de las palas con el contrapeso de la otra suponiendo que cada una cargue lo mismo, esto ayuda a recuperar la posición del centro de masa, para que no llegue a volcarse. Para poder realizar una doble excavación para una pala de gran tamaño se requiere mucha fuerza tanto en los motores como el actuador lineal que se usa en cada una de ellas. Otra observación es el hecho de que transportaría las muestras del simulante BP-1 recogidas en las mismas palas, pudiendo llegar a ser inestable o a no poder llegar al depósito con todo su contenido.

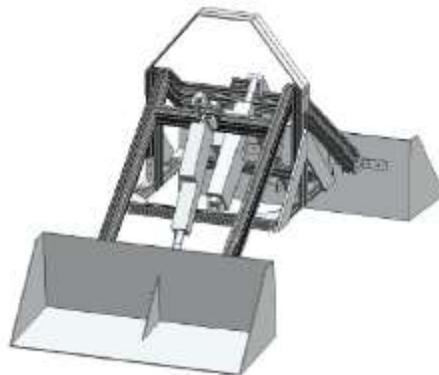


Imagen 3.18. Excavadora de doble pala modular diseñada por Alabama University





Dentro del sistema de tracción otro de sus fuertes son las llantas hechas de una lámina de aluminio con plástico ABS, tiene dos rines en espiral que absorben la energía para ayudar en la suspensión, cada llanta tiene 6 paletas distribuidas a 60° para obtener más tracción. Por el tipo de materiales usados en las llantas se obtiene buena resistencia y son muy ligeras a vez ya que están huecas. Su desventaja es que aunque tienen paletas estas podrían estar muy separadas respecto a las otras pudiendo llegar a derraparse sobre el simulante BP-1.

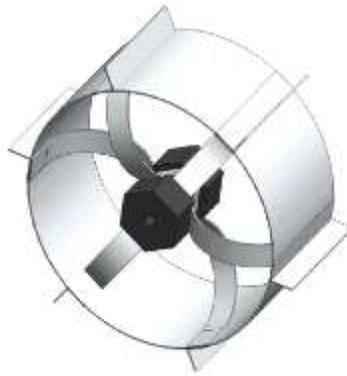


Imagen 3.19. Modelo de las llantas usadas por el robot de Alabama University

Se observa un modelo con amplias ventajas en cuanto a la tracción, robusto y de fácil maniobra, su excavadora teóricamente tiene capacidades limitadas a las dos palas, solo puede excavar una sola vez y regresar. No se asegura que se deposite el 100 % del material excavado, además de que podría obstaculizar la visibilidad si se intenta un modelo autónomo.

	Ventajas	Desventajas
Tracción	Puede cambiar de dirección fácilmente con solo girar las llantas 90°.	Podría ser lento el cambio de dirección.
Suspensión	En las mismas llantas contiene 2 rines curvos que ayudan a tener un poco de suspensión.	No contiene un sistema de suspensión definido.
Excavación	Tiene una doble excavadora lo que amplía el margen de excavación y balancea el centro de masa	Las palas son muy rectas quizá no llegando a excavar el 100% del volumen. No se sabe si tienen la fuerza suficiente para usar unas palas tan grandes.





Almacenamiento	No ocupa sistema de almacenamiento ya que en la misma pala se almacenara el material.	No se asegura que con el movimiento al regreso no tire el contenido de la pala.
Deposito	Con voltear la pala puede depositar su contenido.	Tiene que girarse 180° para depositar el contenido de las dos palas.
Autonomía	No cuenta con sistema Autónomo	Si se quisiera implementar la excavadora podría tapar la visibilidad de la visión de los sensores.

Tabla 3.6. Características del robot de la Universidad de Alabama.

En este segundo diseño elaborado por West Virginia se distingue por su excavadora de amplia pala para recolectar y su mecanismo de volcado para el deposito combinando dos sistemas muy eficientes en la industria. Para poder excavar a profundidad y aprovechar al máximo su sistema se requiere de la potencia total de sus cuatro motores, tiene la ventaja de al estar tan amplia y alta su pala puede usarla como apoyo en caso de una volcadura. En su sistema de depósito se aprovecha el mecanismo de 4 barras para verter su contenido a 90 grados.



Imagen 3.20. Robot de excavación de la Universidad de West Virginia





Su sistema de tracción está formado por 4 llantas de lámina de aluminio con una banda de rodadura también en aluminio para tener mejor tracción. Cuenta con dos estrellas de 5 picos como rines para darle robustez. Sin embargo al ser toda de aluminio no le proporciona un buen agarre para terrenos como el simulante BP-1. Al querer imprimir la fuerza para que la excavadora recolecte lo mayor posible pudiera ganarle el peso o en un escenario menos favorable se entieren las llantas en el suelo al girar sobre su propio eje sin poder avanzar.



Imagen 3.21. Llantas del robot de West Virginia University.

En conclusión; se encuentra un diseño robusto aunque inestable en la forma de excavar, con amplia capacidad de almacenamiento y un sistema simple pero efectivo de depósito. Se observa un sistema burdo de tracción pudiendo hacer que patinen sus llantas debido a que no cuenta con algún revestimiento en el aluminio.

	Ventajas	Desventajas
Tracción	Cuenta con 4 motores potentes para excavar y avanzar.	No tiene un material para poder tener mejor tracción y garantizar que no van a patinar las llantas.
Suspensión	No cuenta con suspensión.	Al no tener sistema de suspensión las llantas absorben toda la fuerza ejercida.
Excavación	Cuenta con una pala amplia con mucha capacidad.	Requiere de mucha fuerza en los motores para poder excavar
Almacenamiento	Su sistema de almacenamiento es amplio y seguro.	Al solo ser una caja genera mucho polvo.
Deposito	Su mecanismo de depósito es simple y asegura verter todo el contenido.	Usa cadenas lo que pudiera estropear su funcionamiento con el polvo generado.
Autonomía	No cuenta con sistema Autónomo	No se dejó un espacio que tenga la visibilidad suficiente para implementarse.

Tabla 3.7. Relación de ventajas y desventajas del diseño de West Virginia.





El robot diseñado por Polytechnic Institute of New York University está hecho de aluminio con 4 pequeñas llantas, dos con forma de rejilla y dos sólidas, estas últimas funcionan para poder generar tracción y las delanteras en forma de rejillas para poder tener mejor maniobrabilidad.



Imagen 3.22. Robot atlas02 diseñado por el NYU poly.

Cuenta con un tambor de excavación retraible, el cual consiste en 8 cangilones de plástico ABC hechos por una impresora 3D, que giran alrededor del tambor apoyados en un exoesqueleto y va recolectando material para luego depositarlo en el tambor. Una vez que esté lleno se extiende el tambor por medio de un brazo para ser depositado el material. El cual puede ser un punto desfavorable ya que al extenderse cambiaría su centro de masa y probablemente volcaría.



Imagen 3.23. Sistema de excavación del Robot hecho por el NYU poly.





El chasis esta hecho de plaquetas de aluminio lo que provoca que tenga un poco de exceso en material y su estructura no sea muy robusta. Cuenta con una cámara en el lateral lo que puede ayudar a su manipulación.

	Ventajas	Desventajas
Tracción	Cuenta con 2 llantas que dan tracción y 2 que ayudan a la maniobrabilidad	Son muy pequeñas y podrían no tener suficiente fuerza.
Suspensión	No cuenta con suspensión.	Al no tener sistema de suspensión las llantas absorben toda la fuerza ejercida.
Excavación	Es un sistema innovador de excavación continua y asegura una excavación uniforme.	El sistema está limitado al tamaño de los cangilones y la velocidad optima de recolección.
Almacenamiento	El robot auto almacena al ir recolectando material, es seguro y no produce polvo.	El volumen está limitado por la altura del tambor.
Deposito	Su mecanismo retráctil puede depositar por completo el material.	El tambor al extenderse puede modificar el centro masa dependiendo de la cantidad que almacena.
Autonomía	Cuenta con una cámara a un costado que pudiera mejorar su manipulación.	Haría falta un sensor complementario para poder ubicarse.

Tabla 3.8 Relación de ventajas y desventajas del diseño de NYU.

Iowa State University desarrollo un robot con una tracción compuesta por dos orugas cada una con una banda y trozos de aluminio añadidos a ella, con siete puntos de apoyo en forma triangular. Esta forma de traslación es las que brinda mejor tracción aunque lo hace un poco más lento. La forma triangular también le da mucha estabilidad sobre todo cuando los terrenos no son uniformes así puede omitirse un sistema de suspensión y seguir siendo estable y poder inclusive pasar sobre algunos obstáculos.





Imagen 3.24. Robot diseñador por Iowa State University (izquierda), Diseño de tracción por orugas (derecha).

El sistema de excavación está formado por un conjunto de cangilones que giran en una banda, mientras en la parte de abajo está excavando cuando llega a la parte de arriba deposita el material en una caja de esta forma siempre está excavando pequeñas cantidades uniformemente. En el sistema de vaciado el robot voltea el almacenamiento por medio de un mecanismo de cuatro barras el cual impulsa a la altura del depósito y gracias al sistema de orugas este se mantiene estable.



Imagen 3.25. Sistema de depósito del Robot diseñador por Iowa State University.

En conclusión este robot tiene muy buena estabilidad tanto es su forma de trasladarse como en el modo de excavación y depósito. Al tener mayor estabilidad pierde velocidad, y la capacidad de su excavación depende mucho de la velocidad en la que excava lo cual podría ser lento para recolectar grandes cantidades de material.





	Ventajas	Desventajas
Tracción	Tiene dos orugas que proveen estabilidad en cualquier terreno.	La tracción es lenta.
Suspensión	No cuenta con suspensión pero al tener orugas no requiere suspensión	Se moverá bruscamente por superficies diferentes.
Excavación	Es un sistema de excavación continua por cangilones, estable y segura.	El sistema de excavación podría ser lenta al estar limitada por la velocidad de excavación.
Almacenamiento	El almacenamiento tiene protección, ayuda a no generar polvo y cuenta con un ángulo que ayuda al depósito a vaciar más fácilmente.	Al tener un ángulo interior disminuye la capacidad de almacenamiento.
Deposito	El mecanismo de depósito ayuda a extenderse por completo casi a 45° ya la altura necesaria para superar la barrera del recipiente de depósito.	El depósito requiere de 4 actuadores lineales muy potentes para poder subir el sistema de almacenamiento.
Autonomía	No cuenta con sistema de autonomía.	Si se quisiera implementar un sistema tendría que moverse relativamente cuando se activa el sistema de depósito.

Tabla 3.9. Relación de ventajas y desventajas del diseño de Iowa State University.





## Capítulo IV.

### Etapa Creativa.





La etapa creativa es la fase donde se le presenta la problemática a la mente con claridad (enriquecida con la investigación y la experiencia), para generar con estas estructuras una idea, concepto, noción o esquema según las líneas convencionales o las no convencionales. La creatividad es la capacidad de crear, producir cosas nuevas y valiosas, es la capacidad de un cerebro para llegar a conclusiones nuevas y resolver problemas de una forma original. Siempre con la apertura mental de observar nuevas posibilidades.

Como se mencionó con anterioridad, esta etapa consiste en una de las más importantes dentro el modelo de metodología de diseño propuesta. Debido que esta etapa se creó para buscar la innovación en el diseño y con esta innovación incrementar la competitividad de los productos y mejorar sus características. Esta fase presente una serie de ciclos creativos que conforme se avanza en el número de ciclos se aumenta el entendimiento de la problemática y las ideas respecto a la misma. Estos denominados ciclos creativos comienzan con una lluvia de ideas (Brainstorming) seguido de la elaboración de un prototipo y pruebas del mismo que finalmente entrega una conclusión o una redefinición de la necesidad usando como elementos el conocimiento adquiridos durante estos bucles. El número de reiteraciones dependerá de cuando los diseñadores hayan generado las innovaciones suficientes o de acuerdo a la planificación temporal del proyecto.

## IV.1 Ciclo creativo 1

### IV.I.I Brainstorming.

A las ideas de este Brainstorming, se le sumaran las adquiridas en el denominado Brainstorming origen.

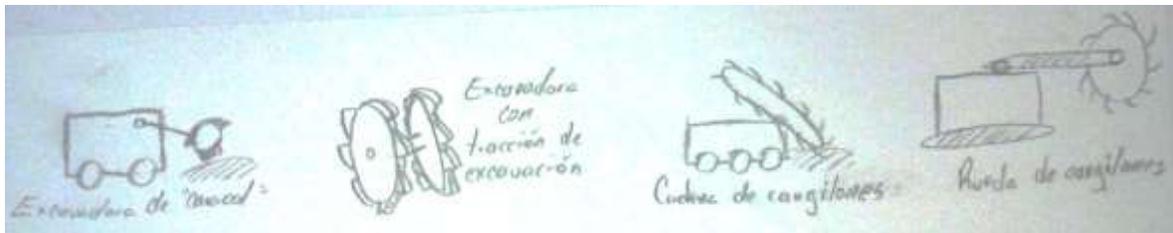


Imagen 4.1. Brainstorm del primer ciclo creativo.





#### IV.I.II Prototipo 1 "Lucy".

Al integrar la reciente lluvia de ideas y del Brainstorming origen es necesario el debate y seleccionar una idea general para realizar un prototipo de función crítica, este prototipo es un modelo elemental que ayuda a mostrar las características y patrones de comportamiento, además de verificar si esta idea cumple o no las funciones que se cree que cumplirá, aunado a aprender de la problemática más a fondo.

En primera instancia se seleccionó la idea de cadena de cangilones, con un almacenamiento dentro del robot y un método tradicional de llantas para transportarse. Esta selección se basó en las características más empleadas en sistemas probados y empleados en minería terrestre.

Las cadenas de cangilones (Imagen 4.2) son sistemas muy empleados en la industria minera y en la de productos a granel para transportar materiales, son una serie de contenedores con una geometría específicamente diseñada a la aplicación, que permite el almacenamiento de algún material a transportar. Estos contenedores denominados cangilones están unidos a un elemento generalmente flexible cuya función es transmitir el movimiento para transportar estos contenedores y verterlos de un sitio determinado a otro.

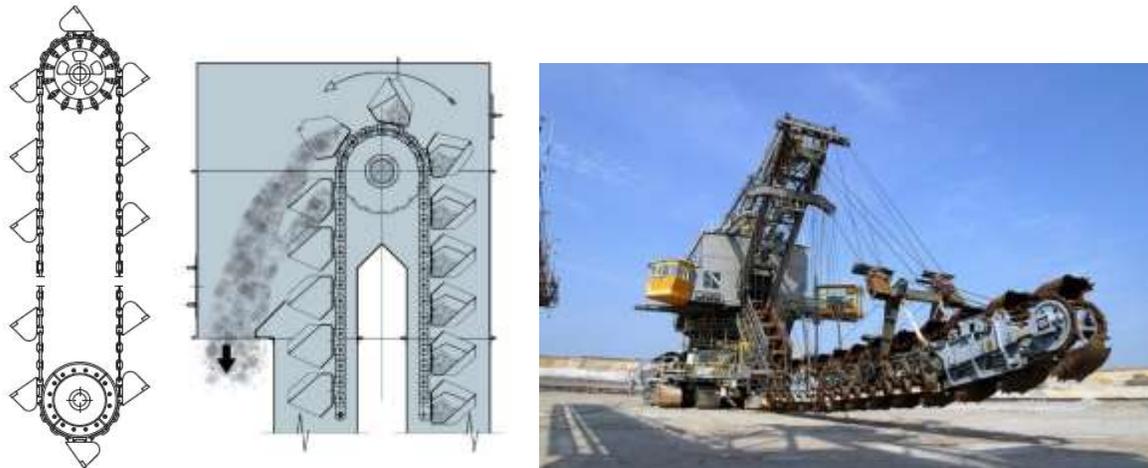


Imagen 4.2. Cadenas de cangilones y su empleo en minería a cielo abierto.

Aunado a la selección del sistema de la forma de excavar definida como la cadena de cangilones, la manera de desplazar al robot móvil, que se decidió fue el utilizar sistemas de ruedas o llantas, esta selección se realizó debido a que este modo de desplazamiento es el más común en los sistemas terrestres y también empleado en el desplazamiento de robots espaciales. Para verter el material se decidió implementar un sistema que permitiera elevar el depósito de almacenamiento de regolito lunar e inclinarlo con el empleo de elevadores de tijera. Que de igual manera se incluye en el prototipo.





Con estas dos ideas elementales de como desplazar el robot y como realizar la función de excavación, se realizó el primer prototipo, llamado “Lucy” (Imagen 4.3), este prototipo funcional fue realizado en dos días y con material de reciclaje. Como componentes esenciales y como se puede apreciar en la imagen 4.3, se realizó el sistema de cadena de cangilones con latas unidas a cadenas de bicicletas, con un chasis conformado con residuos de láminas y perfiles que constituían un sistema de almacenamiento y un espacio específico para posicionar las ruedas del prototipo

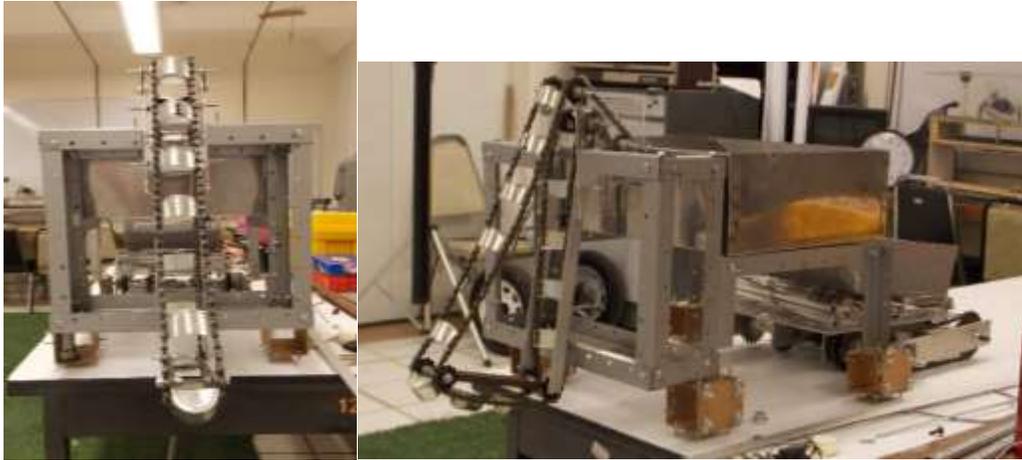


Imagen 4.3. Primer prototipo funcional “Lucy”.

Las llantas que se emplearon fueron reutilizadas de un patinete, cabe resaltar que la selección de los materiales seleccionados, fue debido a la practicidad de su empleo y además para un ahorro de recursos tanto naturales, económicos y de tiempo. Aunado a esto también se realizó el prototipo de una tarjeta PCB (Printed Circuit Board) que se diseñó con el propósito de controlar los motores (Imagen 4.4), los dos motores empleados fueron eléctricos de corriente directa de 12V. Ya que la finalidad de estos prototipos no es tener un robot funcional al 100%, solamente lo suficiente para poner a prueba el principio de funcionamiento del mismo, comprender de mejor manera el mismo, así como el desarrollo del fenómeno.



Imagen 4.4. Prototipo de la tarjeta controladora de motores.





#### IV.I.III Pruebas.

Posterior a la realización del prototipo, se realizaron pruebas a los sistemas, las pruebas se realizaron independientemente (una por sistema) con el simulante de suelo lunar JSC-1A de la empresa Orbitec y una en conjunto.



Imagen 4.5. Prueba de llantas en el simulante lunar.

El sistema de tracción que consistió en un par de llantas de 25.3 g y 45 mm de diámetro, sin banda de rodadura específica y manufacturadas de polímero, fue probado con tres pruebas básicas, una que demostraba como el suelo se comprimía al efecto de diferentes cargas en el área de contacto de la llanta y el polímero. Esta prueba de hundimiento se ve reflejada en la siguiente tabla:

Fuerza aplicada en la llanta [N]	Hundimiento [cm]
1.5	0.02
3	0.05
8.5	0.1
12.5	0.2
40	0.4
120	0.8
220	1
400	1.1

Tabla 4.1. Resultados de pruebas a llantas.

Además de las pruebas de hundimiento se realizó una prueba de desplazamiento, es decir de cómo es que se comportaba la llanta al desplazarse por el material, que únicamente se reflejó en el conocimiento de los diseñadores y por ultimo a una prueba de “derrape” con el propósito de observar cómo se comportaba la llanta cuando se derrapaba o no conseguía la adherencia al suelo suficiente para conseguir la fricción para moverse y además para observar la cantidad y efectos del polvo en la misma.





La segunda prueba que se realizó fue a la cadena de cangilones (Imagen 4.6), la prueba consistió en poner a en funcionamiento el sistema con el simulante lunar y observar y cuantificar cuanto material era capaz de recolectar el sistema minero.



Imagen 4.6. Pruebas realizadas al método de excavación con cadena de cangilones

Los resultados de las pruebas son los siguientes:

Masa aproximada del sistema [kg]	1.756
Voltaje de Operación [V]	6
Velocidad de excavación [kg/min]	21.34

Tabla 4.2. Resultado de pruebas a excavación con cadena de cangilones.

Otro sistema del cual se realizó prototipo y se probó, fue el sistema de elevación del sistema de almacenamiento del material lunar y se desarrolló mediante un sistema de elevadores de tijera (Imagen 4.7), para este sistema lo que se buscaba probar era la dificultad de manufactura, la fiabilidad y conocer más a fondo sus características funcionales.



Imagen 4.7. Prueba del sistema de elevadores de tijera





Aunado a esto, se realizó una prueba en conjunto, para analizar cómo es que se comportaba dinámicamente el robot. Esta prueba se realizó en asfalto debido a que no se contaba con el suficiente material para realizar pruebas en el simulante lunar.



Imagen 4.8. Prueba conjunta del prototipo "Lucy".

#### IV.I.IV Conclusiones

Después de realizar el prototipo y las pruebas del mismo, se tiene una perspectiva completamente nueva de la problemática, particularmente el comportamiento de los sistemas en el simulante lunar varía mucho, debido a las características del propio simulante. En gran medida a su diminuto tamaño de grano y a su alta densidad, lo cual lo hace poseer cualidades diferentes a las que se presenta en los materiales comúnmente usados en el planeta.

Como primera conclusión con el uso del simulante lunar, aunque es muy compresible, es de muy fácil desprendimiento, en otras palabras, con una pequeña cantidad de fuerza, el regolito lunar se desprende y genera gran cantidad de polvo. Este fácil desprendimiento dificulta la tracción con las llantas, debido a que suele derraparse y hundirse, de acuerdo al resultado del experimento realizado aplicando carga a las llantas, se puede apreciar que el hundimiento no es mucho con grandes cargas, esto se debe a como ya se mencionó el pequeño tamaño del grano de regolito lunar, lo cual genera una semi-compresión natural por los pocos espacios donde hay aire en el material, con esta característica y aunado a una área de contacto





apropiada, se puede confiar que no habrá hundimiento. Respecto a las otras dos pruebas de las llantas, la de rodamiento, se logró aprender que las llantas funcionan con bastante naturalidad, se comportan muy similarmente a las llantas de los vehículos que se desplazan por playas o dunas. Por ello se consideró que el desplazamiento de las llantas es bueno, si se tiene en consideración la siguiente prueba, que fue la prueba de derrape.

En la prueba de derrape la llanta fue conectada a un motor mediante un transmisor de potencia, con el cual se variaban las velocidades y los torques además de la fuerza aplicada a la llanta para analizar el comportamiento del giro de la llanta, en estas pruebas se pudo aprender tres grandes factores que marcan la diferencia entre un excelente agarre de la llanta o un atascamiento del vehículo: la velocidad del giro de la llanta aunado al par ejercido, la banda de rodadura y la fuerza con la que está sujeta al suelo.

De estas, se puede concluir que a grandes revoluciones por minuto, la llanta arroja por encima de la misma mucho regolito lunar, que además de provocar polvo, provoca que la llanta se enterrara por sí misma. Por ello y con base a los experimentos realizados, es más óptimo y seguro el manejo de bajas revoluciones y altos torques, sobre todo en el momento de iniciar el movimiento del vehículo. Otro factor que define el éxito o el fracaso de la tracción es la banda de rodadura. La banda de rodadura o banda de rodamiento es aquella parte de la llanta o rueda que entra en contacto con la superficie. Es, por lo tanto, la zona que más desgaste sufre y una de las más importantes para generar una correcta adherencia entre la superficie y la llanta. La profundidad de esta banda es fundamental para los terrenos donde circulara. Por ejemplo en los neumáticos comunes, el dibujo de la banda de rodadura no debe ser inferior a los 1.6 mm de profundidad, pero para los neumáticos para invierno, la profundidad no debe de ser inferior a los 3mm. Por ello se puede concluir que se tendrá que realizar un análisis general de la banda de rodadura debido a su importancia.

El tercer y último que consideramos indispensable para considerar en la tracción del vehículo es la fuerza con la que se mantiene en el suelo lunar, se pudo observar que si la mayoría de la masa del vehículo se concentraba en las llantas, el vehículo resultaba más estable y debido a esa característica proporcionaba mayor adherencia al terreno lunar. Con estas tres importantes aspectos nos dimos cuenta que se asimilaban mucho las necesidades y los aspectos a los vehículos agrónomos como tractores y maquinaria de campo, donde el arranque de esos vehículo es a bajas revoluciones pero con el torque más alto, donde la banda de rodadura presenta una considerable profundidad y tiene un entramado particular, además de que las llantas de ese tipo de vehículos a menudo son llenadas con agua en lugar de aire como comúnmente se realiza en los automóviles justamente para que la masa de las llantas aumente y la en general la masa del vehículo se concentre en la parte inferior.





Respecto a la pruebas con la forma de excavar con las cadenas de cangilones se puede concluir que son una muy buena forma de recabar material, pero presentan una serie de ventajas y desventajas.

#### Ventajas

- Un minado continuo.
- Principio de funcionamiento sencillo.
- Eficiente energéticamente hablando, debido a que desplaza pequeñas cargas distribuidas en tiempo y espacio en lugar de desplazar toda la masa final.
- Principio probado y usado actualmente en la minería a cielo abierto.
- El peso del sistema en comparación contra la capacidad que tiene de recolectar material en un minuto es bajo.
- El alto número de cangilones lo hace útil aun después de que algún elemento de recolección (cangilón) presenta falla.

#### Desventajas

- Debido a los elementos flexibles, es muy susceptible al polvo del regolito lunar.
- Se requiere la manufactura y el correcto ensamble de un alto número de elementos.
- Es necesario y está limitado a un contenedor o sistema que almacene el regolito lunar.
- Requiere de movimiento o control de la altura o posición de la completa cadena de cangilones para poder variar la profundidad de excavación.
- Como hay muchas piezas en movimiento es necesaria lubricación.

Con estas pruebas además se aprendió más respecto al material de simulación lunar, se confirmó, que aunque es de fácil desprendimiento y de fácil excavación (cuando es puro, es decir que no hay rocas) genera una gran cantidad de polvo.

Durante la prueba del sistema de levantamiento mediante el empleo de elevadores de tijeras y debido a que no se permite el empleo de sistemas hidráulicos que es la mitología con la que se utilizan en el planeta, resulto que con el uso de motor eléctrico y husillo, resulta efectivo, pero inestable, la manufactura resulta vital y de alta precisión. Además requiere un sistema de control que permita controlar el o los motores, la inclinación y el nivel de elevación. También, este sistema requiere un considerable espacio de operaciones.

Ya para la prueba en conjunto, se puede llegar a la conclusión de que el robot es lo suficientemente estable para viajar en terrenos uniformes, pero si se presenta una irregularidad en el terreno o roca, debido a su geometría y a su peso en la parte superior del robot, se torna inestable.





## IV. II Ciclo creativo 2

### IV. II. I Brainstorming.

En el proceso de brainstorming del ciclo creativo dos, se busco rescatar ideas diferentes y con enfoques totalmente dierentes, esto con la finalidad de conseguir innovacion en el diseño.

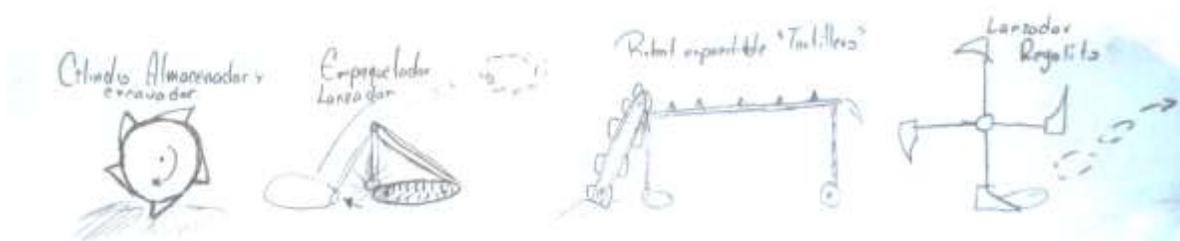


Imagen 4.9. Brainstorm del segundo ciclo creativo.

### IV. II. II Prototipo 2 "Cris".

Este segundo prototipo se basa en la idea completamente diferente, esta idea se basa en la biomimesis o también conocida como biomimética (Imitación de la vida), es decir basar el diseño en la naturaleza. Durante millones de años animales, plantas y microbios, a través de la evolución, han desarrollado mecanismos biológicos o estructuras naturales para hacer frente a los retos del entorno, con el único fin de sobrevivir. Precisamente la biomimética busca realizar innovaciones mediante esa ingeniería natural tan efectiva y que muchas veces superan a la misma imaginación humana.

Ya desde la antigüedad diversas creaciones humanas han tenido inspiración en el medio natural. Desde las maquinas voladoras de Leonardo da Vinci, hasta el velcro por el ingeniero George de Mestral que observo los ganchos del cardo y otras plantas que se quedaban pegadas en el pelo de su perro. De esta manera y observando las características naturales de formaciones y vegetación, resalta la geometría de la espiral. La espiral es una línea curva generada por un punto que se va alejando progresivamente del centro a la vez que gira alrededor de él.

Partiendo de esa idea, nos dimos cuenta que Arquímedes (astrónomo y matemático griego) ya había considerado a la espiral como medio de transporte, Arquímedes desarrollo el famoso tornillo de Arquímedes (Imagen 4.10), que funciona para desplazar fluidos basándose precisamente en la espiral. La denominada "espiral de Arquímedes" (Imagen 4.10) o también llamada espiral aritmética se define como el lugar geométrico de un punto moviéndose a velocidad constante sobre una recta que gira sobre un punto de origen fijo a velocidad angular constante.



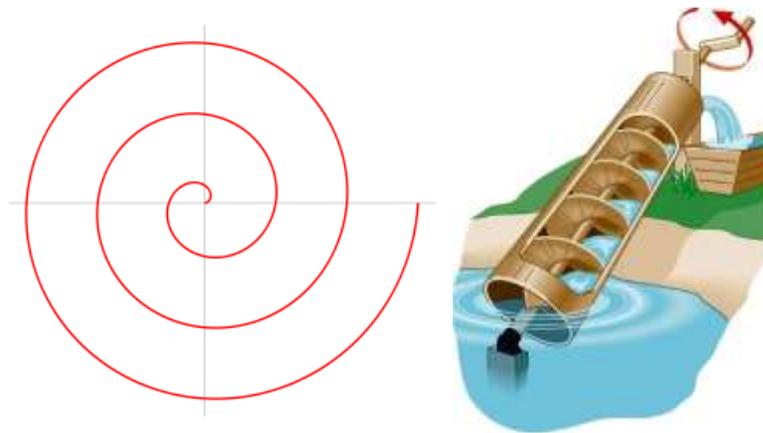


Imagen 4.10. Espiral y tornillo de Arquímedes.

Mediante estos conceptos surge la idea del prototipo “Cris” (Imagen 4.11), su principio de funcionamiento es sencillo, básicamente consiste en un cilindro de almacenamiento hueco y con una estructura interna muy similar a la de los caracoles, es decir, con paredes internas que presentan una geometría de espiral, el cilindro en su contorno presenta agujeros con palas o cangilones unidos al mismo, que cuando el cilindro gira en sentido contrario a la dirección de la espiral provoca que las palas o cuchillas introduzcan regolito lunar dentro del cilindro y se desplace con cada giro más cerca del centro del espiral que es concéntrico con el cilindro. Con esta propiedad tenemos al mismo tiempo un sistema de excavación y un sistema de almacenamiento embebido, para verter el material, simplemente el cilindro girara en sentido contrario provocando que en cada giro se desahogue más regolito lunar por los mismos orificios por donde entraron.

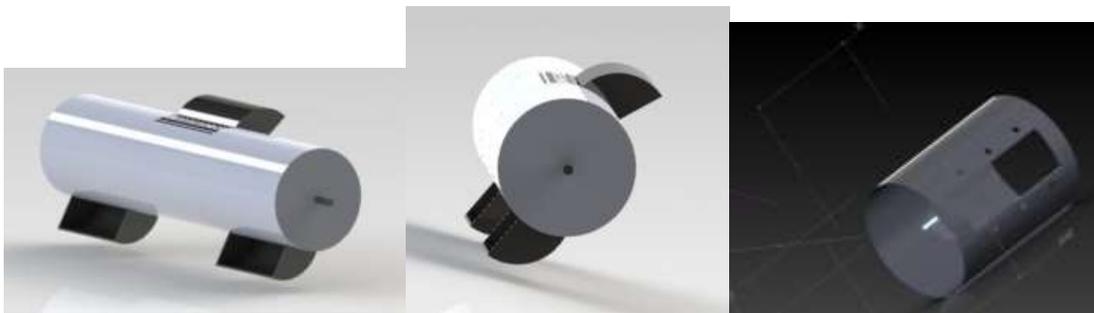


Imagen 4.11. Diseño de prototipo de excavación Cris

Con respecto al desplazamiento se decidió realizar el prototipo de uno de los métodos más empleados para el transporte terrestre en “todo terreno”, usado comúnmente en vehículos militares como tanques y en algunos vehículos agrícolas. Nos referimos a las orugas (Caterpillar track), este dispositivo de transporte consiste en un conjunto de eslabones modulares que permiten un desplazamiento aun en terrenos irregulares. La mayoría de las orugas forman parte de un cinturón flexible con un conjunto de eslabones rígidos





unidos unos a otros fuertemente. Los eslabones ayudan al vehículo a distribuir el peso en una superficie mayor que la que hubiera tenido con el empleo de ruedas, y esto hace que pueda moverse por un número mayor de superficies sin hundirse debido a su propio peso.

Por estas razones se realizó el prototipo de orugas que se muestran en la imagen 4.12. Este prototipo se realizó con residuos de solera de aluminio y partes de bicicletas.

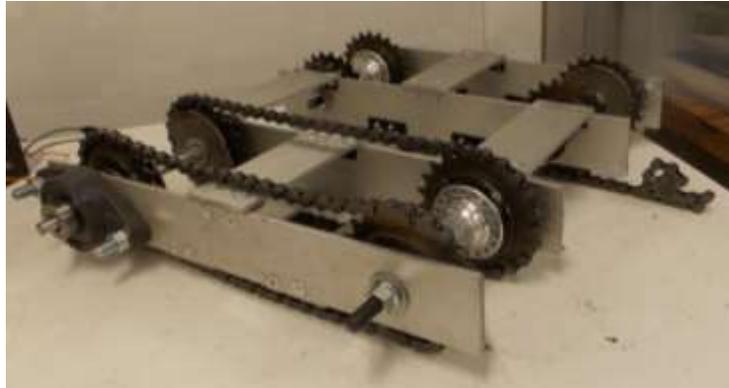


Figura 4.12. Prototipo de orugas para prototipo Cris.

En contraste con el primer prototipo “Lucy” este no se ensambló en un robot único y completo, debido a que únicamente la finalidad de estos es probar su principio de funcionamiento y sus características de operación en el regolito lunar y finalmente generar ideas y consideraciones para la siguiente etapa que consiste en la consolidación y selección de todas estas ideas empleando los conocimientos y aprendizajes que se obtuvieron en estas etapas creativas, siempre en búsqueda de la innovación.

Además de lo ya mencionado, se observó con el primer prototipo que una parte fundamental para el robot y su correcto funcionamiento es la suspensión. La suspensión es el conjunto de elementos que absorben las irregularidades del terreno por el que se circula para aumentar la estabilidad y el control del vehículo. La suspensión actúa entre el chasis y las ruedas u orugas, las cuales reciben de forma directa las irregularidades. Por esas razones y con el objeto de aprender más acerca de la misma y realizar más adelante un diseño integral, se decidió integrar al prototipo un modelo de suspensión elemental, que pudiera ser empleada o mejorada en el robot de excavación lunar, que como ya se mencionó, puede estar sometido a terrenos sumamente irregulares, que pueden volcar o dañar al robot.

El prototipo de la suspensión se diseñó en papel basados en la idea de la suspensión McPherson, que es una de las más empleadas en la actualidad, se simplificó el concepto y se modeló en el software SolidWorks, posteriormente se fabricó con un amortiguador de bicicleta y madera, (Imagen 4.13) resaltando que la finalidad del prototipo es el





reconocimiento del funcionamiento y su comportamiento en el terreno con características lunares.

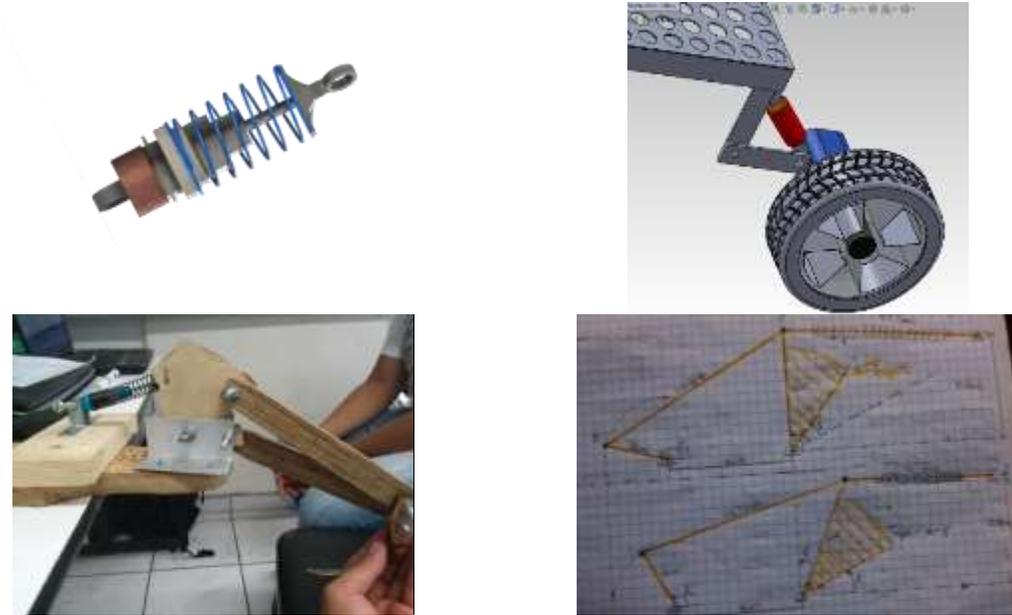


Imagen 4.13. Prototipo de la suspensión, modelada en SolidWorks y ya realizado el prototipo.

#### IV.II.III Pruebas

Las pruebas que se realizaron en este prototipo se dividieron en cuatro, las pruebas al modelo de rodillo o cilindro para excavación, las pruebas al BP-1 o simulante lunar, las pruebas al prototipo de suspensión y las pruebas a las orugas como medio de desplazamiento del robot. Para la prueba del rodillo de excavación, nuevamente se empleó el simulante de suelo lunar JSC-1A, las pruebas consistieron en simular el proceso que seguiría para excavar, además para tener un mayor criterio, se utilizaron dos prototipos que se realizaron con diversos materiales, el primero realizado de cartón con las cuchillas de metal y el segundo con un cilindro de PVC y cuchillas de metal, que consideramos sería un poco más acercado al real. La razón por la cual se realizaron las dos pruebas con los dos tipos de materiales (Imagen 4.14), fue porque el coeficiente de fricción entre el simulante lunar y el cartón o el PVC son diferentes.

A los modelos se les monto un motor para hacer girar el cilindro y también se realizó un giro manualmente. Esto con el objetivo de observar las características de operación a una velocidad baja con la finalidad de observar los detalles y la otra para examinar cómo es que se comportaría con condiciones más realistas al funcionamiento (con motor acoplado).





Imagen 4.14. Prueba del método de excavación “Cris” con dos materiales cartón (Izq.) PVC (Der).

Estas pruebas fueron elementales y se obtuvo mucha experiencia en el principio de funcionamiento, además de que al igual que las pruebas del prototipo uno, la premisa es aprender más de las características del suelo lunar y en particular del simulante que se empleara en la competencia. Con estas pruebas se lograron obtener los siguientes datos:

Masa aproximada del sistema [kg]	8.1
Voltaje de Operación [V]	3
Velocidad de excavación [kg/min]	45.7

Tabla 4.3. Resultado de pruebas a excavación con rodillo de excavación Cris.

Aunado a esta prueba y bajo la premisa de analizar el simulante lunar, se realizaron pruebas del simulante lunar, en particular del ángulo de reposo del mismo, que nos puede indicar a partir de que ángulo el simulante comienza a desplazarse naturalmente y a que ángulo se desplaza con diferentes materiales. El ángulo de reposo se denomina como el ángulo máximo con el que un montículo de sueño se mantiene estable sin que se produzca una falla por deslizamiento, es decir que el ángulo de reposo se genera por el coeficiente de fricción interno del material. Este ángulo juega un rol fundamental en la estimación del comportamiento del material, por lo que se decidió realizar pruebas para el cálculo del ángulo de reposo y de coeficiente de fricción con cartón y aluminio.

Para el cálculo del ángulo de reposo, no existe una metodología consolidada para obtener dicho ángulo. En la literatura, por otra parte, se han propuesto distintos métodos para medirlo; incluso en el año 2000, la American Society for Testing and Materials (ASTM) publicó una norma específica para los Estados Unidos. Por lo mismo para estas pruebas y el cálculo del ángulo de reposo se decidió emplear el método descrito en la norma: ASTM Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Designation: 1444 – 00).

Este ensayo consiste en vaciar el material en la superficie de papel a través de un embudo de dimensiones específicas desde una altura de 1.5





pulgadas. Para estas pruebas el diámetro de la salida del embudo fue de 0.9 cm, valor que se encuentra entre las medidas mínima y máxima sugeridas por la norma, a saber, 0.64 cm y 0.97 cm, respectivamente. Luego de posicionar el embudo a la altura establecida, se tapó la salida inferior y se llenó el embudo con una muestra del material. A continuación se removió el tapón y se añadió el material continuamente de manera de mantener un flujo constante de material hasta que el punto de descarga del embudo fue tapado por el peak del montículo de simulante lunar formado. Se midieron cuatro diámetros en la base del montículo los cuales se promediaron, registrándose ese valor como  $D_1$ . Este procedimiento se repitió dos veces más de manera de obtener tres diámetros parciales ( $D_1$ ,  $D_2$ , y  $D_3$ ) y calcular el ángulo de reposo mediante la ecuación 1:

$$\phi_{rep} = \tan^{-1} \left[ \frac{2H}{D_A - d} \right] \quad (1)$$

Donde:

- H corresponde a la altura entre la superficie de papel y el punto de descarga del embudo (3.81 cm).
- $D_A$  promedio entre  $D_1$ ,  $D_2$ , y  $D_3$
- d diámetro interno de la salida del embudo (0.9 cm).

Con lo que el ángulo de reposo para el simulante de suelo lunar JSC-1A de la empresa Orbitec es de **32.8°**

Después de la obtención del ángulo de reposo como se comentó, es importante conocer el coeficiente de fricción del simulante lunar, con materiales que potencialmente pueden ser empleados en la manufactura final del robot. El coeficiente de fricción o coeficiente de rozamiento expresa la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto. Al considerar el deslizamiento sobre un cuerpo sobre un plano inclinado, se observa que al variar la inclinación de dicho plano, el objeto inicia el movimiento al alcanzarse un ángulo de inclinación crítico. Esto es debido a que al aumentar la inclinación, se reduce paulatinamente la componente perpendicular del peso, la fuerza N, que es proporcional al coseno del ángulo de inclinación.

Esto es así independientemente del peso del cuerpo, ya que a mayor peso, aumentan tanto la fuerza que tira el objeto cuesta abajo, como la fuerza normal que genera el rozamiento. Se este modo un coeficiente de rozamiento dado entre dos cuerpos equivale a un ángulo determinado, que se conoce como ángulo de rozamiento. Por lo que el ángulo de rozamiento es igual a la tangente de este ángulo crítico.

Por lo cual con estas pruebas y mediante el empleo de un plano inclinado del material que deseamos analizar, que para nuestro caso empleamos dos planos inclinados, de materiales con los que se podría realizar la manufactura final del producto, utilizamos un plano inclinado de lámina de





aluminio y otro de fibra de vidrio. Con estos materiales inicialmente colocados en paralelo a una superficie plana, se colocó una pequeña cantidad del simulante lunar y mediante la utilización de un servomotor calibrado unido a un extremo del plano, se fue variando en ángulo para observar a partir de qué grado el material comenzaba a desplazarse por la superficie y hasta que ángulo, completamente el material se había desplazado. Con lo que se obtuvo la siguiente tabla:

Material	Angulo critico (Comienzo del desplazamiento)	Angulo critico máximo (Todo el material se ha desplazado)
Aluminio	22°	30°
Fibra de vidrio	23	31°

Tabla 4.4. Resultados de pruebas de ángulo critico

Además de estas pruebas respecto al material BP-1 o simulante lunar y como se mencionó con anterioridad, también se desarrollaron pruebas a la suspensión (Imagen 4.15), estas pruebas solo fueron comparativas de una llanta con suspensión y sin suspensión. Estas pruebas se realizaron desplazando la llanta por un terreno irregular y en el simulante lunar.



Imagen 4.15. Imagen de las llantas y la suspensión de prueba.

En el último segmento de pruebas se realizaron pruebas al prototipo de orugas como modelo de desplazamiento del rover. Estas fueron probadas con tres pruebas básicas, una que demostraba como el suelo se comprimía al efecto de diferentes cargas en el área de contacto de la oruga. Esta prueba de hundimiento se ve reflejada en la siguiente tabla:

Fuerza aplicada en la llanta [N]	Hundimiento [cm]
1.5	0.01
8.5	0.03
12.5	0.03
40	0.08
120	0.1
220	0.2
400	0.7

Tabla 4.5. Resultados de pruebas a orugas.





Además de las pruebas de hundimiento se realizó una prueba de desplazamiento, es decir de cómo es que se comportaba la oruga al desplazarse por el material, que únicamente se reflejó en el conocimiento de los diseñadores y por último a una prueba de “derrape” con el propósito de observar cómo se comportaba la oruga cuando se derrapaba o no conseguía la adherencia al suelo suficiente para conseguir la fricción para moverse y además para observar la cantidad y efectos del polvo en la misma.

#### IV.II.IV Conclusiones

Posteriormente a la realización del prototipo “Cris” y las pruebas del mismo, se adquirió una perspectiva completamente nueva de la problemática. El problema del polvo sigue siendo preponderante en los sistemas, aunado a las propiedades del terreno y la dinámica general del robot.

A lo que las primeras pruebas respecta, el sistema de excavación de rodillo, resulta ser una idea innovadora y diferente a todos los sistemas de excavación actuales, presenta muchas características que hacen a este sistema diferente y de entre las cuales se enlistaran a continuación una serie de ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Sistema completamente sellado, sin muchos elementos móviles.
- El motor requerido para hacer girar el rodillo no es tan demandante ni de difícil acceso.
- No precisa de un sistema de almacenamiento externo, es capaz de almacenar dentro del mismo rodillo.
- El principio de funcionamiento es muy sencillo y eficaz.
- Es poco sensible y genera poco polvo de simulante lunar.
- No requiere un control complejo.
- Minado continuo.

Desventajas:

- Esta limitado a su volumen para almacenamiento de material.
- Gran cantidad de inercia del rodillo con carga.
- El volumen total del cilindro no constituye la capacidad, debido a su estructura interna, la capacidad de almacenamiento está limitado a un porcentaje del total.
- Puede presentar fugas o pérdidas de material por los mismos espacios de admisión del mismo.
- Requiere de un sistema externo para variar la profundidad de excavación y llevarlo al punto de depósito.
- El sistema es más pesado que el de cadena de cangilones.
- Si existe falla en cuchilla el sistema se vuelve inservible.





Todas estas ventajas y desventajas observadas se traducen en experiencia respecto a la problemática, que ya para el establecimiento o conformación del diseño servirán como plataforma para el lanzamiento de un buen producto que se espera sea innovador.

De las siguientes pruebas referentes al simulante lunar, se puede obtener importantes conclusiones, en primer lugar el material es altamente compresible, lo que implica que para el sistema de excavación mediante el rodillo y una estructura interna de espiral, mucho material se compacte dentro de la misma y existan problemas con el vertido y la admisión, en otras palabras, el material puede comprimirse y aglutinarse en ciertas partes de la curva del cilindro, que impedirán un correcto funcionamiento aunado a un desbalance del cilindro.

El pequeño tamaño de grano o de partículas del simulante lunar propicia que sea inestable y aunque el ángulo de reposo del material sea muy similar al de los materiales como talco o cemento que podemos observar en la tierra, el simulante lunar con cualquier movimiento o fuerza aplicada tiende a perturbarse en gran manera. Respecto a las pruebas de coeficiente de fricción o ángulos críticos con los que se desplaza el BP-1, los resultados en fibra de vidrio y aluminio, aunque en realidad no difieren en gran medida, si son muy importantes para considerar en la consolidación de diseño, como para la generación de geometrías y estructuras del diseño final y por supuesto la selección de materiales que estarán en contacto con el material lunar.

Basados en las pruebas del prototipo de suspensión y realizando el contraste del sistema de una sola llanta a una llanta con suspensión, se puede concluir que la inclusión de un sistema de suspensión puede hacer la diferencia, sobre todo considerando que el robot requiere estabilidad para evitar fallos y pérdidas del material recolectado. Además de que con las condiciones establecidas por la NASA para la competencia, no requiere una suspensión compleja, sino que basta con incluir una suspensión que haga más estable al vehículo y brinde seguridad a los demás elementos.

Del último segmento de pruebas realizadas con las orugas para desplazamiento del vehículo se realizó un gran aprendizaje, debido a que ninguno de los diseñadores tenía experiencia de primera o segunda mano respecto al diseño y funcionamiento de las mismas. En primer lugar el diseño del solo sistema de orugas implica un gran reto por el alto número de elementos y las características de alta precisión que se necesitan en su elaboración, diseño y ensamble. Además el peso, comparado con el de las llantas es mayor y requiere de un mayor torque por parte del motor.

El alto número de elementos móviles de las orugas, lo hace un sistema más susceptible al polvo y aunque en general es un sistema más robusto comparado con las llantas, de la misma manera presentan cualidades y desventajas en el suelo simulante lunar. Estas se vieron reflejadas en las pruebas realizadas al mismo. En primera instancia, con las pruebas de hundimiento,





claramente y debido a que la fuerza se distribuye en un área más grande que las que nos proporcionan las llantas el hundimiento es mucho menor, resaltando que con una carga de 40 N no se llega a hundir ni un milímetro. Por lo que hace un sistema que pueda transportar grandes cargas sin presentar hundimiento del robot.

Respecto a la segunda prueba, la prueba de desplazamiento, se pudo apreciar que a pesar de ser menos sensible a las irregularidades, las orugas presentan mayor dificultad a dar vueltas y a realizar desviaciones, esto es porque el radio de giro es mayor, además cuando el vehículo está en movimiento tarda más tiempo en frenar debido a la inercia de las orugas y con los cambios de dirección los motores que brindan la tracción son más demandados. Por otra parte el desplazamiento en una sola dirección sobre el simulante lunar es estable y difícilmente se ve modificado por irregularidades.

Para la última prueba con el sistema de orugas, en el test de derrape, resulta que en general por la propia masa de las orugas, es difícil que se pierda en contacto en algún momento de la oruga con el material, debido a la área mucho mayor y a la mejor distribución de la masa, la oruga presenta una mejor adherencia y si se mantienen revoluciones bajas, al igual que la llanta, el efecto de derrape en el suelo lunar es bajo.

En general este prototipo ayudó a consolidar la información de la problemática y a entender mejor los pequeños aspectos que marcan la diferencia y funcionan como parte aguas entre un diseño integral y uno que no lo es. Además, en este segundo prototipo ya se presentó una idea con innovación para el método de excavación.





## IV.III Ciclo creativo 3

### IV.III.I Brainstorming.

En el proceso de brainstorming del ciclo creativo tres, se busca conjugar ideas nuevas, el aprendizaje realizado con los anteriores ciclos creativos y además el conocimiento obtenido en la etapa de entendimiento, esto con el fin de obtener ideas innovadoras e integrales. Finalmente las ideas que se obtuvieron, se pueden observar en la imagen 4.16.



Imagen 4.16. Brainstorming del proceso creativo 3.

### IV.III.II Prototipo 2 "Cougar".

Este tercer prototipo se basa en una idea completamente diferente, esta idea trata de conjugar la información adquirida en los procesos creativos anteriores aunadas al conocimiento de las pruebas, el conocimiento de los antecedentes y el entendimiento de la necesidad. De las tres ideas mostradas en la Imagen 4.16, del brainstorming, se seleccionó realizar un prototipo de la tercera idea, que corresponde al cilindro con cadena de cangilones.

El cilindro con cadena de cangilones surge de la amalgama entre el sistema de excavación basado en cadenas de cangilones y el de cris, un sistema de excavación basado en un rodillo que tiene la capacidad de almacenar en su interior material girando en un sentido y girando en sentido contrario verter el material que se ha almacenado. Con esta idea se trata de obtener lo mejor de ambos sistemas y un desarrollo completamente nuevo, de este sistema de excavación totalmente innovador.

Antes de realizar el prototipo se decidió realizar una investigación al respecto, para analizar si la idea ya había sido propuesta y resulto que en excavación no se había realizado nunca esa metodología para la obtención de minerales, sin en cambio, una idea que resalta por ser similar a nuestro tercer prototipo es una idea encontrada en los diseños de máquinas de Leonardo da Vinci. Este diseño se usaba en el denominado barco de paletas que se muestra en la imagen 4.17.





Imagen 4.17. Barco de paletas diseñado por Leonardo Da Vinci.

En el diseño de Leonardo un remero movía una manivela que hacía girar varias ruedas dentadas de distintos tamaños, conectadas a su vez con los remos que almacenaban una determinada cantidad de agua y esa misma agua caía a un contenedor que aprovechaba la energía cinética y potencial de la misma agua para continuar con el giro de las ruedas. Cabe resaltar que esta idea fue fundamental para el invento del barco de vapor tres siglos después.

Con ese conocimiento previo, se realizó el diseño del siguiente prototipo, denominado "Cougar", se realizó el diseño en CAD que se muestra en la imagen 4.18, mediante el software SolidWorks.

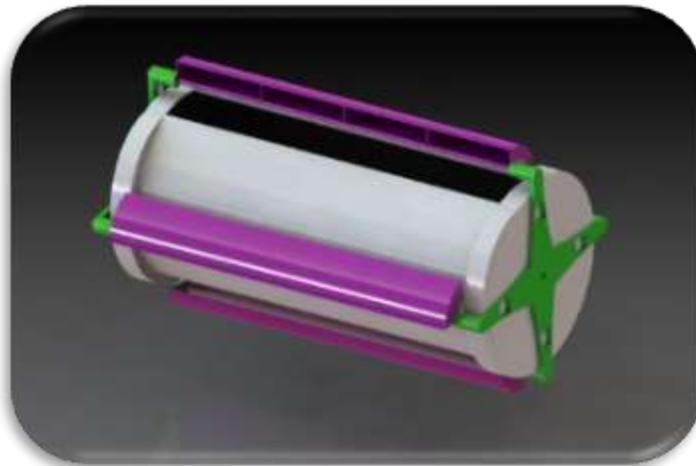


Imagen 4.18. Diseño del prototipo con el software SolidWorks.

Con los conceptos establecidos del prototipo se realizó un modelo mecánico sencillo como se puede ver en la imagen 4.19, que se realizó con restos de tubería de pvc, soleras de metal y cajas plásticas, además se le acoplo un motor de corriente directa, para poder realizar mejores pruebas.





Imagen 4.19. Prototipo de excavación Cougar.

Además del prototipo de excavación, se realizó un prototipo de cangilón con el objetivo de entender más respecto al mismo, sus características, sus propiedades importantes, su manufactura y esencialmente su principio de funcionamiento. Por ello se observó los cangilones que se usan comúnmente en la industria minera y se realizó la propuesta de diseño en CAD SolidWorks, que posteriormente se manufacturo con lámina de aluminio y trozos de policarbonato. El material de ambos prototipos (tanto del de excavación como del cangilón) se seleccionó debido a que se contaba con ese material de reciclado. En la imagen 4.20, se puede apreciar el proceso del desarrollo del prototipo de cangilón.



Imagen 4.20. Proceso del desarrollo del prototipo de cangilón.





#### IV.III.III Pruebas

Las pruebas que se realizaron en este prototipo se dividieron en dos, las pruebas al sistema de excavación prototipo y las pruebas a los cangilones. Los exámenes realizados al sistema de excavación únicamente fueron con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la función crítica, analizar las características de operación y factores críticos de diseño. Durante la prueba se puso en funcionamiento el sistema con el simulante lunar y se observó y cuantifico cuanto material era capaz de recolectar el sistema minero.

Los resultados de las pruebas son los siguientes:

Masa aproximada del sistema [kg]	3.2
Voltaje de Operación [V]	6
Velocidad de excavación [kg/min]	32

Tabla 4.6. Resultado de pruebas a excavación con cadena de cangilones.

Además de estos exámenes, se examinaron los cangilones, para estos se realizaron pruebas que se enfocaron en la observación del funcionamiento de los mismos, estas pruebas se realizaron manualmente y se enfocaron en analizar la geometría de los cangilones, los ángulos de ataque de los mismos y como es que estos mejoran su eficiencia al momento de recolectar el material.

#### IV.III.IV Conclusiones

Posteriormente a la realización del prototipo “Cougar” y las pruebas del mismo, se adquirió una visión más global del problema, además de alcanzar una innovación en la metodología de excavación. Para la metodología de excavación podemos concluir que los factores críticos para el diseño de este tipo de metodología de excavación son diversos. Las revoluciones a las que gira la cadena de cangilones alrededor del cilindro deben ser menores a 30 rpm para que no se genere un excesivo polvo lunar y la misma inercia del material provoque que en lugar de almacenar el material dentro del cilindro, lo arroje afuera del mismo.

Otro factor importante es el ángulo de ataque del material, por la observación con el simulante lunar, se puede concluir que un rango adecuado de ataque oscila entre los 20° y los 40°, esto disminuye considerablemente la fuerza necesaria por el motor que mueve los cangilones. Algo más que se puede observar es que es más efectivo eficiente el uso de una línea interrumpida de cangilones que toda la línea sea un solo cangilón, esto debido a que se requiere una mayor fuerza para levantar todo el material y mucho del material se vierte a los costados, por lo que una geometría adecuada de la colocación de los cangilones permite hacer más eficiente el sistema y requerir de menores exigencias al motor.





Por otra parte, con el prototipo de los cangilones se puede concluir que el uso de materiales como aluminio o fibra de vidrio es factible, esto debido a las características del suelo lunar. El suelo lunar debido al pequeño tamaño de grano que presenta es muy fácil de remover de la superficie con una fuerza aplicada a un determinado ángulo de ataque, que nos proporciona el cangilón.

Existe un factor a considerar en el diseño del cangilón además de la geometría, el volumen y el material. Esto es la forma con la que tiene el primer contacto con el material y su manufactura. Es muy recomendable que la manufactura de los cangilones sea de una sola pieza, ya que los que se realizaron como prototipo, debido al ensamble presentaban fugas. El prototipo en general es bastante estable y presenta una serie de ventajas y desventajas que se enlistaran a continuación y las cuales se consideraran para la conformación del diseño.

#### Ventajas:

- Sistema completamente innovador.
- Incorpora las mejores características del sistema de minería por banda de cangilones y del método de excavación por rodillo.
- Minado continuo.
- No requiere de sistema externo para almacenar.
- Los elementos móviles no son muchos y se concentran en un solo punto que se puede aislar, por lo que no es muy sensible al polvo.
- Eficiente energéticamente hablando, debido a que desplaza pequeñas cargas distribuidas en tiempo y espacio en lugar de desplazar toda la masa final.
- El peso del sistema en comparación contra la capacidad que tiene de recolectar material en un minuto es bajo.
- Permite realizar una configuración de cangilones de acuerdo a las necesidades.
- Se puede variar la profundidad de excavación y realizar el vertido del material con el mismo sistema.
- Elementalmente solo requiere un motor para su funcionamiento elemental y el control del mismo es relativamente sencillo.

#### Desventajas:

- Esta limitado a su volumen para almacenamiento de material.
- Requiere de un sistema externo para variar la profundidad de excavación y llevarlo al punto de depósito.
- El sistema es más pesado que el de cadena de cangilones.
- Para realizar la variación de profundidad y el verito del material, se requiere que todo el sistema se desplace.
- La dimensión del sistema es mayor a la de los dos prototipos anteriores.





## Capítulo V.

### Conformación del Diseño.





En este apartado se pretende analizar más a fondo el diseño que se conformó a partir de la etapa creativa la cual expandió nuestras ideas pero a su vez limitándolas en un intervalo por los requerimientos de un lado y los recursos con los que se contaron resultando en diversas posibilidades añadiendo ventajas y desventajas a cada una de ellas, luego de probar las diferentes posibilidades con maquetas funcionales a escala pudiéndonos permitir analizar el funcionamiento de los sistemas pudimos alcanzar a concluir en las funciones fundamentales que tiene que realizar el robot, distribuyéndolas en diferentes áreas principales, y a su vez en subsistemas que nos permitan realizar funciones específicas.

### V.I Definición de funciones y estructuras.

Se definieron las funciones en base a las tareas principales y secundarias que tiene que realizar el robot para la competencia entre ellas se encuentran la excavación, el transporte, la manipulación, el depósito.

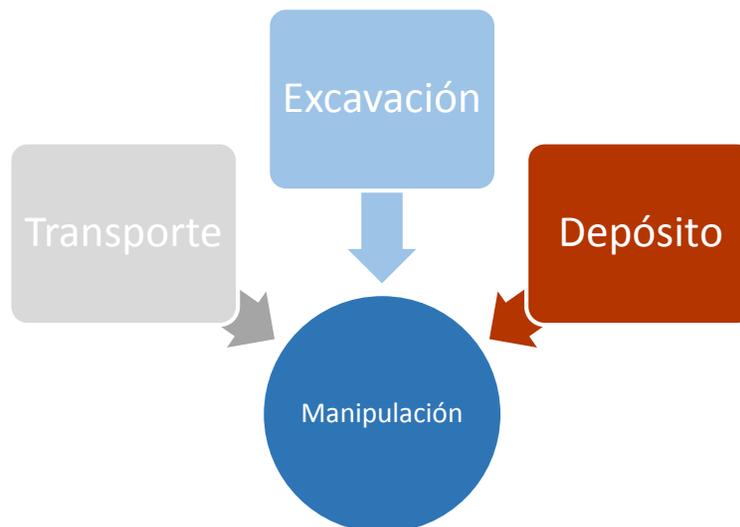


Imagen 5.1. Funciones Generales del robot.

Como se observa en el diagrama 5.1. Las 4 tareas principales son transportar, excavar, depositar, y todas ellas están relacionadas principalmente por la forma en que estas pueden ser manipuladas. Dentro del transporte incorporan las funciones de sistema de tracción, sistema de visión y posición. En la función de excavar y depositar se anidan sistemas de excavación, sistema de recolección, sistema de almacenamiento, sistema de levantamiento y el sistema de depósito. En la manipulación de todos





estos sistemas consigo lleva un sistema energético, sistema de comunicación y un sistema de control. Así estos 10 sistemas tienen que trabajar sincronizados y en conjunto para poder llevar a cabo las tres principales tareas del robot, nuestro objetivo en este diseño es también tratar en concatenar algunos sistemas mejorando el desempeño de algunas tareas y ahorrar recursos, energía y facilitar el control del mismo.

La tarea del transporte es principalmente poder llevar el robot a cualquier sitio, este cargado con material o no, por diferentes tipos de terreno, tener un sistema de amortiguamiento que pueda absorber la energía a causa de las diferentes maniobras y variación del relieve del terreno. Tener la capacidad de orientarse (manual o autónomamente) por medio de algún medio de visión que pueda ayudar a su navegación y contar con una estrategia de ruta, esto quiere decir que tenga la habilidad de poder esquivar o sobrepasar obstáculos como cráteres o rocas (Véase el apartado III.I.I.III Requerimientos) de la manera más óptima. Otra de las principales funciones del transporte es poder contar con una estructura robusta pero no excesiva que pueda servir de base para poder colocar todos los componentes sobre esta, absorber la energía de los procesos sin producir vibraciones o ruidos que pudieran desestabilizar al robot. Además de aguantar el peso de la muestra de simulante BP-1 que se va a excavar.

Dentro de la tarea de excavar se busca que el robot sea capaz de excavar en el simulante BP-1 dado que este posee propiedades muy especiales y poco comunes a otros terrenos. Una vez que el robot sea capaz de excavar en el simulante Bp-1 se debe de tener una forma de poder recolectarlo o juntarlo en algún tipo de almacenamiento seguro que lo proteja y no desestabilice al robot.

Una vez completada la tarea de excavar y almacenar el robot tiene que poder extraer el material almacenado a través de un sistema o mecanismo que alcance la altura mínima de 0.5 [m] (Véase el apartado III.I.I.III Requerimientos) y después mediante otro sistema poder verter el material en recipiente de depósito y así poder terminar con la ronda de la competencia.

La parte de la manipulación comprende la unión de todas las funciones, su monitorización y retroalimentación para poder trabajar todas en conjunto y en orden. Se requiere de una fuente de poder que alimente a todos los componentes eléctricos y electrónicos pero a la vez que pueda ser regulada para que no existan fallas. La parte de la comunicación es esencial pues el robot solo puede ser manipulado remotamente o autónomamente, además de tener que recibir todas las señales de los sistemas poder analizarlas y retro alimentarlas y comunicarlas con los sistemas dependientes de estas. Para lograr todo esto es donde entra el control de señales, y los algoritmos necesarios para que cada mecanismo y sistema funcione perfectamente.





Para un mejor desempeño en el diseño del robot se propusieron tres ramas o sistemas principales de las que se derivan todos los subsistemas y funciones concretas.

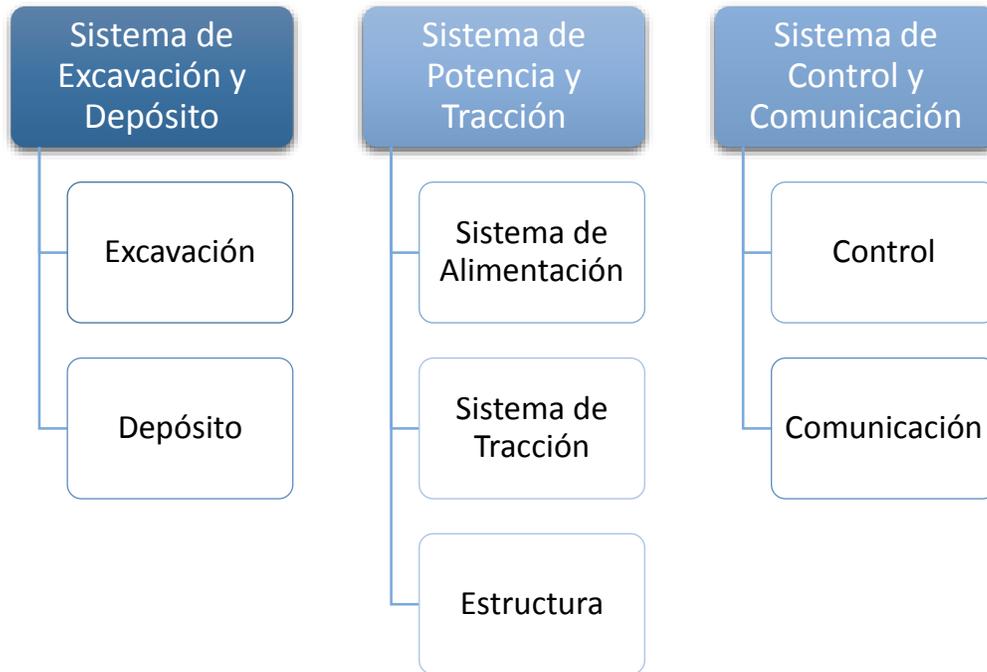


Imagen 5.2. Distribución de los Sistemas.

## V.II Estructura General del Robot.

Como se describió en la sección anterior el robot se estructura en 3 sistemas principales: Sistema de Excavación y Depósito, Sistema de Potencia y Tracción, y Sistema de Comunicación y Control, a continuación en el diagrama 16 se muestran las interconexiones entre los sistemas y sus componentes.



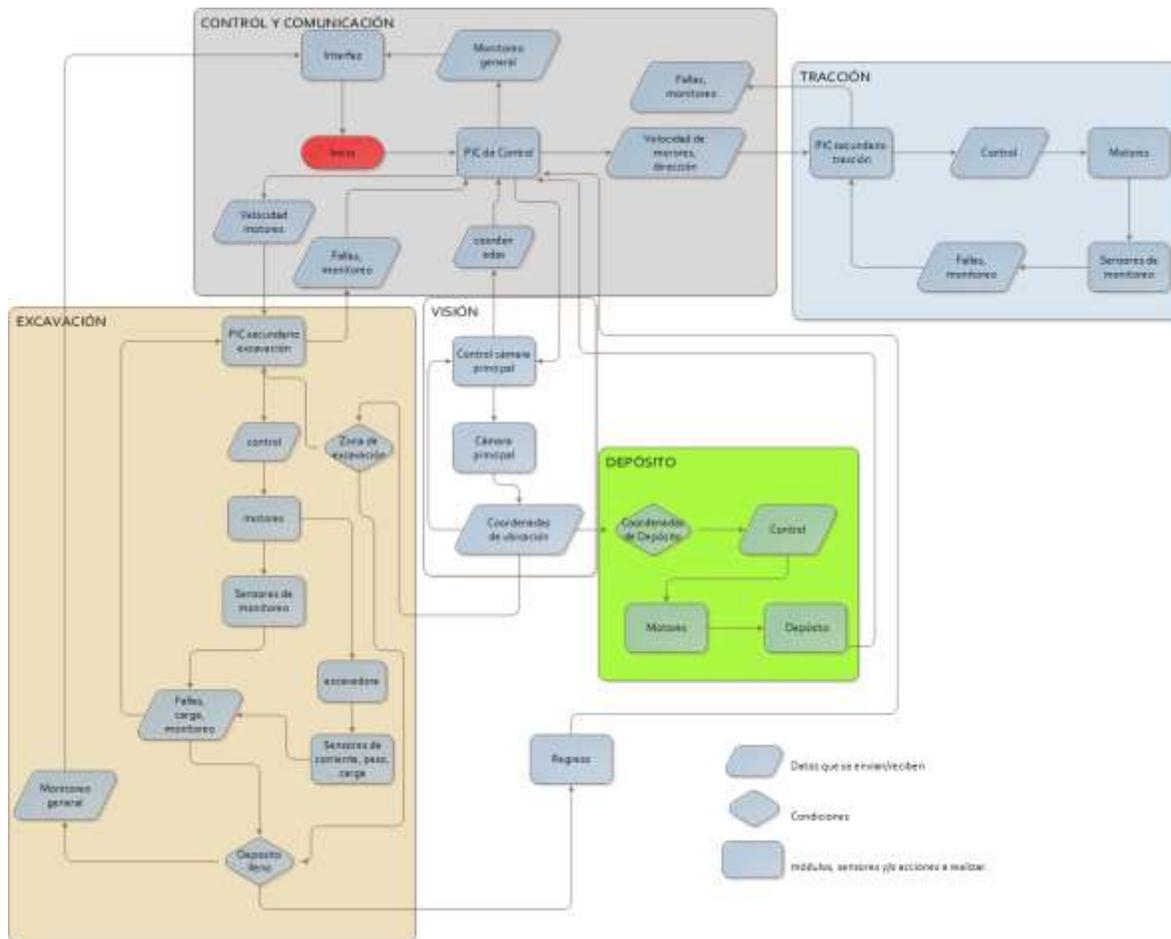


Imagen5.3. Estructura general e interconexiones.

Describiendo una ronda del robot en competencia, el al accionarse el botón de inicio, el robot censa con su cámara las coordenadas y su orientación, monitoriza que no haya errores y manda una señal de control al sistema de tracción este controla los motores apoyado por la cámara para guiar al robot y superar el área de los obstáculos, una vez que la cámara envíe las coordenadas al control indicando que ya está en el área apta para excavar el control principal mandara la señal al control de excavación y este activara la excavadora con una estrategia de excavación y ciertos sensores se sabrá hasta cuando el sistema de almacenaje este lleno entonces se activara el regreso hasta que el sistema de visión envíe la señal y las coordenadas de que esta en el sitio para el deposito; entonces es cuando el mecanismo se activa y deposita el material recolectado, con esto se terminaría una ronda completa.





La energía será entregada mediante un conductor eléctrico en forma constante, regular y estable. Muy similar, la señal de control se entregará de manera alámbrica desde el sistema de control. Ambas entradas pasaran a un subsistema de control interno, que a su vez estará conectado con los actuadores. Los actuadores estarán conectados a mecanismos mecánicos que transformarán el movimiento de los actuadores en el movimiento deseado, así como a un subsistema de censo que verificará el estado de los actuadores generando una señal de retroalimentación de salida hacia el sistema de control.

Al ser uno de los criterios de mayor peso la autonomía total del robot, se diseñó un sistema en el que el operador podrá iniciar con ayuda de una interfaz el robot desde una computadora ubicada a 10 metros de él, dicha computadora contará con un módulo de comunicación inalámbrico (de manufactura propia) que enviará y recibirá las señales necesarias. El robot contará con otro módulo inalámbrico conectado a una computadora portátil convencional, que se encargará del procesamiento sólo de la autonomía. A su vez, dicha máquina enviará una única señal de inicio al resto de la circuitería, también de manufactura propia.

La circuitería adicional se encargará de controlar el sistema de tracción y de excavación, activando y desactivando sus actuadores, controlando la velocidad de giro de cada una de las ruedas, de la excavadora y al mismo tiempo enviará información de monitoreo para que el equipo pueda conocer el estado de los sistemas del robot y en caso de falla crítica, se pueda optar por tomar el control manual del mismo, desactivando el módulo de autonomía. Todo esto a través de los módulos inalámbricos mencionados anteriormente. La circuitería de control obedecerá órdenes del módulo de autonomía (en condiciones ideales) y del equipo, si el módulo se encuentra desactivado.

Para poder realizar una ronda con las funciones descritas anteriormente se plantearon en base a las especificaciones y requerimientos los objetivos con los que pensamos diseñar al rover.

Objetivos
Pesar menos de 70 [Kg]
Cargar un mínimo de 30 [Kg]
Lo más autónomo posible
Generar un mínimo de polvo
Evitar derrapamiento y hundimiento del rover
Desplazarse con una velocidad mínima para completar 2 ciclos en 10 min

Tabla 5.1. Tabla de objetivos.





### V.III Tracción.

La mayoría de la tecnología que se desarrolla hoy en día por lo general sigue los pasos o más bien trata de imitar los mecanismos biológicos de la naturaleza, entre ellos existen diferentes formas de transporte como son el caminar, correr, saltar, nadar volar rodar todas estas formas nos brindan perfección para diferentes tareas específicas con ventajas particulares sobre los otros. Pasa lo mismo con el sistema de tracción del rover que se diseñó para la competencia Lunabotics Mining Competition, donde se tuvo que identificar la necesidad específica que requería y poder analizar el tipo de tracción el cual cubriera a plenitud las necesidades.

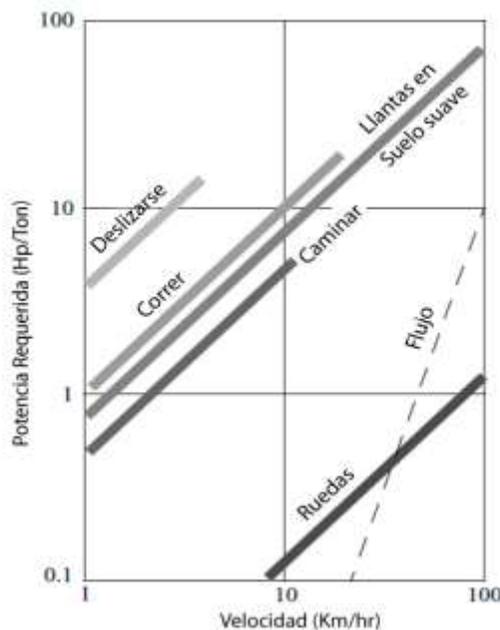


Imagen5.4. Gráfica de velocidad vs potencia requerida.

El sistema de tracción o locomoción es de suma importancia para el rover, para que este pueda moverse por la arena de la competencia sin ningún problema, debe proveer suficiente potencia para desplazarlo con carga en él y su vez desplazarse con rapidez pudiendo con esto poder esquivar los obstáculos que se presenten (rocas y cráteres) en su trayecto. Por otro lado debe brindar estabilidad para que el rover no se volqué si pasa sobre algún obstáculo o si su centro de masa cambia. El sistema de tracción debe ser diseñado teniendo en cuenta el peso ideal para que no se hunda y no tan ligero para que no patine sabiendo que sobre él recaerá todo el peso del robot.





Teniendo en cuenta las necesidades del sistema de locomoción se analizaron las diferentes formas potenciales en las que se podría mover el rover mediante una lluvia de ideas y generando varios conceptos de métodos de desplazamiento.

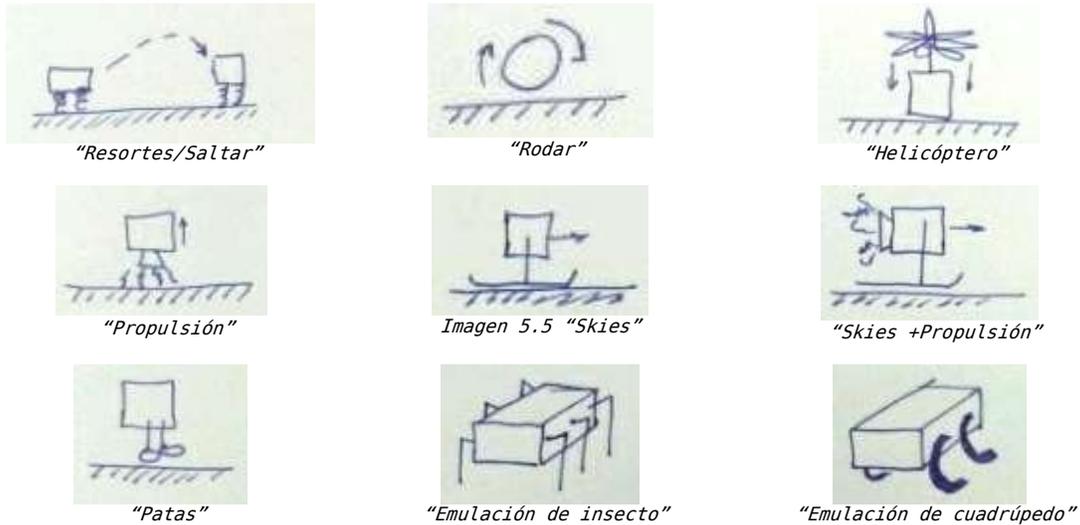


Imagen 5.5. Conceptos de métodos de desplazamiento.

De estos conceptos se analizaron lo que cada uno de estos requería para funcionar de forma adecuada y se pudo eliminar varios de estos conceptos como la propulsión, el salto, helicóptero por los requerimientos especificados por la NASA (véase apartado III.I.I.III Requerimientos) donde menciona el no poder usar sistemas de propulsión, el que el robot tiene que desplazarse sobre la superficie, también que no puede usar sistemas que usen oxígeno o algún tipo de gas y que no puede usar sistemas de aspiración o succión. Con esta selección con base a los requisitos quedaron únicamente las ideas o conceptos que se desplazaban sobre la superficie de la arena. Después de esto se requirió analizar el benchmarking que se hizo sobre otros modelos en la competencia (véase apartado III.III.II Benchmarking) donde se obtuvieron conclusiones de que los sistemas de locomoción más empleados en la competencia eran las llantas y las cintas de desplazamiento u orugas. A continuación se analizaran los dos sistemas por separado para poder compararlos.

Las ruedas se pueden definir como piezas mecánicas circulares que gira sobre su propio eje y está fijada por debajo de un vehículo u otro objeto para que este pueda desplazarse fácilmente sobre algún terreno. Tienen grandes ventajas sobre otros sistemas de locomoción pero dependen en gran manera de la calidad del terreno sobre el que se van a desplazar, en especial es de importancia que tan plano es el terreno o que tan duro es. Para el diseño del robot y su sistema de tracción tiene que tomarse en





cuenta la estabilidad que pueda brindar al robot el tipo de geometría de contacto, su ángulo y la fricción que esta provoca para obtener la suficiente tracción para desplazarse sobre el simulante BP-1.

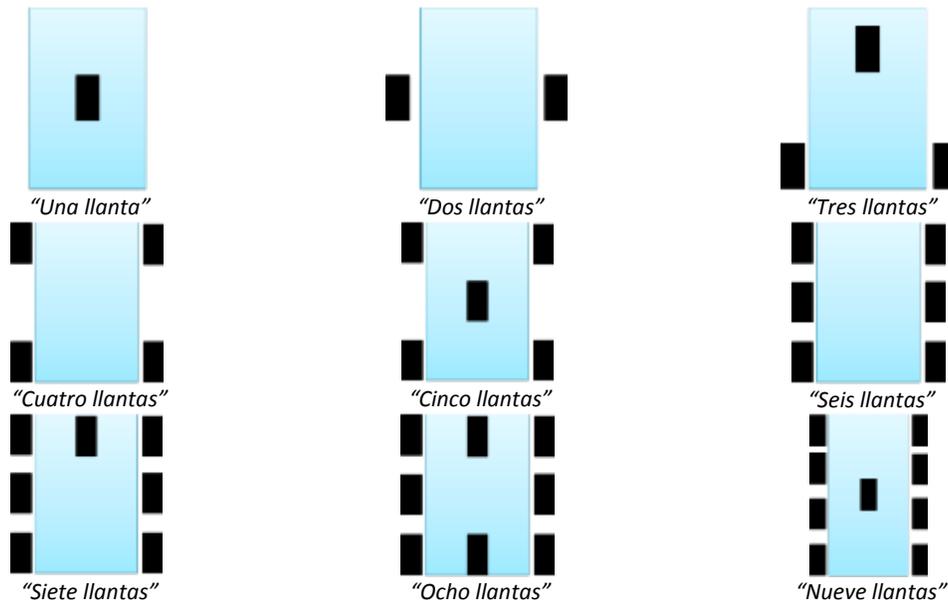


Imagen5.6. Configuraciones de ruedas.

Por el tamaño y el peso que el rover pueda cargar se tomó la decisión de no usar menos de tres ruedas ya que esto podría ser muy inestable para todo el rover y no usar 6 porque se requerirían más motores y también como consecuente se sumarian más kilogramos al peso del robot, por lo que se concluyó que 4 ruedas sería lo más ideal para el tipo de propósito que se requiere en la competencia. Cabe mencionar que si se usan más de 3 llantas se debe también diseñar un sistema de suspensión que pueda ajustar cada llanta independientemente para tener el tiempo más posible contacto con el suelo cuando el rover pisa por terrenos no uniformes.

Unidireccionales



Bidireccionales



Omnidireccionales:



Imagen5.7. Tipos de ruedas.

Por otro lado en el caso del tipo de llantas existen 3 configuraciones principales cada una con sus ventajas y desventajas. Las ruedas





unidireccionales proporcionan un solo sentido para su desplazamiento lo que quiere decir que para regresar en la misma dirección por la que vino tendrá que dar una vuelta de  $180^\circ$  grados describiendo media circunferencia y dependiendo del tamaño del rover y la separación de sus ruedas esta puede llegar a tener un radio muy grande dando una desventaja importante a la hora de maniobrar en un espacio restringido como la arena de la competencia. Las llantas bidireccionales a diferencia de las unidireccionales estas pueden moverse tanto hacia atrás como hacia adelante dando una ventaja muy grande pudiendo girar sobre su propio eje reduciendo y así poder maniobrar sin tener que desplazarse para dar media vuelta o en su defecto poder regresar de reversa. Por ultimo tenemos las llantas omnidireccionales u omniwheels las cuales se pueden mover por lo menos en 4 direcciones dando una gran ventaja a la hora de esquivar obstáculos o cuando se tienen que dar diferentes giros, esto facilita las maniobras y giros aunque por otro lado aumenta la dificultad en el control, los motores y hasta en la manufactura.

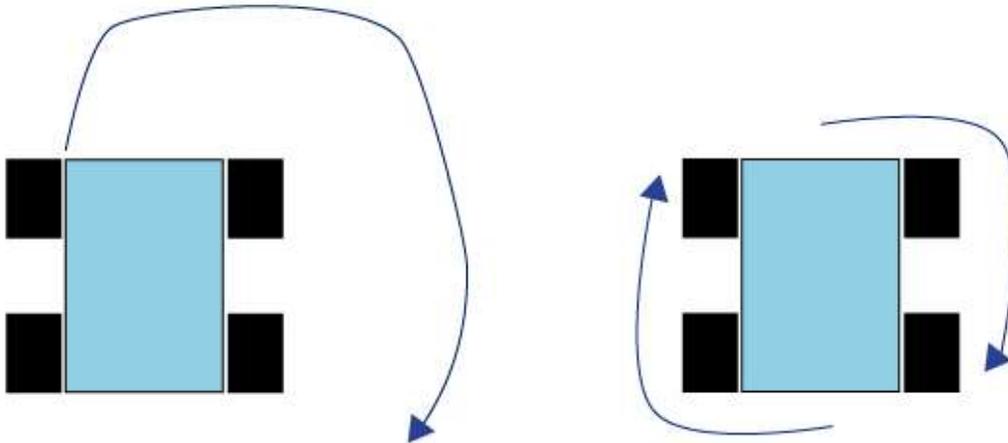


Imagen5.8. Trayectoria de vuelta unidireccional (izquierda) y bidireccional (derecha).

Al darse cuenta que una tracción bidireccional y omnidireccional es mucho mejor en casi todos los aspectos comparados con las unidireccionales se usara una comparación más directa y más a detalle. Mientras que en la tracción bidireccional se usaría una tracción diferencial esto quiere decir que los giros se realizan mediante el deslizamiento del robot sobre el suelo al girar las ruedas del lado izquierdo más rápido o más lento que las de la derecha, o al girarlas en sentidos opuestos, esto nos daría una maniobrabilidad mucho más fácil de controlar.





Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema fácil de controlar</li><li>• Fácil de implementar</li><li>• Facilidad de adquisición.</li><li>•Económico.</li><li>•Fiabilidad alta.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Probabilidad de patinado o bajo agarre.</li><li>• Giros con precisión media.</li><li>• Media velocidad.</li><li>• Bajo coste de mantenimiento por desgaste.</li><li>•Media área de distribución de masa.</li></ul>

Tabla 5.2. Ventajas vs. Inconvenientes Dirección diferencial.

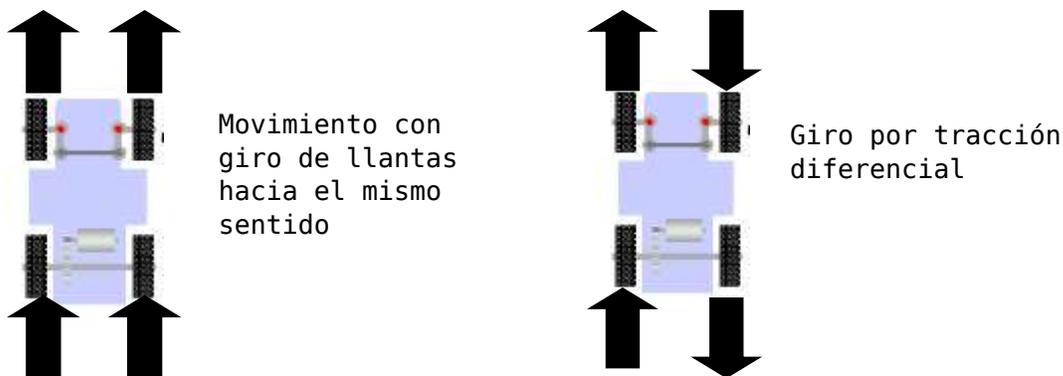


Figura 5.9. Configuración de dirección diferencial

En las llantas omnidireccionales estas permiten un movimiento omnidireccional gracias a su diseño. Estas ruedas se basan en montar una serie de barriles o rodamientos en la periferia de una rueda de mayor diámetro. La combinación de estos dos elementos permite el movimiento de grandes cargas en cualquier dirección con un menor consumo de energía. Por lo general, la configuración utilizada para montar estas ruedas en un robot es en triángulo. Aunque el control para el sentido y la dirección de giro son de mayor dificultad ya que entre más ruedas se tengan el control es más difícil teniendo que manejar todas las ruedas a la misma velocidad para que puedan ir en línea recta, la maniobrabilidad facilita su desplazamiento y una reacción muy rápida en los cambios de sentido.



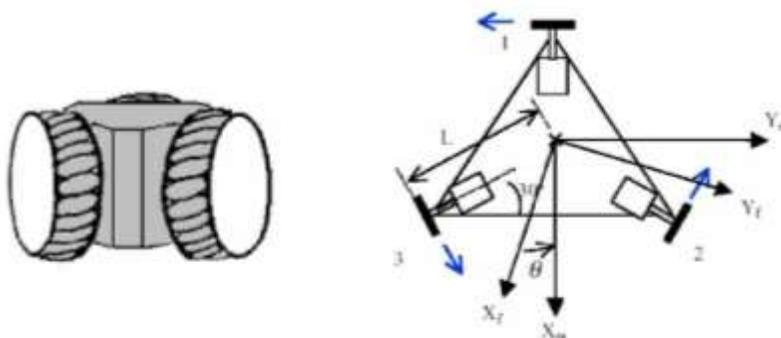


Figura 5.10. Configuración de dirección Omniwheel.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Permiten movimientos complicados</li><li>• Reducen restricciones cinemáticas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Difícil control e implementación</li><li>• Alto coste</li><li>• Movimiento en línea recta solo permitido por sistemas de control complejos</li><li>• Crea arrastre si se desplaza en línea recta</li></ul>

Tabla 5.3. Ventajas vs Inconvenientes dirección Omniwheel.

Además de las ruedas están otro tipo como son las orugas, que son sistemas que usan una banda que gira alrededor de varias llantas en una misma línea lo que ayuda a tener mucho más tracción y estabilidad en el robot, otro de los puntos fuertes de las orugas es el que tiene un área de contacto muy grande con el suelo y con esto se mejora la maniobrabilidad en terreno suelto en comparación con configuraciones de ruedas tradicionales, sin embargo una de sus desventajas es que al querer cambiar la dirección del robot como consecuencia de la gran área que tiene contacto con el suelo, tendrá que arrastrar parte de su banda contra el suelo, lo que significa más fricción y fuerza en oposición al movimiento. Esta desventaja induce a la difícil predicción del centro exacto de rotación así como los cambios exactos en la posición y la orientación son un poco subjetivos respecto a la fricción del suelo. Estas desde el punto de vista cinemático, esta configuración puede considerarse como una variante de la tracción diferencial. Es decir, los giros se realizan mediante el deslizamiento del robot sobre el suelo al girar una cinta más rápido que la otra o al girar en sentidos opuestos. En terrenos sueltos esta configuración con respecto al ahorro de energía es mucho más eficiente a diferencia de las ruedas pero en terrenos planos es muy ineficiente.





Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema fácil de controlar</li><li>• Sistema ya empleado en otros robots similares</li><li>• Fiabilidad alta.</li><li>• Buena área de distribución de masa.</li><li>• Gran área de contacto con el terreno.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Probabilidad de patinado o bajo agarre, del eje con la cinta.</li><li>• Giros poco precisos.</li><li>• Alta fricción con el terreno en los giros.</li><li>• Media velocidad.</li><li>• Medio coste de mantenimiento por desgaste.</li><li>• Alto coste y dificultad de implementación</li></ul>

Tabla 5.4. Ventajas vs. Inconvenientes Cintas de desplazamiento.



Imagen 5.11. Imagen de vehículo usando cintas de desplazamiento.

En conclusión no se puede decir que alguna de las configuraciones es la ideal para optimizar la estabilidad, maniobrabilidad y la controlabilidad al mismo tiempo. Dependiendo de la prioridad de los requerimientos y necesidades es que se puede inclinarse por cualquiera de las configuraciones de tracción.





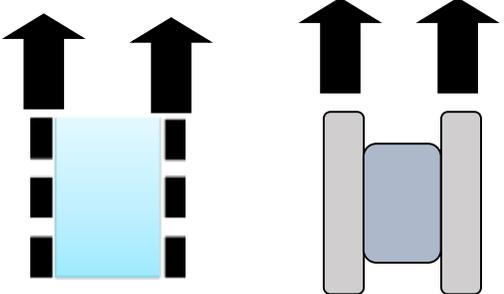
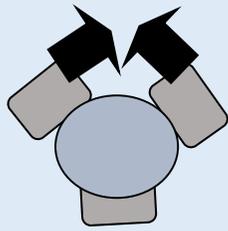
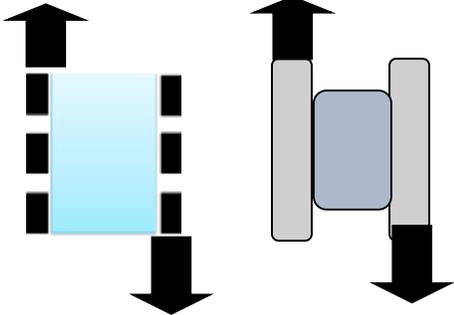
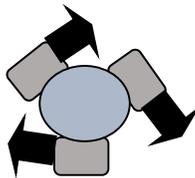
Movimiento	Desplazamiento	<b>Hacia el frente</b> 
		<b>Hacia el frente omniwheels</b> 
	Vuelta/Giros	<b>diferencia de giro</b> 
		<b>Girar en el mismo sentido(omniwheels)</b> 

Tabla 5.5. Configuraciones de movimiento.





Entendiendo el concepto de cada configuración con sus ventajas y desventajas teóricas se evalúan las alternativas de solución y se parametrizan las ventajas de cada uno en términos que puedan compararse numéricamente. Para esto se jerarquizaran diferentes criterios para poder compararse.

Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	4
Costo de manufactura	3
Volumen de trabajo	3
Eficiencia	5
Complejidad del mecanismo	3
Mantenimiento	2

Tabla 5.6. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.

Se realizó una matriz para vincular los requerimientos ya especificados (véase apartado III.I.I.III Requerimientos) con los criterios de evaluación y ver más a detalle la relación que guardan unos con otros.

	Frecuencia de Mantenimiento	Facilidad de Mantenimiento	Alimentación	Precisión	Peso	Tamaño	Costo	Velocidad	Durabilidad	
Poco mantenimiento		0	1	1	1	1	1	1	1	
Fácil mantenimiento	1		1	0	1	1	1	0	1	
Alimentación CD	0	0		1	1	1	0	1	1	
Movimiento preciso	0	0	0		0	0	0	0	0	
Ligero	0	1	0	1		1	1	1	1	
Pequeño	0	0	0	1	0		0	0	0	
Mediano Costo	0	0	0	0	0	0		0	0	
Movimientos rápidos	0	0	1	1	1	1	1		1	
Durable	0	1	1	0	0	0	1	1		
	1	2	4	5	4	5	5	4	5	35
	0.0286	0.05714	0.11429	0.14286	0.11429	0.14286	0.14286	0.11429	0.14286	

Tabla 5.7. Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.

Analizando la matriz resultante se puede observar que los criterios que más cumplen o se relacionan con los requerimientos del robot, esto ayudara





a inclinarse por una solución para la configuración de la tracción. Con los resultados obtenidos en la matriz y la jerarquización de los criterios se puede comparar a plenitud los tres sistemas de tracción que se eligieron evaluar: el sistema de orugas, llantas omnidireccionales y el sistema de llantas diferenciales. Teniendo en cuenta que esta selección se hizo por eliminación de otros sistemas de tracción que analizando lo podrían aportar no serviría para el propósito del robot y la competencia Lunabotics Mining Competition.

Conceptos				
	Factor de Peso	Orugas	Omnidireccionales	Diferencial
\$ Materiales	0.3	2	1	3
\$ Manufactura	0.1	4	1	7
Volumen de trabajo	0.1	5	4	7
Eficiencia	0.3	9	2	7
Complejidad mecanismo	0.15	5	1	9
Mantenimiento	0.05	6	3	8
Valor útil total	1	5.25	1.7	<b>6.15</b>

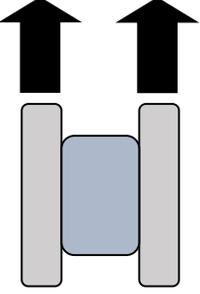
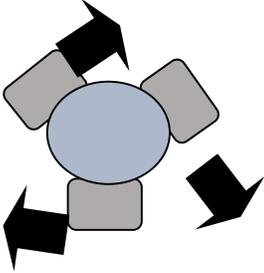
		
Orugas	Omniwheels	Tracción diferencial

Tabla 5.8 Matriz de decisión de la configuración del sistema de tracción.

Como resultado de este análisis de selección el sistema de tracción diferencial resulto con mayor peso de valor útil total. Por lo que el sistema final de tracción del robot será un sistema de 4 ruedas con tracción independiente con configuración diferencial.



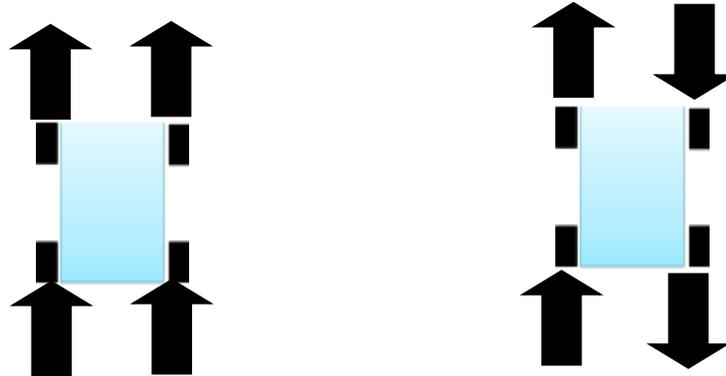


Imagen 5.12. Sistema de tracción seleccionado.

### Ruedas

El rover contara con 4 ruedas que puedan desplazar al rover de manera que al diseñarlas se tomaron en cuenta aspectos como altura máxima del rover, tracción, deslizamiento de las ruedas, material. Se definieron objetivos con los aspectos a tomar en cuenta.

Objetivos
Material ligero pero muy resistente
Material fácil para manufacturar
Que no se deslicen o patinen
Que no se hundan

Tabla 5.9. Objetivos de las ruedas.

Para el material de las llantas se compararon 3 diferentes materiales: aluminio, Nylamid y Fibra de Carbono. Se jerarquizaron algunos criterios para poder evaluar los materiales, y solo teniendo en cuenta una parte de los objetivos ya que para cumplir los otros objetivo no necesariamente se utilizaría el mismo material.

Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	4
Facilidad de manufactura	2
Ligereza	4
Resistencia	5

Tabla 5.10. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.





Conceptos				
	Factor de Peso	Aluminio	Nylamid	Fibra de Carbono
\$ Materiales	0.25	9	5	3
Facilidad Manufactura	0.1	8	7	4
Ligereza	0.25	4	8	9
Resistencia	0.4	6	8	9
Valor útil total	1	6.45	7.15	7

Tabla 5.11. Comparación de los materiales para las ruedas.

Con esta comparación se inclinó por escoger el material Nylamid que se distingue por ser ligero, resistente pero también por su facilidad para manufacturarlo en máquinas como el torno, la fresa y en CNC.

Para la geometría de las ruedas se basó en el objetivo de la resistencia y el peso, así resulto un diseño preliminar que consistía en una rueda con una circunferencia total con diámetro de 200 [mm] con solo un espesor de 15 [mm] y el resto hueco. Una circunferencia base de 180 [mm] y sobre esta crestas de 20 [mm] con un espacio entre ellas de 30° dando esto un total de 12 crestas.

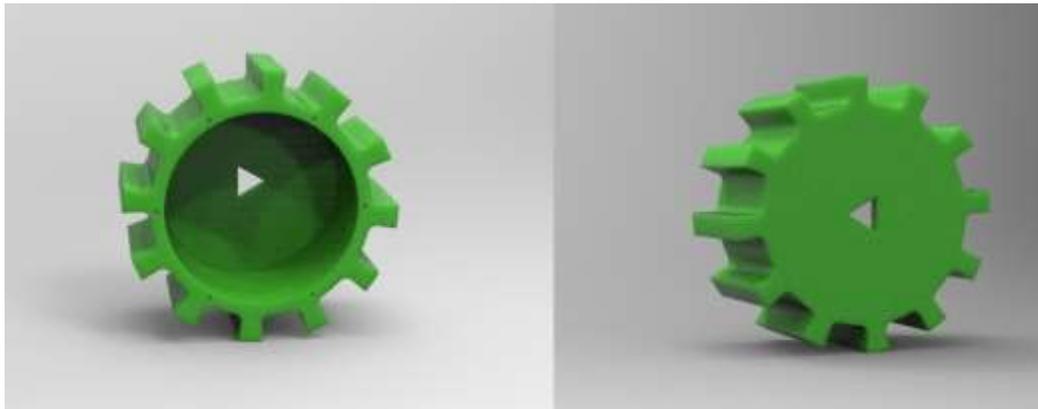


Imagen5.14. Primer diseño de las ruedas del rover.

Llevaría una pared donde se soportaría el motor con un rodamiento y esta pared se sellaría con tornillos a la rueda.





Imagen5.15. Primer diseño de las ruedas del rover.

Se le realizó un análisis de elemento finito por medio del Software Solidworks 2013® para ver la resistencia del material con esa geometría teniendo en cuenta que por dentro estaría hueco y sin la tapa, esto nos daría una mejor visión de que tanto resistiría el material a una carga de 150 [Kg] dividido en 4 ruedas que distribuirían el peso por lo tanto se evaluara con 37.5 [Kg].

Los resultados que nos arrojan los análisis de desplazamiento nos indican que la rueda tendrá un máximo desplazamiento de 13.41 [ $\mu\text{m}$ ] en la parte donde va acoplado el motor por lo que se tiene que prestar importancia para optimizarlo aunque 13 micrómetros es muy buen indicador.

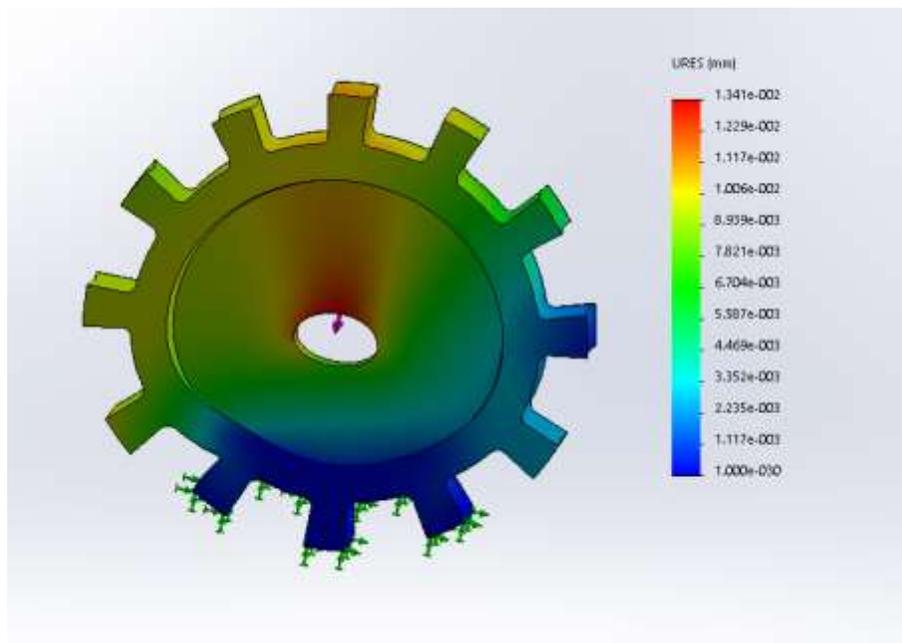


Imagen5.16. Análisis de desplazamiento de la rueda.





En los resultados del análisis de presión de Von Mises, se puede observar que la máxima presión con una carga de 37.5 [Kg] por llanta será de 0.283 [MPa] teniendo en cuenta que el material Nylamid cuenta con un límite elástico de 60 [MPa] la presión máxima sobre la rueda no llegara a deformar el material.

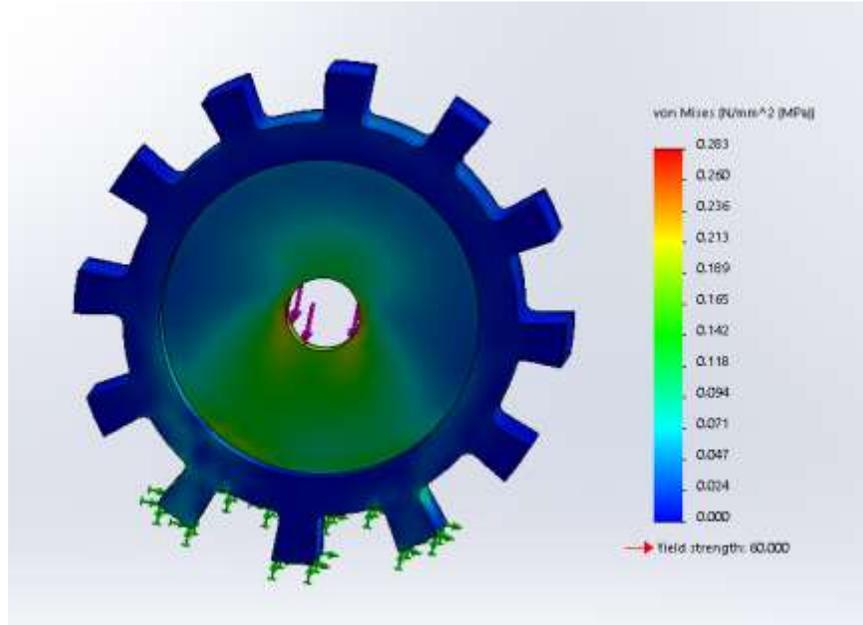


Imagen5.17. Análisis de Von Mises de la rueda.

Como salieron los análisis y resultados como se esperaba con un factor de seguridad de 2 se decidió continuar en base a este diseño poniendo atención en dos aspectos específicamente; la geometría y configuración de las crestas, y por otro lado el acoplamiento del motor con la rueda dado que ahí es donde podría llegar a tener una falla mecánica.

Para las crestas o banda de rodadura, se analizaron diferentes geometrías y configuraciones que se utilizan comercialmente para vehículos que requieren diferentes tipos de tracción.

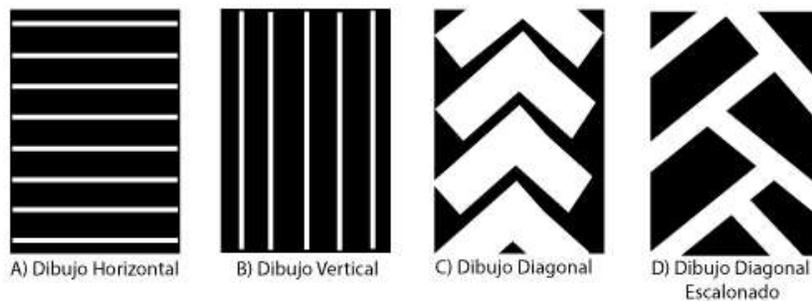


Imagen5.18. Bandas de rodadura.



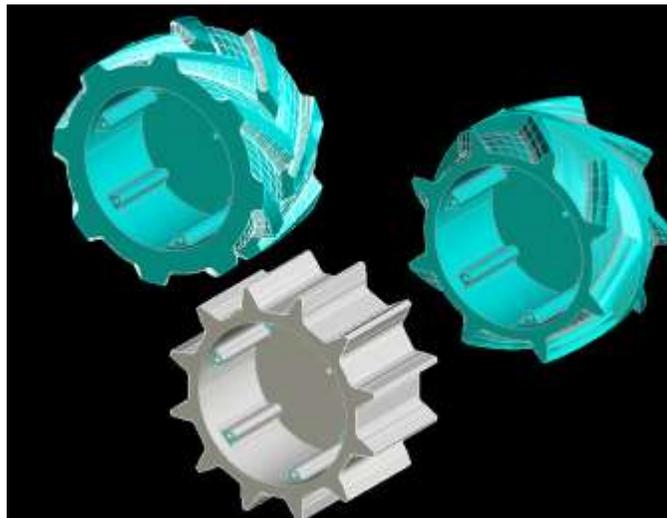


La banda de rodadura con dibujo horizontal da la mayor tracción dentro de las 4 diferentes configuraciones y también brinda alta adherencia al terreno, pero tiene la desventaja de no tener una maniobrabilidad precisa, por lo que afecta en la dirección del vehículo.

Al contrario del dibujo horizontal el dibujo vertical brinda estabilidad direccional, poca resistencia al giro y sirve para altas velocidades, aunque la tracción que brinda es muy baja y poca adherencia al terreno, este tipo de dibujo es el que más se usa comercialmente en los automóviles.

El dibujo diagonal que es muy usado en tractores combina la adherencia del dibujo vertical y la estabilidad direccional del dibujo vertical otra de las ventajas es que expulsa a los lados la tierra o el agua lo que permite manejar a altas velocidades. La desventaja que presenta este dibujo es que debe de estar en la dirección adecuada para que proporcione el efecto deseado.

El dibujo diagonal escalado es una mejora a la propiedad de tracción del dibujo diagonal, los tractores usan mucho este tipo de configuración la desventaja de este es que tiene poca área de contacto lo cual resta estabilidad al vehículo sobretodo en velocidades altas también carece de buena estabilidad direccional.



*Imagen5.19. Propuestas de ruedas con banda de rodamiento modificada.*

Al observar y analizar estas configuraciones se concluyó que un dibujo diagonal escalado con algunas modificaciones, como dejar una cinta vertical a la mitad de la rueda nos proporcionaría la estabilidad direccional, el tamaño indicado para las diagonales y con algún recubrimiento exterior, podría cumplir a plenitud con los objetivos del rover.



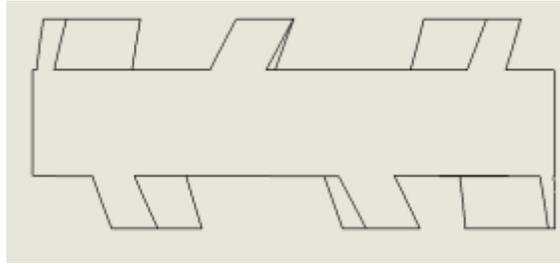


Imagen5.20. Diseño final del dibujo de la banda de rodadura.

Con estas propuestas se extrajo lo mejor de cada una resultando en un diseño final que a diferencia del primer diseño cumplía con una banda de rodadura diseñada específicamente para brindar tracción y dirección al rover. Con la banda central también aumenta la estabilidad en los giros. Se aumentó el alto de la banda de rodadura del diseño inicial de 20 [mm] a 35 [mm] así cambiando el diámetro total de la rueda a 225 [mm]. Para poder acoplar la banda de rodadura se diseñaron pequeñas paredes para encajar la banda y que no se desplazara o moviera de lugar y luego se pegaron encima 3 capas de material de espuma de neopreno para que no fuera muy dura la superficie y pudiera acoplarse a la forma del terreno y no muy blando para que no se hundiera en el terreno.

También se hicieron dos tapas en vez de una sola esto se hizo con el fin de poder dar mantenimiento más fácilmente y poder acceder al interior de esta por ambos lados, las tapas se hicieron igualmente de Nylamid, en una de las tapas se acoplo el motor con la llanta, en la otra tapa se insertó el motor con un rodamiento para que le diera soporte sin interferir con el movimiento de la rueda. Ambas tapas se unieron por medio de tornillos a la rueda.

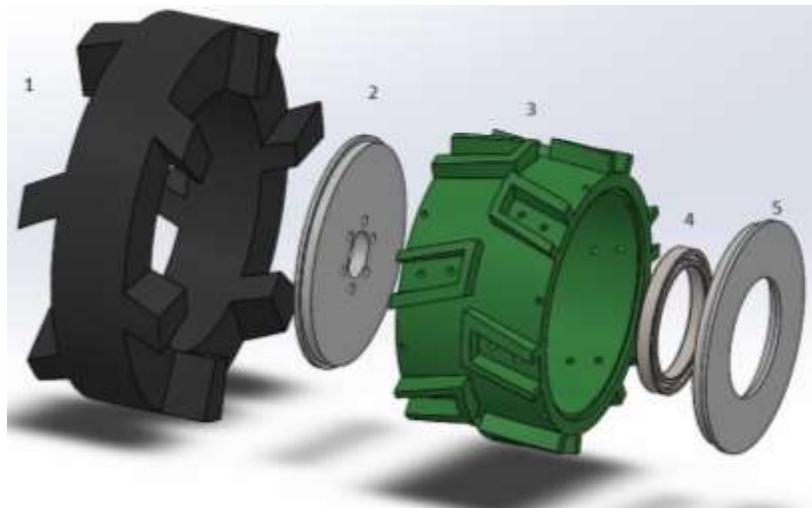


Imagen5.21. Perspectiva explotada de la rueda y sus partes. (1) Banda de rodadura. (2) Tapa de acoplamiento con el motor. (3) Rueda. (4) Rodamiento para el motor. (5) Tapa de soporte para el motor.





*Imagen5.22. Diseño final de la llanta.*

## Motores

Un motor de corriente directa es un simple motor que usa electricidad y un campo magnético para producir torque lo que causa que gire. Un moto reductor es un motor de corriente directa al cual se le anida un mecanismo basado en un tren de engranes que dependiendo de su configuración hace que el motor reduzca su velocidad pero aumente en una proporción el torque a su salida.



*Imagen5.23. Motoreductor.*





Cada llanta deberá contar con un motor reductor independiente para tener más tracción en cada una de ellas, en base a los requerimientos y objetivos relacionados con la tracción y en específico con los motores como son: la velocidad mínima para completar dos ciclos en 10 minutos y el peso que para la selección del motor no se hizo mucho énfasis ya que dependía de los motores que todo el robot pudiera avanzar sin carga o con carga, que no se hundiera y que pudiera sobrepasar algún obstáculo si llegara a ser necesario.

Para cumplir con el objetivo de que el rover completara dos ciclos en 10 min, se calculó que debía recorrer una distancia de 9 metros que es la longitud de la arena. Por lo que se concluyó que requeriría de una velocidad promedio para desplazarse de 9 [m/min].

$$V_{promedio} = 0.15 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Para la selección de los motor reductores tomando en cuenta que el robot tendría un peso máximo de 80[Kg] y basado en el objetivo que debería cargar un mínimo de 35 [Kg] con un factor de seguridad de 2. Esto quiere decir que los motores se seleccionaron para que pueda mover un peso promedio de

$$Peso_{maximo} + Carga_{minima} * 2$$

$$80 [kg] + 35 [Kg] * 2 = 150 [Kg]$$

Se seleccionó un motor de la marca Anaheim Automation modelo BDPG-60-110-24V-3000-R76 el cual requiere de 24 [V] de energía, llega a consumir hasta 10 [A] de corriente máxima, entrega 30 [W] de potencia, cuenta con un torque promedio de 77 [Kg/cm], mide 194 [mm], pesa 1760 [g] y puede ir a una velocidad de 33 [RPM] que equivale a 0.138 [m/s].



Imagen5.24. Motor reductor BDPG-60-110-24V-3000-R76, de Anaheim Automation.





## Manufactura

Para la manufactura de las ruedas completas se necesitaron 6 piezas por cada rueda, una tapa que se acople con el motor hecha de Nylamid, un acoplamiento para fijar el motor y la llanta hecho de aluminio, una tapa para albergar un rodamiento y diera soporte al motor hecha de Nylamid, una rueda hecha de Nylamid, una masa que albergue al motor y le de soporte hecha de Aluminio, una masa que sirva para acoplar la rueda con la suspensión y pueda absorber la energía de la suspensión hecha de Nylamid. Para sintetizar las piezas necesarias se creó una tabla con el material base necesaria.

Numero de Partes	Descripción	Material	Medidas Base (por pieza)
4	ruedas	Nylamid	Barra cilíndrica de 250 [mm] de diámetro x 110 [mm] de espesor
4	Tapa acoplamiento con el motor	Nylamid	Barra cilíndrica de 165 [mm] de diámetro x 11 [mm] de espesor
4	Tapa de soporte al motor	Nylamid	Barra cilíndrica de 165 [mm] de diámetro x 11 [mm] de espesor
4	Acoplamiento del motor con la rueda	Aluminio	Solera de 64 [mm] x 64 [mm] x 30 [mm]
4	Masa para el motor	Aluminio	Barra cilíndrica de 110 [mm] x 190 [mm] de espesor
4	Masa para acoplar la rueda con la suspensión	Nylamid	Barra cuadrada de 155 [mm] x 110 [mm] x 75 [mm]

Tabla 5.12. Material necesario para las ruedas.

El maquinado de las dos tapas, el acoplamiento del motor con la rueda, así como la masa para el motor, se maquinaron en un torno convencional manualmente. Para la masa para acoplar la rueda con la suspensión se hizo en una fresadora y un torno. La rueda base tomo un proceso más largo y difícil que a continuación se explica a detalle.

Se obtuvo el material en dos diferentes piezas de Nylamid, un cilindro de 8'' de diámetro y 200 [mm] de profundidad y una barra de 400[mm]\*100[mm]\*300[mm]. Primero se cortó la barra y el cilindro a la mitad para tener cuatro piezas, después se le dio forma cilíndrica a las dos barras con un torno. Ya teniendo 4 piezas cilíndricas idénticas, se usó una fresadora para desbastar todo el interior de la rueda haciéndola hueca. Después de eso se hicieron pruebas y con un prototipo de menor escala para manufacturar la banda de rodadura, se hizo un programa para una máquina fresadora CNC de 4 ejes. Se realizaron maquinados más lentos para detallar y hacer precisas las medidas de las ruedas, por último se barrenaron y machuelearon para poder integrar las capas de hule de neopreno.



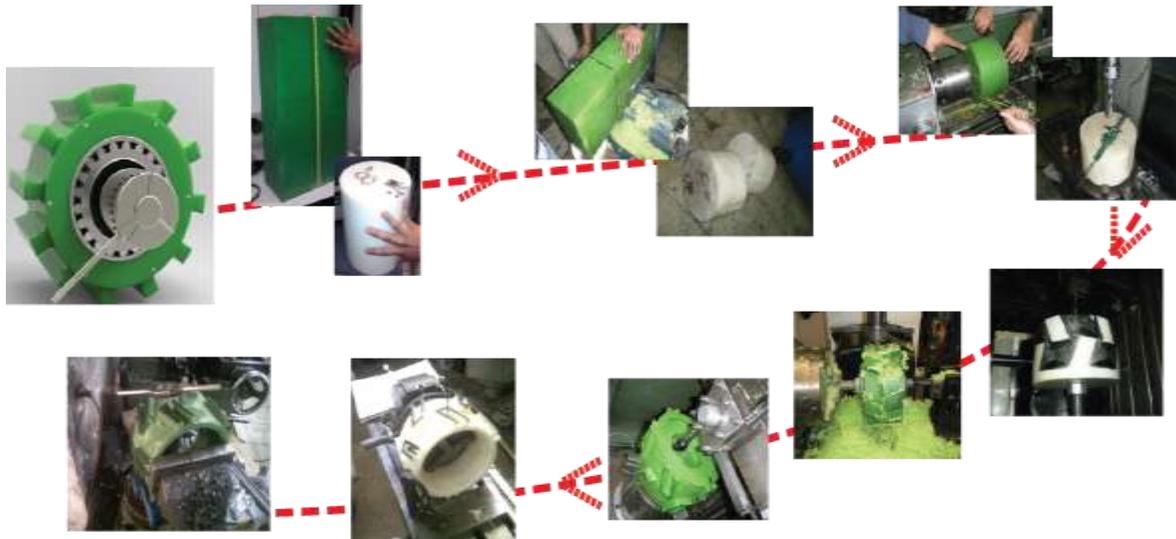


Imagen5.25. Proceso de manufactura de las ruedas.

Teniendo la rueda maquinada por completo y con el objetivo de no exceder el peso en mente el peso de las ruedas totales incluyendo las piezas maquinadas, el motor y el rodamiento fue de:

PIEZA	MASA [g]
MASA	371.31
MOTOR	1700
BALERO	600
COPLA	1.92
TAPA	138.66
RUEDA	1167.87
<b>TOTAL</b>	<b>3979.76</b>

Tabla5.13. Peso de las ruedas por pieza.

El diseño final de las 4 ruedas fue esencial para que funcionara como esperábamos el robot, la elección de materiales ligeros y la combinación del diseño hizo que las ruedas solo pesaran 16 [Kg] en total con un motor capaz de mover al robot cargado y poder pasar por cualquier obstáculo que estuviera incluido en la competencia.





*Imagen 5.6 Llanta final sin capa de neopreno (arriba) y con neopreno (abajo).*

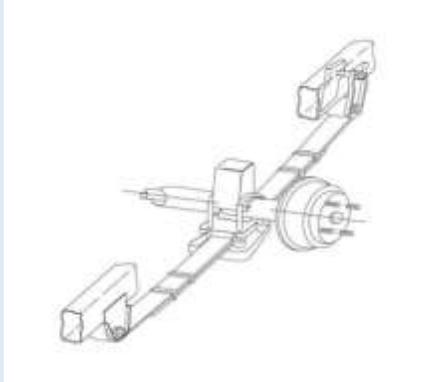
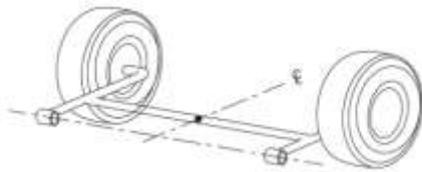
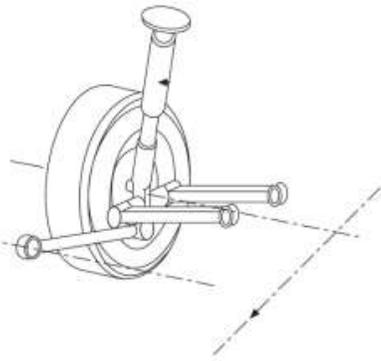
#### **V.IV Suspensión.**

El sistema de suspensión es el término que se le da al sistema de resortes, amortiguadores y eslabones que unen la estructura principal de un vehículo o rover a las llantas y proporciona movimiento relativo entre ambos. El sistema de suspensión tiene dos propósitos principales contribuir a la estabilidad en todo terreno del vehículo y absorber la energía que el terreno irregular puede transmitir al rover esto lo hace maximizando la fricción de las ruedas con la superficie del terreno.

Existen dos tipos de suspensiones básicas, dependientes e independientes donde en la primera el movimiento de la suspensión de un lado del vehículo es dependiente del movimiento de su contraparte en el otro lado. El segundo tipo de suspensión se refiere a que cada llanta cuenta con un sistema de suspensión lo que facilita su movimiento en terrenos irregulares.





Tipo de suspensión	Nombre	Imagen	Características
Dependiente	Ballesta		<ul style="list-style-type: none"><li>• Son láminas de acero montadas una sobre otra lo que crea un muelle verticalmente y una barra rígida horizontalmente.</li><li>• Los resortes están conectados directamente de un lado y al eslabón del otro.</li><li>• Esta configuración ayuda a modificar el largo del resorte dependiendo la carga.</li></ul>
Dependiente	Semi-dependiente		<ul style="list-style-type: none"><li>• La conexión rígida que existía en tipo ballesta entre las ruedas es reemplazada por una junta</li><li>• Suele ser más fácil de implementar pero difícil desarrollar la flexibilidad.</li></ul>
Independiente	Macpherson		<ul style="list-style-type: none"><li>• Simple y de bajo costo</li><li>• El movimiento de la rueda no es vertical describe un trayectoria parabólica.</li><li>• Transmite el movimiento directo al chasis lo que puede provocar ruidos y vibraciones.</li></ul>





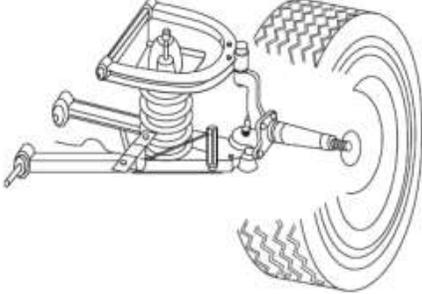
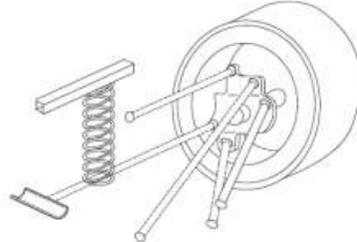
Independiente	Doble Horquilla		<ul style="list-style-type: none"><li>• Usa dos horquillas paralelas</li><li>• Cada una tiene dos puntos de sujeción con el chasis</li><li>• Un punto con la rueda</li><li>• Es muy controlable</li></ul>
Independiente	Multi Brazo		<ul style="list-style-type: none"><li>• Usa 3 o más brazos laterales.</li><li>• Uno o más brazos longitudinales</li><li>• Permite al vehículo estirarse más.</li></ul>

Tabla 5.14. Tipos de suspensiones.

Se analizó el mecanismo de la suspensión Macpherson y como esta podría ayudar a mejorar a absorber las fuerzas tangenciales que el terreno des uniforme transmitiera al rover por medio del software Wolfram Mathematica se hizo una simulación de la dinámica de esta suspensión y los cálculos necesarios para hacer los eslabones a las medidas necesarias para que la suspensión sirviera para pasar sobre obstáculos como rocas y cráteres de 30 [cm] por encima del nivel del suelo en el caso de las rocas y 30 [cm] por debajo del suelo para los cráteres.

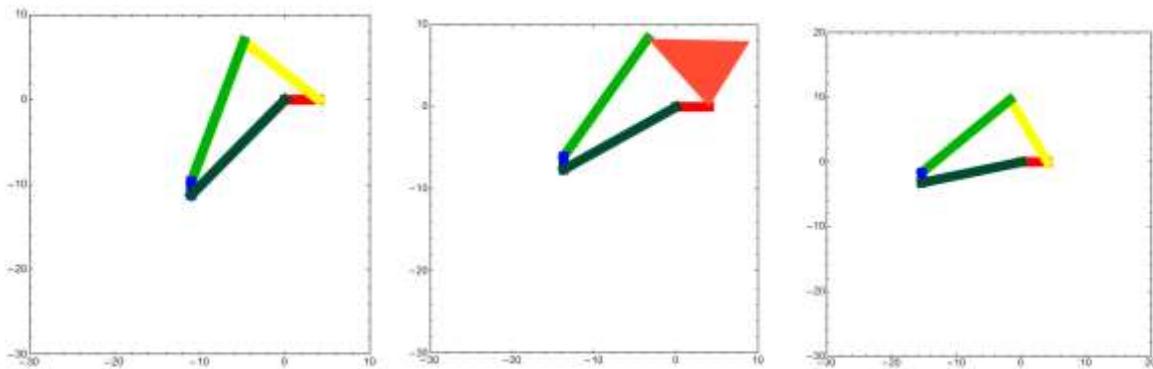


Imagen 5.27. Simulación de la dinámica de la suspensión.





Los resultados obtenidos no fueron muy positivos ya que se requería de un brazo muy largo además de que la trayectoria que describía la llanta no era vertical, variaba varios grados del eje Y. Por lo que para comprobar los análisis teóricos se realizaron experimentos físicos con un prototipo de la suspensión Macpherson.

El experimento físico con el prototipo confirmó los cálculos realizados lo que se concluyó en no usar ese tipo de suspensión, creó un diseño que pudiera implementarse fácilmente y aunque no pudiera estabilizar del todo el rover si absorbiera diferencias del terreno para que no se transmitieran directamente a la estructura del chasis. Para ello se usaron dos barras que sirvieran como eslabón entre las ruedas y en el otro extremo el chasis con una junta rotacional para permitir el movimiento de este con un grado de libertad. Por otro lado se usó un resorte que fuera también enlazado desde la rueda al chasis en forma vertical para absorber la energía y restringir el movimiento de las dos barras.



*Imagen5.28. Diseño de la suspensión.*

Las barras se hicieron de aluminio de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor por 33 [cm] de largo dobladas a un ángulo de  $60^\circ$ . Estas se atornillaron a la masa que se maquilo de nylamid la cual está incorporada alrededor de la masa del motor en las ruedas. En el otro extremo se optó por usar bisagras industriales de alta resistencia de 2 pulgadas. Para el resorte se hicieron varias pruebas para determinar qué tipo y que longitud debería tener. Se concluyó por usar resortes que tenían una resistencia de 100 [Kg] para que no se alterara la estabilidad del rover al no tener peso y cuando estuviera cargado con material pudiera tener cierta libertad de movimiento y no estar rígido al desplazarse por el terreno.





*Imagen5.29. Comparación de resortes usados en la suspensión.*



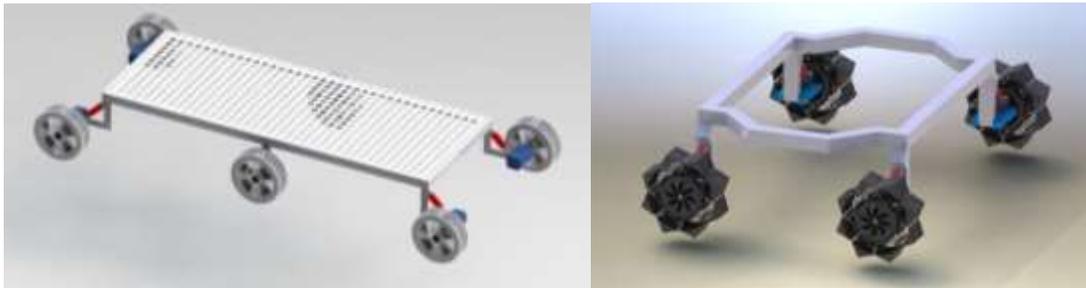
*Imagen5.30. Suspensión acoplada al rover.*





## V.V Chasis.

El chasis es la estructura base del robot en ella se acoplaran todos los sistemas y subsistemas, la estructura debe cargar con el peso del material recolectado más el peso de todo el rover a excepción de las ruedas que son las únicas que están acopladas por debajo del chasis, mantener siempre estable al robot, y absorber la energía que pasa a través de las ruedas y la suspensión. El chasis se puede definir como una estructura o marco físico en la que se basa un automóvil, un avión o en su caso un robot.



*Imagen5.31. Diseños conceptuales del chasis.*

Para la estructura del rover se quiso diseñar lo más simple posible para no tener problemas con la manufactura ya que sería una pieza muy grande, se tomaron en cuenta los diferentes sistemas que serían acoplados a este así como el espacio que se requeriría para cada pieza que se sujetara al chasis.

El chasis fue uno de los últimos sistemas en diseñarse ya que se trató de acoplarlo a las necesidades de los demás sistemas en especial de la excavadora. Se tomó en cuenta el espacio que se disponía del rover ya que el sistema de excavación abarcaría mucho de este, además de tomar en cuenta de que la excavadora tenía que tener el espacio libre en medio del rover. Esto marco una decisión definitiva para diseñar el chasis en forma que rodeara a la excavadora y a la vez pudiera sostenerla por ambos extremos.

Uno de los objetivos principales del chasis ya que era una de las piezas más grandes del rover fue el que tuviera la resistencia necesaria además de que no pesara mucho, normalmente en cualquier robot grande o máquina móvil la estructura del chasis es lo que más pesa ya que debe ser lo suficientemente robusto para soportar todo el robot en sí mismo y no tener vibraciones y desequilibrios en este. Una de las cosas que también se busca en la estructura es el poder tener un centro de masa que no varíe tanto o que pueda ser controlado para evitar volcaduras.



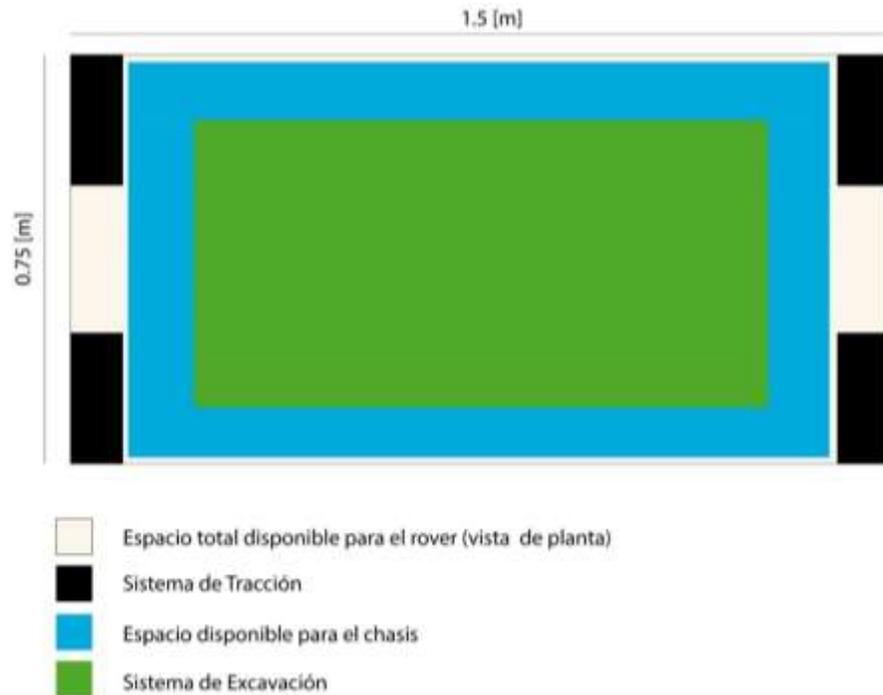


Imagen5.32. Distribución del espacio en el rover.

Para diseñarlo a diferencia de otros sistemas se siguió un procedimiento más sencillo para el material se dio mayor peso a la complejidad y el costo de la manufactura como desde un inicio se pensó hacer hueco para bajar el peso total, no importo tanto la densidad del material ya que se decidió que la ligereza del chasis estuviera en el diseño. Otro punto muy fuerte para la decisión de la estructura fue el peso que esta pudiera soportar sin doblarse o romperse.

Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	2
Costo de la Manufactura	3
Complejidad de la manufactura	5
Resistencia	4
Peso del material	2

Tabla 5.15. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.





Conceptos				
	Factor de Peso	Aluminio	Fibra de Vidrio	Nylamid
Costo de materiales	0.125	8	6	4
Costo de la Manufactura	0.2	8	5	4
Complejidad de la manufactura	0.3	8	5	4
Resistencia	0.25	7	6	8
Peso del material	0.125	5	9	8
Valor útil total	1	7.375	5.875	5.5

Tabla 5.16. Comparación del material de la estructura del chasis.

El material elegido fue el aluminio, por la forma comercial en que se puede conseguir, se decidió que fuera un perfil rectangular hueco, de forma que pudiera bajarse el peso en la mayor cantidad posible, el aluminio también se eligió por su menor costo comparado con mandar a manufacturar o maquilar un chasis completo.

La selección de las piezas para la estructura una vez definido el material Aluminio fue el tipo de perfil que se usaría para que diera seguridad de estabilidad al rover. Se utilizó un perfil de tubo hueco rectangular de 3 x 1 [pulgadas] por 1.5 [mm] de espesor.

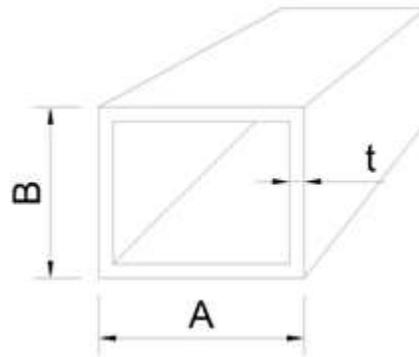


Imagen 5.33. Perfil de aluminio.

Antes de manufacturar la estructura del chasis y hacer el diseño final se hicieron pruebas de elemento finito con ayuda del software Solidworks® para asegurar que tanto el material, la forma del perfil y sus dimensiones eran las correctas para soportar al rover.



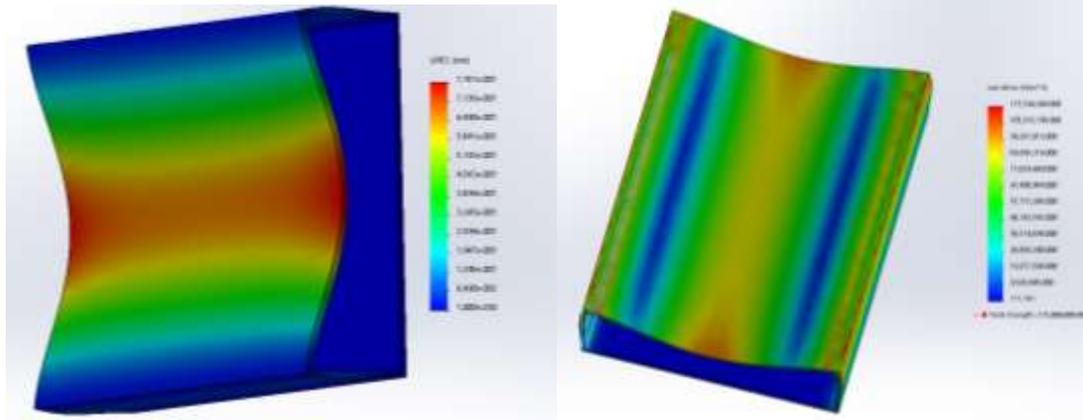


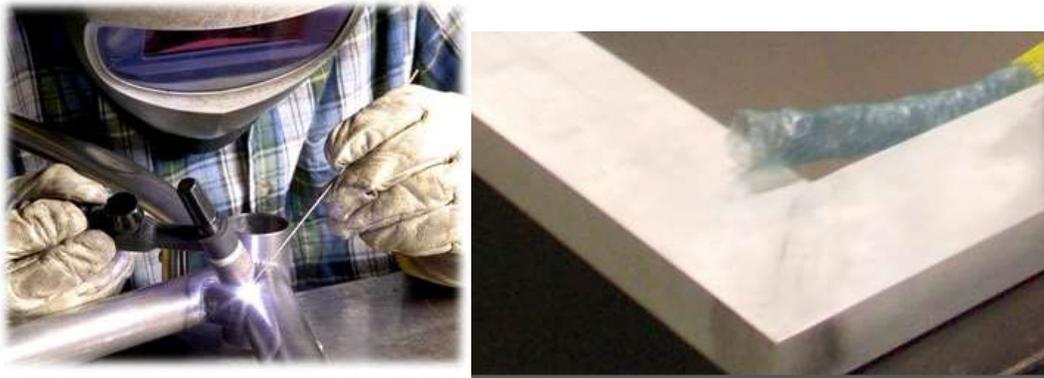
Imagen5.34. Análisis de elemento finito: deformación (Izq) von mises del esfuerzo en el material (Der).

Los resultados de los análisis arrojan un esfuerzo máximo de 115 [MPa] con una fuerza de 100 [Kg] y su módulo de elástico es de 215 [MPa] por lo que es suficiente para aguantar esa presión tomando en cuenta que la fuerza que se ejerza en la estructura del chasis será distribuida por lo que no afecta tanto como el análisis que se hizo anteriormente. Para el análisis de desplazamiento muestra que el máximo desplazamiento que se presenta con una fuerza de 100 [Kg] es de menos de 0.8 [mm] por lo que se puede tomar como positivo el análisis para decidirse por el aluminio además que el factor de seguridad que se obtuvo fue de 1.8.

En principio el diseño de la estructura del chasis sería en forma de un rectángulo que rodeara a la excavadora por completo y esta pudiera bajar y subir apoyada del chasis. Sin embargo debido al diseño del sistema de depósito donde la excavadora gira con un mecanismo lineal (véase apartado V.V Depósito.), este necesitaría más espacio para poder girar y no pegar con el chasis por lo que se decidió usar un diseño en forma de "C" dejando libre un lado para el giro de la excavadora. Para este diseño fue muy importante analizar el centro de masa y su comportamiento para que no pierda estabilidad y pueda volcar.

Para la manufactura del chasis se unieron 3 tramos de perfil de aluminio (aleación 6063) por medio de soldadura TIG. La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) por sus siglas en inglés es proceso de soldadura con arco que usa un electrodo de gas tungsteno no consumible para producir la soldadura. El área de soldadura está protegida de la contaminación atmosférica por un gas inerte como puede ser el Argón o el Helio. Un metal de relleno se usa normalmente para fortalecer la soldadura y una fuente de corriente continua produce la energía que es conducida por el arco.





*Imagen5.35. Proceso de soldadura TIG (izquierda). Soldadura en el chasis (derecha).*

El diseño final del chasis se conforma por 3 piezas de aluminio de perfil de tubo rectangular unidas por soldadura TIG en forma de "C". Tiene una capacidad de soportar 200 [Kg] de carga estática. Resultando en una estructura, simple, compacta, de bajo peso con tan solo 2.5 [Kg] y muy resistente.



*Imagen5.36. Diseño final del chasis (arriba) Estructura del chasis final manufacturada (abajo).*





## V.VI Excavación.

El proceso de excavación ha sido fundamental para la construcción de edificaciones, así como para la extracción de recursos naturales durante la historia del hombre moderno. En general la excavación se puede definir como la extracción de material por encima o por debajo del suelo. Para propósitos del robot y por las condiciones de la arena de la competencia la excavación será por encima del suelo a este proceso de excavación también se le conoce como excavación a cielo abierto.

La minería de cielo abierto difiere de los métodos de excavación que requieren internarse por un túnel o bien perforar el subsuelo para poder extraer material se usa normalmente cuando los depósitos del recurso o mineral a extraer se encuentra cerca o en la superficie misma.

El sistema de excavación del rover es el encargado de poder recolectar simulante BP-1 en el área designada de la arena de la competencia. Para ello se tomó un proceso de diseño requerido para tomar la mejor decisión en cuanto al tipo de sistema e innovarlo para crear algo único que cumpliera con los objetivos principales del rover.

Para la excavación se tiene que tomar en cuenta que esta debe recolectar un mínimo de 30 [Kg] de simulante BP-1, debe almacenarlo sin dejar caer el material al desplazarse el rover además de que el tiempo es crucial para que complete los objetivos, para ello se distribuyeron los tiempos de cada acción del rover en una ronda de la competencia equivalente a 10 [min].

Acción del rover	Tiempo estimado [min]
Localización inicial	0.5
Transporte al área de excavación	2
Excavación	2
Almacenamiento	2
Transporte al área de depósito	2
Depósito	1.5
<b>Total</b>	<b>10</b>

Tabla 5.17. Tiempos máximos por acción por ronda.

Tomando estos valores de tiempo como máximos el sistema que se debe diseñar deberá poder hacerlo en solo 2 [min] los 30 [Kg] de simulante BP-1. Para determinar ciertas propiedades del simulante BP-1. Se hicieron pruebas con un simulante muy parecido en las propiedades físicas al BP-1 llamado JSC-1A de la empresa Orbitec (véase apartado IV.II.III Pruebas). De estas pruebas se tomó en cuenta principalmente el ángulo de reposo calculado del





material que resulto de 32.8°, al igual que su comportamiento en ciertos materiales.

Material	Angulo critico (Comienzo del desplazamiento)	Angulo critico máximo (Todo el material se ha desplazado)
Aluminio	22°	30°
Fibra de vidrio	23	31°

Tabla 5.18. Resultados de pruebas de ángulo crítico.

Se generaron diferentes conceptos con los métodos de excavación comerciales mediante una lluvia de ideas pudimos empezar por eliminar los conceptos que no cumplían con los requerimientos establecidos por la NASA.

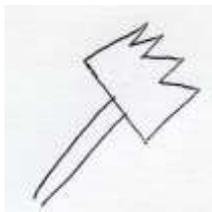


Imagen 5.1 "Pala"

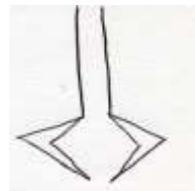


Imagen 5.2 "Tenaza"

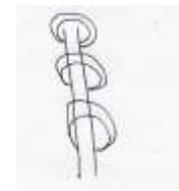


Imagen 5.3 "Tornillo"

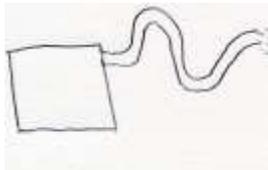


Imagen 5.4 "Aspiradora"

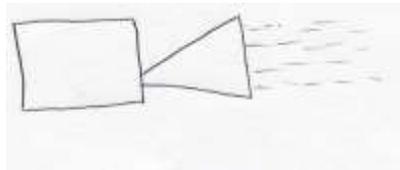


Imagen 5.5 "Propulsión"



Imagen 5.6 "Escoba"

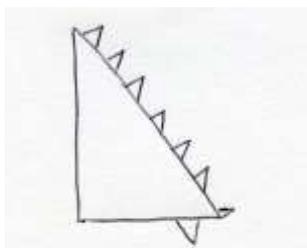


Imagen 5.7 "Cangilones"

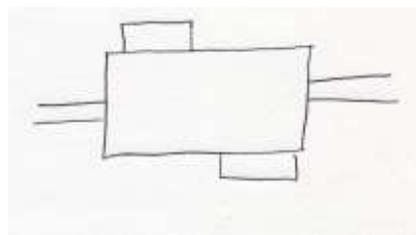


Imagen 5.8 "Cilindro giratorio"

Imagen 5.37. Lluvia de ideas de la excavadora.

Los conceptos que desde un inicio no cumplían con los requerimientos y tuvieron que ser eliminados fueron, la propulsión y la aspiradora ya que estos dos debían usar por lo menos un proceso que incluía oxígeno o algún





gas para crear la turbina (véase apartado III.I.I.III Requerimientos). También se analizaron los diferentes conceptos que se usan comercialmente.

Imagen	Nombre	Características	Observaciones
	Retroexcavadora	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiene una pala frontal</li> <li>Tiene un brazo con 2 ejes de libertad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excavación lenta</li> <li>Tiene mucha fuerza en la pala</li> </ul>
	De cuchara de arrastre	<ul style="list-style-type: none"> <li>Movimientos de materiales</li> <li>Longitudes muy amplias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede manejar bien los materiales</li> <li>Precisa</li> </ul>
	Pala de vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realiza la excavación con un mecanismo automático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mecanismo complejo</li> <li>Excava muy poco</li> </ul>
	De Cangilones	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excavación continua</li> <li>Estable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere de un segundo mecanismo de almacenaje</li> </ul>
	Excavadora de aspiradora	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excavación continua</li> <li>Mecánicamente es más eficiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La cantidad del excavado depende del tamaño de la bomba</li> </ul>

Imagen 5.19. Excavadoras comerciales.

Si se recurre al recurso del Benchmarking que se hizo (véase apartado III.III.II Benchmarking) se puede observar que los conceptos más usados son el de cangilones, la pala y el cilindro giratorio. Junto con las pruebas realizadas (véase apartado IV.II.III Pruebas) se analizaron a detalle estos tres sistemas para poder elegir el sistema más óptimo para el rover.

La pala se define por ser un mecanismo de por lo menos dos grados de libertad, cuenta con un cubo tipo cuchara que se entierra en el terreno y el mecanismo en este caso un brazo de dos eslabones con un motor cada uno, retrae la cuchara llena con el material recolectado. Para almacenar el material lo más fácil o usual en el mecanismo de palas es que alce casi a 90° uno de sus eslabones provocando que la cuchara tire el material que contiene hacia la parte de atrás, donde normalmente se encuentra un contenedor que acumula el material que la pala va recolectando.



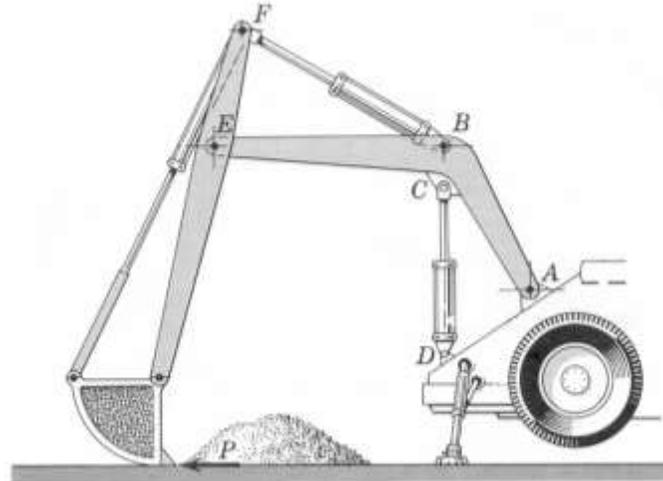


Imagen 5.38. Diagrama del mecanismo de pala.

El mecanismo de tipo pala presenta algunas ventajas como la cantidad de material que pueda recolectar de una sola vez aunque es un sistema lento, además de ser un sistema robusto sin embargo depende mucho de la potencia que puedan entregar los motores. No se requiere mucho control en el mecanismo pero si podría desestabilizar el rover si se atasca el brazo o si exige más fuerza de la que los motores den. Otra cosa para considerar es que se requiere de un gran contenedor que pueda albergar el material recolectado por la pala, además del polvo que genera al dejar caer el material sobre el contenedor.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• El brazo puede ser dirigido a una posición específica.</li><li>• Fácil de implementar</li><li>• El mecanismo tiene mucha fuerza para excavar a profundidad</li><li>• Sistema robusto</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Para que sea robusto pesaría mucho</li><li>• Mecanismo Lento</li><li>• Limita la excavación en el tamaño de la pala</li><li>• Necesitaría un subsistema de almacenamiento.</li><li>• La excavación no es continua</li><li>• Se necesitaría colocar por lo menos cuatro motores.</li><li>• Cambiaría el centro de masa del robot desplazándolo hacia el frente, lo que podría ocasionar una volcadura.</li></ul>

Tabla 5.20. Ventajas vs Inconvenientes Pala.





*Imagen 5.39. Imagen de vehículo usando el mecanismo de Pala.*

La excavadora de cangilones tiene una estructura más robusta que los mecanismos de pala, estos se utilizan en excavación a cielo abierto, su función principal es excavar continua y sistemáticamente a gran escala. Su principal característica es que está compuesta por una cadena que dibuja una trayectoria cerrada como un triángulo o un ovalo, y tiene pequeñas cucharas o cangilones distribuidas simétricamente sobre la cadena. La otra opción es una rueda en forma de circunferencia que al igual que la cadena esta tiene cangilones distribuidos en ella. La diferencia entre los dos tipos de excavadoras es que la de la cadena aprovecha su brazo o su extensión total para distribuir los cangilones mientras que la rueda usa un brazo más largo pero la circunferencia solo gira sobre su propio eje y el material lo deposita en una banda o transportadora que guía el material al recipiente correspondiente.

Estos cangilones giran alrededor de la cadena o rueda guiándose por la trayectoria, provocando que mientras algunos cangilones estén excavando otros estén depositando el material en un contenedor. Esto facilita la tarea de excavar ya que lo hace continuamente y aunque debe de estar a una velocidad óptima para recolectar material está limitado a una velocidad máxima para que en vez de recolectar no aviente el material. Es un mecanismo muy estable aunque se tiene que tomar en cuenta que la cadena o banda que se use para mover el mecanismo puede estar expuesta al polvo que se genere y es probable que se atasque. Este tipo de sistemas pueden ser controlador fácilmente por tiempo lo que da una ventaja a la hora de analizar el material que podría recoger sistemáticamente.



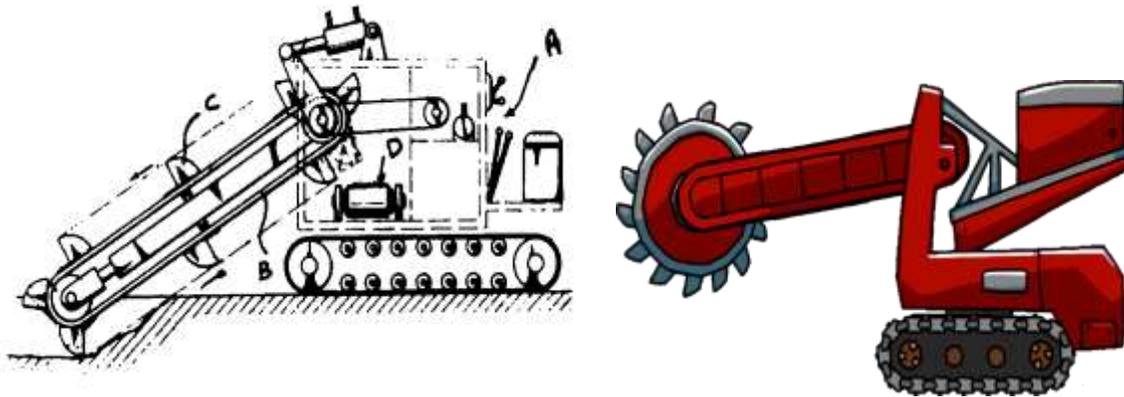


Imagen 5.40. Mecanismo de cangilones. Cadena de cangilones (izquierda), Rueda de cangilones (derecha).

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema fácil de controlar</li><li>• Excavación continua</li><li>• Puede ser retráctil lo que ahorra espacio</li><li>• La excavación se realiza con una mínima dispersión de polvo</li><li>• Se pueden controlar los tiempos fácilmente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El sistema es pesado</li><li>• Excavación no precisa.</li><li>• A pesar de ser retráctil al extenderse la dimensión que ocupa es muy grande</li><li>• La excavación está limitada por la extensión de su brazo</li><li>• Su velocidad está limitada en un punto donde puede dejar de excavar si va muy rápido y solo generar polvo</li></ul>

Tabla 5.21. Ventajas vs Inconvenientes del mecanismo de Cangilones.

El mecanismo de cilindro giratorio consiste en un cilindro hueco que gira sobre su propio eje y tiene salidas o rampas distribuidas en diagonal a lo largo del ancho del cilindro, estas rampas sirven para ir recolectando el material al girar el cilindro, dos de las ventajas más importantes son que incluye un sistema de auto almacenamiento esto quiere decir que al estar excavando recolecta el material y lo guarda en el mismo cilindro, otra de las grandes ventajas es el poder depositar el material con solo girar el cilindro en la dirección contraria. Sin embargo por grande que sea el cilindro no se puede almacenar el volumen total de este ya que si se llega a llenar el material puede sobre pasar los topes que tienen las rampas para que el material no se regrese teóricamente. 1/3 del volumen total del cilindro podría asegurarse que es su capacidad máxima antes de tirar lo que ya tiene aunque esta capacidad la pueda llenar muy rápidamente ya que no está limitada su velocidad.





Imagen 5.41. Mecanismo de cilindro giratorio.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Excavación continua</li><li>• Fácil de implementar</li><li>• Auto almacenamiento</li><li>• Ahorro en peso</li><li>• Un solo actuador</li><li>• Fácil medición de tiempos</li><li>• Es fácil depositar el material</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• No se puede aprovechar el 100% del espacio del cilindro.</li><li>• Se puede perder mucho material por las entradas.</li><li>• Media velocidad.</li><li>• No puede excavar a profundidad.</li></ul>

Tabla 5.22. Ventajas vs Inconvenientes del mecanismo de cilindro giratorio.

En conclusión el cilindro giratorio nos proporciona mayor control en la velocidad, como en los tiempos además de tener un sistema de auto almacenamiento. Por otro lado el sistema de cangilones que es de excavación continua aunque es más lento es más estable y la cantidad a excavar solo depende del tiempo y el recipiente que tenga. La pala sirve bastante para excavar grandes cantidades de material de una sola vez, demanda más control en su posición y su movimiento, de los cuales depende aunque también del recipiente con el que cuente. Para analizar mejor las tres opciones que se tienen para un sistema de excavación se parametrizaron y jerarquizaron ciertos criterios que servirán para evaluar las soluciones y analizarlas.





Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	3
Costo de manufactura	4
Volumen de trabajo	4
Eficiencia	5
Complejidad del mecanismo	3
Mantenimiento	2
Peso	3

Tabla 5.23. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.

Se realizó una matriz para vincular los requerimientos ya especificados (véase apartado III.I.I.III Requerimientos) con los criterios de evaluación y ver más a detalle la relación que guardan unos con otros.

	Frecuencia de Mantenimiento	Facilidad de Mantenimiento	Capacidad	Peso	Tamaño	Costo	Velocidad	Durabilidad
Poco mantenimiento		1	0	0	1	1	1	1
Fácil mantenimiento	0		1	0	1	1	0	1
Amplia Capacidad	0	0		1	1	1	1	0
Ligero	0	0	1		1	1	1	0
Pequeño	0	0	1	1		1	1	0
Mediano Costo	1	0	1	1	1		1	1
Velocidad media	0	0	1	1	0	1		0
Durable	1	0	0	1	1	1	0	
	2	1	5	5	6	7	5	3
	0.1176	0.0588	0.2941	0.2941	0.3529	0.4117	0.2941	0.1764

Tabla 5.24. Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.





En los resultados que nos arroja esta matriz se puede observar los parámetros que se relacionan de una manera más estrecha con los criterios de evaluación, siendo el que tiene más peso el costo, esto es comprensible ya que dependiendo del presupuesto que se tenga se puede obtener un sistema durable, ligero, que requiera poco mantenimiento. Pero dejando un poco al lado el costo el principal objetivo se puede centrar en la capacidad de almacenamiento, la velocidad que va muy ligada a la capacidad, el peso y el tamaño que es te último también va muy ligado a la capacidad requerida. El peso además de depender del diseño en su mayoría depende del material que se elija para el sistema, y el material normalmente está sujeto al presupuesto disponible. A continuación se recrea una tabla ya con los factores de peso en los criterios a evaluar para comparar de una manera más tangible los tres sistemas de solución que se tienen para la excavadora que son cangilones, cilindro giratorio y pala.

Conceptos				
	Factor de Peso	Pala	Cangilones	Cilindro
\$ Materiales	0.125	8	6	5
\$ Manufactura	0.17	7	5	4
Volumen de trabajo	0.17	7	5	6
Eficiencia	0.2	3	8	3
Complejidad mecanismo	0.125	4	6	9
Mantenimiento	0.08	6	4	9
Peso	0.125	3	5	8
Valor útil total	0.995	5.335	5.745	5.77

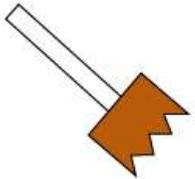
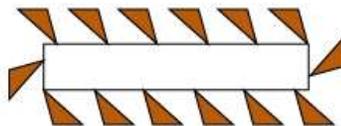
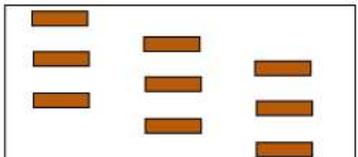
		
Pala	Cangilones	Cilindro

Tabla 5.25. Matriz de decisión de la configuración del sistema de excavación.



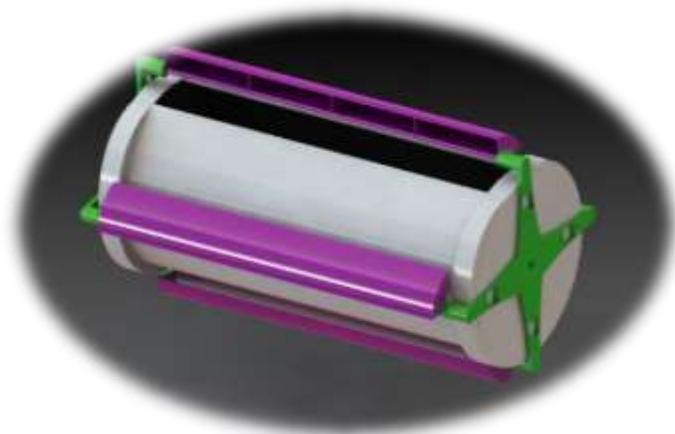


Los resultados fueron muy parejos con la excavadora de cangilones y la de cilindro giratorio, se hizo un prototipo de cada uno para de forma experimental poder analizar sus ventajas y desventajas a la vez de los detalles que por otro tipo de análisis no pudiéramos observar por otros métodos (Véase capítulo IV Etapa Creativa).



*Imagen5.42. Prototipos de la excavadora de cilindro giratorio (izq.) y excavadora de cangilones (der.).*

Los resultados de los prototipos y los experimentos fueron contundentes había que juntar los dos diseños en uno solo que tomara las ventajas de ambos. Para ello se decidió desarrollar un diseño conceptual de un sistema que pudiera tener la estabilidad, rapidez y auto almacenamiento del cilindro giratorio pero con las ventajas de los cangilones como almacenar todo lo recolectado, poder asegurar el excavado por tiempos y sobretodo bajar la desventaja de no poder usar todo el volumen del cilindro como un contenedor.



*Imagen5.43. Diseño conceptual de la combinación de cangilones y cilindro giratorio.*





El diseño conceptual se definió por tener un cilindro interior que se usaría de contenedor fijo mientras que acoplado a este tendría un tipo de cilindro exoesqueleto que tuviera por lo menos 4 cangilones del ancho del cilindro y este giraría alrededor del cilindro fijo cuando alguno de los cangilones estuviera en la parte de abajo del cilindro fijo este estaría excavando mientras que el que está en la parte superior estaría depositando el material en el cilindro fijo que contaría con un agujero en su parte superior. Uno de los problemas que atraía consigo este diseño fue la forma en que se vaciaría. Primeramente por que los cangilones podrían estorbar y hasta parar en proporción el material que se vacía, por otro lado se tendría que voltear el cilindro fijo para poder vaciar su contenido.

Para solucionar este problema se planteó la posibilidad de integrar un motor al cilindro fijo para que este pudiera girar cuando se deseara depositarlo. También otra posibilidad fue crear un mecanismo que con movimiento lineal pudiera voltear el cilindro sin que esta tuviera que girar sobre su propio eje.

Después de varios análisis y pruebas físicas se determinó que este tipo de sistema de excavación era el ideal para cumplir con los objetivos que se determinaron para la competencia Lunabotics Mining Competition también tomando en consideración los requerimientos que la competencia imponía.

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se aprovecharía el 100 % de la capacidad del cilindro</li><li>• El sistema seguiría siendo auto almacenable</li><li>• No se caería el material</li><li>• Aunque se reduce la velocidad del llenado comparado con el cilindro giratorio este podría almacenar más material</li><li>• Fácil sistema de depósito solo con voltear el cilindro interior</li><li>• Solo ocuparía 2 actuadores.</li></ul>

Tabla 5.26. Ventajas del nuevo concepto de excavación.

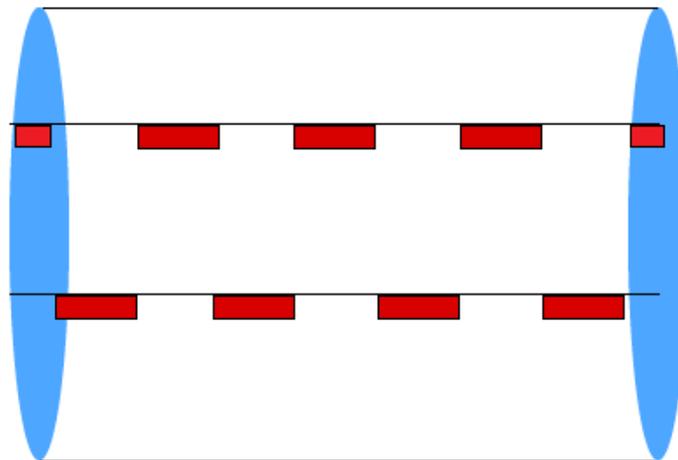




## Cangilones

Son recipientes que se usan para cargar verticalmente material a granel se usan en máquinas, molinos de agua y excavadoras de cielo abierto. Se decidió mejorar sustancialmente el diseño conceptual, poniendo 6 hileras en vez de 4 iniciales distribuidas  $60^\circ$  entre cada una. Si se pusiera un solo cangilón por hilera este tendría la longitud de casi 1 [m] (800 [mm]) lo que perjudicaría definitivamente al sistema perdiendo la estabilidad de este, ya que los esfuerzos que se concentraran en el centro del cangilón podrían deformar el material o incluso romperlo. Otra de las equivocaciones en el diseño conceptual fue la de un cangilón con el filo horizontal por completo por consecuente los esfuerzo serían mayores para romper el ángulo de reposo del material compactado y recolectarlo, al contrario de esto si el cangilón atacara el material con filo horizontal podría provocar que este se atascara perdiendo fuerza y en un peor escenario que quemara el motor por la corriente que este exigiría.

Con estas observaciones del diseño conceptual inicial se creó un nuevo diseño con 6 hileras de 4 pequeños cangilones de apenas 110 [mm] de longitud, con un ángulo ideal para atacar al material simulante BP-1 que fue calculado con experimentos (véase apartado IV.II.III Pruebas). Cada hilera contaba con 4 cangilones de 110 [mm] cada uno distribuidos de tal forma que una hilera quedara en medio de la siguiente la cual contaba con 3 cangilones de 110 [mm] y 2 cangilones de 55 [mm] uno en cada extremo para completar los 4. El concepto de esta distribución fue de poder recolectar en toda el área de la longitud del cilindro, así mientras una hilera recolectaba material en los espacios que tenía entre cangilones se desplazaba material acumulándolo para que la siguiente hilera le fuera más fácil recolectarlo.



*Imagen5.44. Diseño conceptual de la distribución de cangilones.*





Para el filo de los cangilones con ayuda de las pruebas y experimentos para sacar los ángulos de reposo y crítico del simulante BP-1 (véase apartado IV.II.III Pruebas). Se pudo diseñar un filo que pudiese atacar de forma adecuada el terreno generando un esfuerzo cortante en el material y no solo chocando con este. También se diseñó la forma del cangilón de manera que pudiera aprovechar el máximo volumen de capacidad pero respetando el ángulo de ataque y maximizando el ángulo de reposo para la acción de vertido cuando el cangilón estuviera por encima del cilindro fijo.

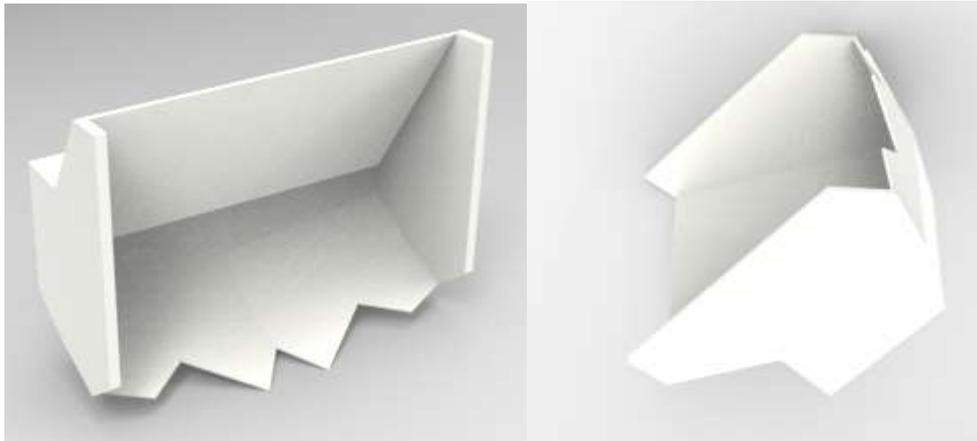


Imagen5.45. Diseño final de los cangilones.

Para el cálculo de área interior efectiva se calculó mediante la ecuación de cálculo de área por medio de coordenada  $A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Y_n(X_{n+1} - X_n)$ . Esta área servirá para poder realizar los cálculos teóricos del comportamiento del cangilón el a excavación.

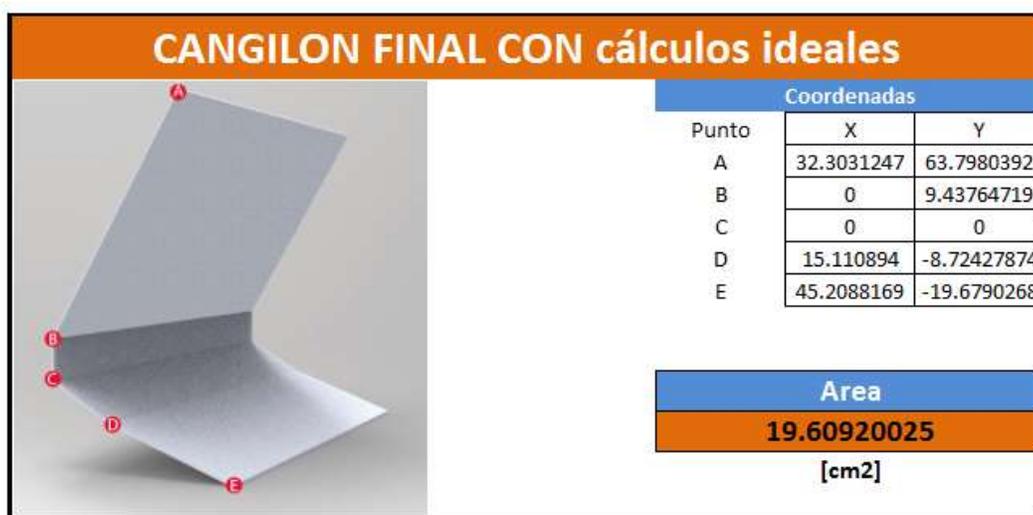




Imagen5.46. Cálculo del área interior del cangilón.

Teniendo el diseño interior de los cangilones se pudo calcular la masa de material que cada cangilón podrá cargar, en cuanto tiempo se llenaría el cilindro fijo y el volumen total que abarcaría el simulante BP-1. Para ello se necesitó el número de ejes del sistema que en este caso son 6 ejes, los 8 cangilones que hay por cada dos ejes, la longitud máxima del eje que para el diseño fue de 800 [mm], el porcentaje de volumen que teóricamente recolectara cada cangilón por seguridad y dependiendo de la velocidad para este porcentaje se usa de un 30-40% y por ultimo las revoluciones por minuto que da el motor.

Cálculo de cangilones					
Numero de ejes	6			Volumen total 1ra hilera	715.735809
Numero de canjilones	8	Volumen del canjilon	196.092002	Porcentaje del volumen	30%
Longitud del canjilon	10	Volumen real del	178.933952	RPM del motor	30
Longitud real	10	Volumen de las paredes	137.264402	Masa por cangilon	0.35214
Longitud maxima horizontal	80	Volumen ideal	1568.73602	Revoluciones para llenado	<b>38</b>
Longitud Total	80	Volumen real	1431.47162		

Volumen TOTAL	<b>1288.3</b> [cm <sup>3</sup> ]
<b>Masa TOTAL</b>	
<b>2.112852108</b>	<b>[Kg]</b>
Tiempo de llenado	<b>76</b> [s]

Tabla 5.27. Cálculos teóricos para los cangilones.

El material de los cangilones se determinó haciendo una selección de material entre aluminio, fibra de vidrio, fibra de carbono nylamid, dando un énfasis en el costo ya que se requerían un mínimo de 24 cangilones más las refacciones oportunas en caso de que se llegara a dañar alguno luego que estas piezas eran las únicas que entraban en contacto directo con el terreno y no solo eso sino que se su función es penetrarlo. Además del costo también se tomaron en consideración factores de peso, resistencia y módulo de Young.





Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	5
Módulo de Elasticidad	3
Ligereza	4
Resistencia	4

Tabla 5.28. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.

Conceptos					
	Factor de Peso	Aluminio	Nylamid	Fibra de Vidrio	Fibra de Carbono
\$ Materiales	0.4	8	5	6	4
Módulo de Elasticidad	0.1	4	6	8	9
Ligereza	0.25	3	5	7	9
Resistencia	0.25	7	8	7	8
Valor útil total	1	6.1	5.85	6.7	6.75

Tabla 5.29. Comparación del material del cilindro fijo.

Los resultados arrojaron que la Fibra de Carbono era mucho mejor en cuanto a resistencia, módulo de elasticidad, es muy ligera pero también es muy costosa por lo que se decidió omitirla y pasar a la siguiente opción que fue la Fibra de Vidrio una ventaja que nos da la fibra de vidrio sobre el aluminio es la forma de manufacturarlas, la fibra de vidrio se maquila mediante muchas capas aplicadas a un molde por lo que se pueden crear n cantidad de cangilones con un mismo molde. Por otro lado los materiales como el Nylamid y el Aluminio se tendrían que manufacturar artesanal, en el caso del Aluminio sería por medio de doblar y cortar una lámina (véase apartado IV.III.II Prototipo 2 "Cougar".) Como consecuente de un proceso mucho más lento y no muy preciso de manufacturación.

La fibra de vidrio realmente es vidrio. El vidrio se calienta hasta que se funde, después de eso se fuerza a través de orificios superfinos, creando filamentos de vidrio tan delgados que se miden en micras. Estos filamentos se pueden tejer a otras grandes muestras de material algunas de las ventajas que este material ofrece es su alta resistencia mecánica, su bajo peso, resistencia a la corrosión y la intemperie, menor necesidad de mantenimiento.





Para el diseño del cangilón final se hicieron análisis de elemento finito con una carga sobre la cara interior del cangilón de 20 [N], teniendo en cuenta que el cangilón se acoplara a la excavadora por medio de dos tornillos en la parte de atrás. Para realizar estos análisis se hizo a través del software de CAD Solidworks®

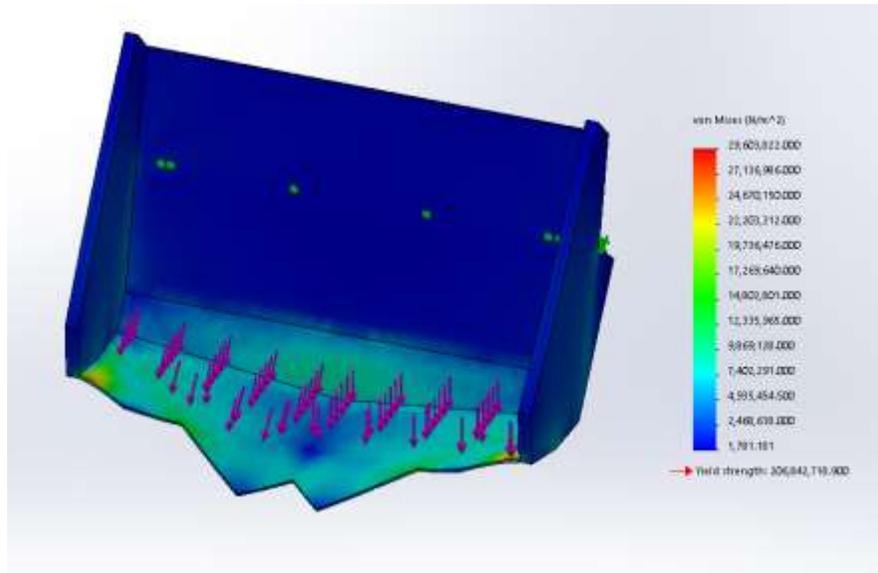


Imagen5.47. Mapa de calor con los resultados del análisis de Von Mises.

En el mapa de calor del análisis de von mises se puede observar que las esquinas son las que sufrirán una mayor presión sin embargo debido al módulo de tensión no llegara a deformarse por lo que el análisis fue contundente en determinar la elección de este material. Mientras que en los resultados del análisis de desplazamiento se observó que las puntas que entran primero en contacto con el terreno pueden sufrir un desplazamiento hacia debajo de hasta 3.5 [mm] lo que puede llegar a romperse pero el material que se usó puede sin muchos problemas soportar esta fuerza sin romperse, por razones de seguridad se usó más fuerza a la que los cangilones estarán expuestos pensando en algún escenario desfavorable de atascamiento. Con estos resultados se concluyó que el material de Fibra de Carbono sería el ideal para esta función de la excavadora y también se podrían crear refacciones sin mucho costo adicional por si tuviéramos que reemplazar alguno de ellos.



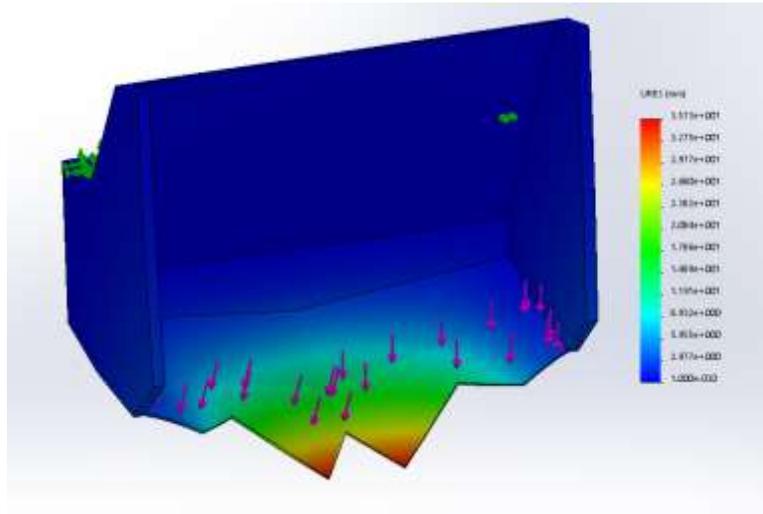


Imagen5.48. Mapa de calor con los resultados del análisis de desplazamiento.



Imagen5.49. Cangilones manufacturados en fibra de vidrio.

## Cilindro Fijo

El cilindro fijo era una parte fundamental del sistema de excavación con él se determinaría el tamaño de todo el sistema, la capacidad de almacenaje y sería la base para ensamblar todo el sistema. Para crear el cilindro se hizo un análisis de selección de materiales dando prioridad a la resistencia y el peso que este podría tener. También se plantearon objetivos para el cilindro.





Objetivos
Material ligero
Material no estándar que se pudiera manufacturar a medida
Material muy resistente

Tabla 5.30. Objetivos del cilindro.

Con los resultados que salieron de los experimentos y cálculos que se hicieron para saber cuánto material se podía recolectar se tomó como base para definir las medidas del cilindro. Tomando en cuenta las medidas mínimas de los cangilones se restringieron las medidas máximas del cilindro dejándolas en un cilindro de 280 [mm] de diámetro por 880 [mm] de longitud.

Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	2
Medidas Requeridas	3
Ligereza	5
Resistencia	5

Tabla 5.31. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.

Conceptos				
	Factor de Peso	Aluminio	PVC	Acrílico
\$ Materiales	0.05	8	9	5
Medidas Requeridas	0.15	8	4	9
Ligereza	0.4	4	9	7
Resistencia	0.4	8	7	7
Valor útil total	1	6.4	7.45	7.2

Tabla 5.32. Comparación del material del cilindro fijo.

Para el material se seleccionó entre acrílico, PVC y aluminio aunque en la selección resultó mejor el PVC por que representaba menor peso que el acrílico no se eligió por que las medidas son estándar por lo cual ninguna de las medidas comerciales cumplía con las medidas que se requerían. Por consiguiente se eligió el material acrílico el cual se define por ser un





derivado plástico que puede estar mucho tiempo condiciones desfavorables como la intemperie, sin sufrir ningún daño, es muy utilizado en construcciones por esas propiedades al igual que es un plástico más flexible que el promedio cuenta con propiedades como el soportar rayos ultravioleta sin dañar su estructura, es mucho más resistente que el vidrio lo que favorece al objetivo principal y su peso es aproximadamente la mitad que la del vidrio que cumple con el segundo objetivo. Otra ventaja que tuvo mucho peso para que se tomara la decisión de inclinarse por esta opción fue la de que se podía maquinar a la medida que se requiriera. Así que se mandó rolar por medio de un molde de aluminio y calor. Quedando las medias finales de 28 [mm] de diámetro por 800 [mm] de longitud.



*Imagen5.50. Cilindro final de acrílico.*

## Exoesqueleto

El exoesqueleto consta prácticamente de 6 barras de aproximadamente 1 metro de longitud que pudieran estar fijas de ambos lados por medio de una pared en cada extremo y esta pudiera girar alrededor del cilindro fijo, en las 6 barras se distribuirían y se fijarían los cangilones, para las 6 barras se eligió desde un inicio debido a la longitud de estas el material Aluminio en forma de perfil. Se seleccionó entre perfil tipo “plano”, tipo “T” y tipo “L”. En el perfil tipo “plano” la única ventaja es que es más ligero pero por ser tan largo este puede pandearse lo que perjudicaría la precisión de la excavadora y hasta podría romperse. En el perfil tipo “L” nos proporciona la rigidez necesaria para que no se pandeara sin embargo se optó por usar el perfil tipo “T” ya que era más reforzado y servía para tener un apoyo extra a la hora de fijar los cangilones en él, se usó un espesor de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, suficiente para el propósito de estos.



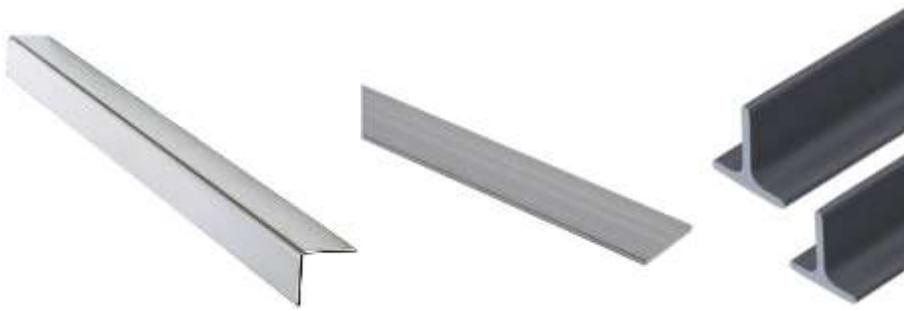


Imagen5.51. Perfiles de aluminio. Tipo "L", Tipo "Plano", Tipo "T".

Se les hicieron dos barrenos y se les inserto un tornillo a cada cangilón para que pudieran ser fácilmente acoplados al exoesqueleto, además de tener el brazo extra del perfil en "T" para poder apoyarse en él.

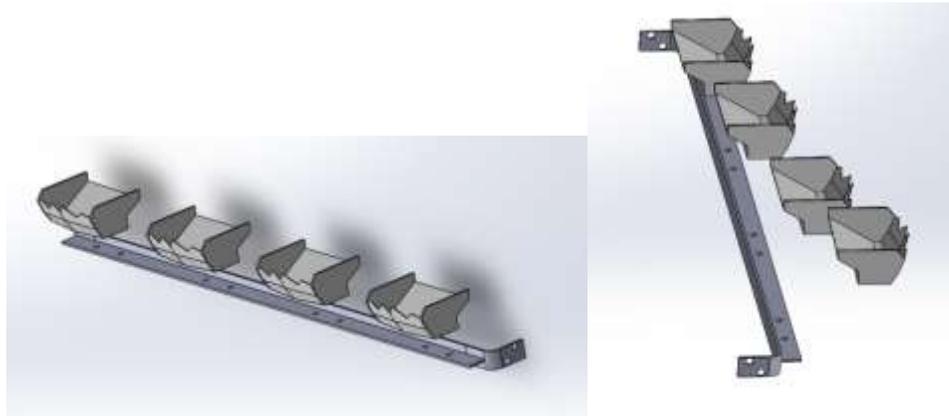


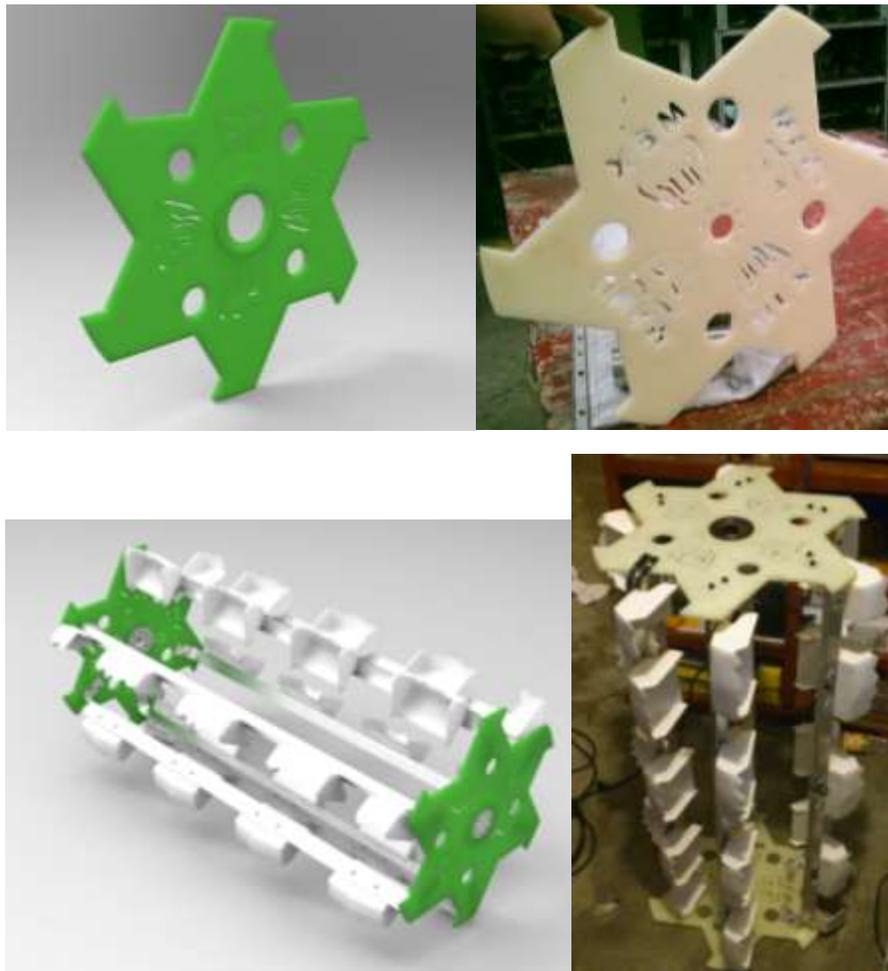
Imagen5.52. Ensamble de los cangilones en el perfil "T" (superior); perfiles con cangilones manufacturados (inferior).

Los objetivos de las paredes del exoesqueleto simplemente eran proveer estabilidad al exoesqueleto y resistencia suficiente para que este no se





abriera o se llegara a pandear, que tuviera la rigidez necesaria para desempeñar la tarea de excavación. Se propusieron diferentes soluciones tanto en aluminio como en Nylamid y aunque el aluminio fuera más barato representaba mucho peso que se podía restar con un material ligero como el Nylamid, se maquinaron dos discos de Nylamid de un grosor de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y un diámetro de 200 [mm], estas paredes resultaron ser muy efectivas para dar la rigidez al exoesqueleto y completar la excavadora del rover. El diseño frontal se hizo para darle estética pero con un trasfondo para quitarle peso innecesario y a la vez ayudar en su dinámica al girar.

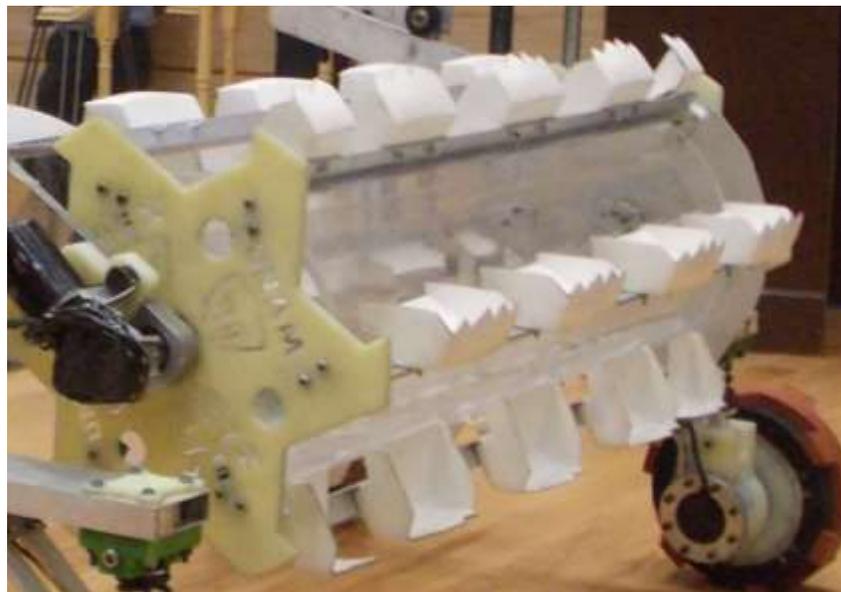
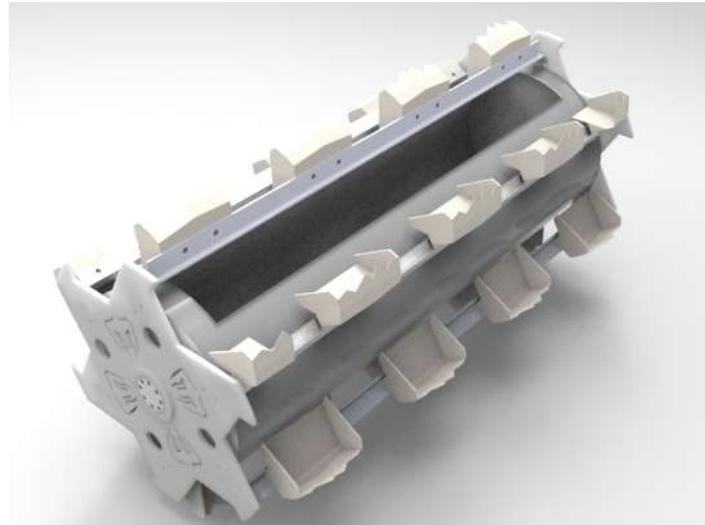


*Imagen5.53. Disco de Nylamid diseñado para el exoesqueleto de la excavadora; exoesqueleto final ensamblado.*





En conclusión la excavadora que se diseño puede dar la estabilidad de excavación continua, puede ser controlada por tiempos para tener un control más exacto sin embargo siempre se requieren pruebas físicas para comparar con la teoría calculada. La excavadora se manufacturo como se indica anteriormente y luego se ensambló con un eje que atravesara el cilindro que serviría para rotar el exoesqueleto alrededor del cilindro dió mediante un motor acoplado en uno de los extremos del exoesqueleto.



*Imagen5.54. Diseño final de la excavadora ensamblada (superior); excavadora ensamblada (inferior).*





### V.VII Depósito.

Para poder completar el ciclo de excavación es muy importante poder realizar la tarea de depositar el material dentro del contenedor designado por la competencia, este se encuentra a 50 [cm] sobre la superficie del simulante BP-1. Para esta tarea será necesario elevar los 50 [cm] el material que se encuentra dentro del cilindro de la excavadora.

Para diseñar un mecanismo que pudiera realizar la tarea de elevar el material se compararon diferentes sistemas que se describen a continuación, ya fabricados con anterioridad comercialmente, estos llenaban algunas expectativas pero sin obtener una solución óptima.

Como primer idea se pensó en una banda que pudiera estar debajo de la excavadora o bien que fuera retráctil, con esta se transportaría el material subiendo los 50 [cm] necesarios y luego poder dejarlo caer.



Imagen 5.55. Banda para subir el material.

Para este mecanismo se requerirían grandes dimensiones para poder incorporarla además de un motor grande con la fuerza suficiente para cargar el material. Sin tomar en cuenta que el peso sería significativo. Una de las ventajas de este sistema sería el transporte continuo lo que representa una mejora en el tiempo de demora de la tarea.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Transportación continua</li><li>• Fácil de implementar</li><li>• Un solo actuador</li><li>• Fácil medición de tiempos</li><li>• Es fácil depositar el material</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere de grandes dimensiones</li><li>• Requiere de mucho peso.</li><li>• Media velocidad.</li></ul>

Tabla 5.33. Ventajas vs. Inconvenientes banda.





Un mecanismo de cadenas conectadas a 4 postes por medio de husillos, una de las ventajas de este sistema es la sincronización de los 4 postes además de tener la robustez suficiente para cargar grandes masas, este tipo de sistema tiene tres desventajas principales, la primera y más grande de todas es el peso que representan los componentes de este, como son las cadenas, husillos, postes. La segunda es que este tipo de sistemas son muy lentos en comparación de otros, además de que es difícil su mantenimiento por tener que las cadenas estén sincronizadas ya que en caso contrario podría subir desnivelado o en el peor de los escenarios romperse. Otra desventaja de este sistema es el tener que acoplar otro sistema que empuje o vierta el material una vez que ya subió, lo que implicaría poner otro actuador para el caso. Un punto muy importante a tomar en cuenta son las dimensiones máximas del robot, ya que debido a las medidas para este sistema los postes tendrían que estar una altura mayor a los 50 [cm] del depósito y si nos referimos a las medidas máximas estas no pueden exceder los 75 [cm] lo que es utópico para las medidas reales del robot.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Una sola subida</li><li>• Un solo actuador</li><li>• Fácil medición de tiempos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere de dimensiones excesivas.</li><li>• Requiere de mucho peso.</li><li>• Velocidad baja.</li><li>• Difícil mantenimiento e implementación.</li></ul>

Tabla 5.33. Ventajas vs. Inconvenientes banda.

El sistema de tijeras es un sistema que se identifica por poder ser muy plegable y además de poder levantarse a bastante altura, estos sistemas son usados cuando se tiene una restricción de espacio, el inconveniente de estos tipos de sistemas es su poca capacidad de carga además de que se tienen que sincronizar las dos tijeras para que este no suba a desnivel. Aunque se puede adaptar el sistema para inclinar la última tijera y que este se desnivele para depositar el material.



Imagen 5.56. Sistema de tijeras.





Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Una sola subida</li><li>• Fácil de implementar</li><li>• Un solo actuador</li><li>• Fácil medición de tiempos</li><li>• Es fácil depositar el material</li><li>• Dimensiones retractiles</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere de mucho peso si se quiere cargar mucho material.</li><li>• Velocidad baja.</li></ul>

Tabla 5.34. Ventajas vs inconvenientes de sistema de tijeras.

En conclusión todos los sistemas podría ser implementados de alguna forma sin embargo se tenía que cuidar mucho el peso que ya estaba muy restringido por los sistemas que ya se habían diseñado y manufacturado. Este fue uno de los determinantes más importantes para el diseño del mecanismo de depósito. Se concluyó por jerarquizar los criterios a evaluar y poder tener una forma de comparación cuantitativa.

Criterios de evaluación	Jerarquización
Costo de materiales	2
Costo de manufactura	2
Volumen de trabajo	3
Eficiencia	2
Complejidad del mecanismo	3
Mantenimiento	3
Peso	4

Tabla 5.35. Obtención de los factores de peso para los criterios de evaluación.

Se realizó una matriz para vincular los requerimientos ya especificados (véase apartado III.I.I.III Requerimientos) con los criterios de evaluación y ver más a detalle la relación que guardan unos con otros.





	Frecuencia de Mantenimiento	Facilidad de Mantenimiento	Capacidad	Peso	Tamaño	Costo	Velocidad	Durabilidad
Poco mantenimiento		1	0	0	0	0	0	1
Fácil mantenimiento	1		0	0	0	0	0	1
Amplia Capacidad	0	0		1	1	0	1	0
Ligero	0	0	0		1	1	0	0
No exceder las dimensiones	0	0	1	1		0	0	0
Mediano Costo	0	0	1	1	1		1	0
Velocidad media	0	0	0	1	0	1		0
Durable	1	0	0	1	0	1	0	
	2	1	2	5	3	3	2	2
	0.2	0.1	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2

Tabla 5.36. Matriz de relación entre requerimientos y criterios a evaluar.

Estos resultados nos dan una visión de los parámetros en los se deben enfocar el diseño del mecanismo deseado y con esto en mente se compararan los sistemas comerciales que se describieron anteriormente que son el sistema por tornillos y cadenas, el sistema de tijeras y el sistema de una banda transportadora.





Conceptos				
	Factor de Peso	Cadenas	Banda	Tijeras
\$ Materiales	0.105	7	8	7
\$ Manufactura	0.105	6	7	7
Volumen de trabajo	0.15	7	8	7
Eficiencia	0.10	7	6	7
Complejidad mecanismo	0.15	4	7	6
Mantenimiento	0.15	6	8	8
Peso	0.21	3	5	7
Valor útil total	0.97	5.245	6.667	6.79

Tabla 5.37. Matriz de decisión.

A pesar de que en los resultados se plasmaron las opciones de la banda y el sistema de tijeras como las alternativas más productivas no terminaban por ser la mejor opción para el rover así que se empezó por combinar los husillos que usaban en el sistema de cadenas pero sin las cadenas mismas, usando solo dos husillos en vez de 4 estos unidos entre sí por un eje que iría atravesando la excavadora.

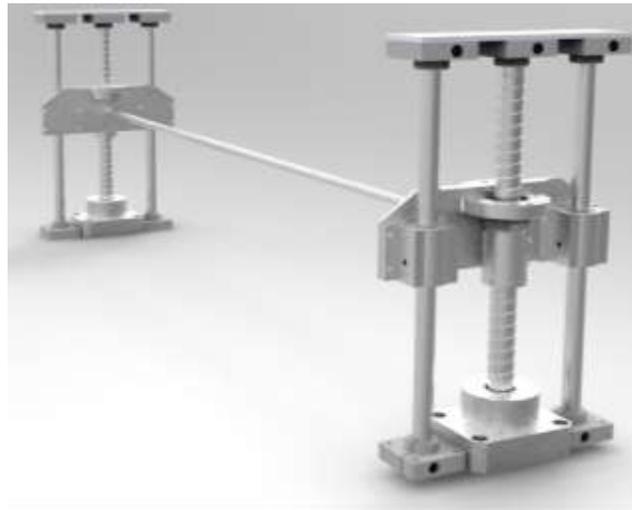


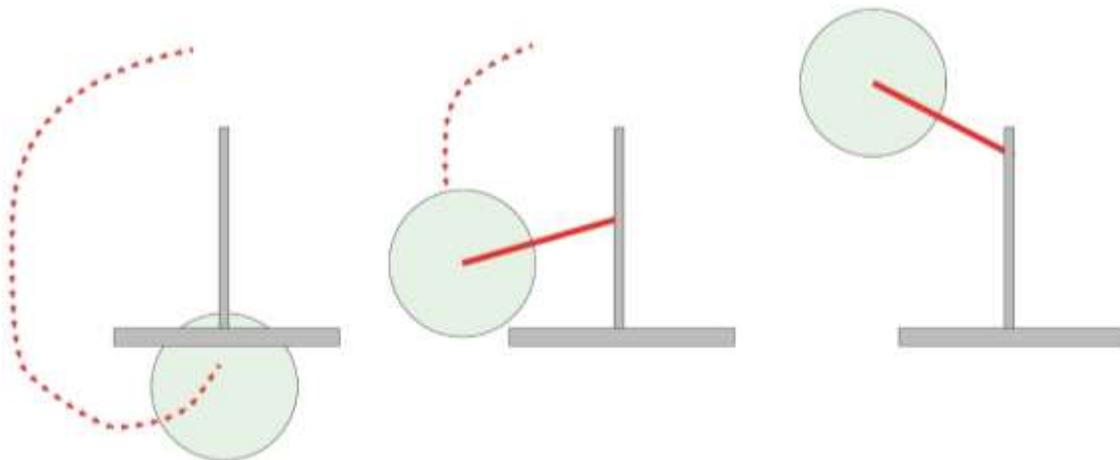
Imagen 5.57. Sistema de husillos.





Este sistema cuenta con dos husillos acoplados entre sí por un eje tangencial, cada husillo incorpora una tuerca en su eje que va girando en torno a este elevándose, cada husillo está apoyado de dos tubos huecos esto con el fin de obtener mayor estabilidad en el sistema, debido a que todo el material empleado a excepción del husillo fue de aluminio por lo tanto se ahorró mucho peso sin embargo con este sistema únicamente se podría subir el cilindro de la excavadora a cierta altura limitada por las dimensiones máximas de las especificaciones de la competencia. Ahora el reto estaba en poder desarrollar un mecanismo que depositara el material y alcanzara la altura necesaria para este objetivo.

Se desarrolló la idea de que la excavadora pudiera voltearse completamente ayudada de dos brazos, con esta día se lograría extenderse hasta lograr la altura deseada además de que la ranura del cilindro interior quedaría hacia abajo lo que ayudaría a que el material simplemente se deslizara, también se tenía que tomar en cuenta para esta idea el hecho de que se requería una fuerza muy grande si se piensa que el cilindro ya estaría lleno, otra de las desventajas es que el centro de masa del robot podría verse afectado de sobremanera al voltear el cilindro ya que este no se voltearía sobre su propio eje o se extendería, tendría que describir una trayectoria circular saliendo incluso de las dimensiones del rover.



*Imagen 5.58. Idea grafica del sistema de depósito.*





Para centrarse en esta idea se integró el problema del depósito ya que pensando en que el cilindro estuviera arriba y volteado el material simplemente se caería sobre el robot y no en el contenedor que se dispuso, para ello se tenía que extender el área en donde caería el material, para solucionar este problema se pensó en un concepto básico y simple, la integración de una rampa que fuera desde la ranura del cilindro fijo hasta el contenedor de depósito. Esta idea tenía algunas cuestiones que la limitaban, como por ejemplo donde estaría esta rampa cuando no está depositando, si fuera fija le estorbaría a la función de excavación además de tendría que ser lo bastante amplia y larga para alcanzar el depósito. Para solucionar estos problemas se diseñó una rampa que fungiera como tolva es decir que cuando estuviera excavando esta quedaría en la parte de arriba del robot protegiéndolo del polvo y estaría fija a los mismos brazos de los que se fijaría el cilindro así bien cuando el cilindro se elevara y se volteara la rampa se voltearía también quedando por debajo y fungiendo su función esencial de guiar el material simulante BP-1 a su destino.

Integrando estas dos ideas fue como en esencia se solucionaron 3 de los problemas que nos faltaban resolver para completar todo un ciclo básico del rover. Poder elevar y bajar el cilindro con el fin de poder excavar a diferentes profundidades. Poder llegar a la altura necesaria para vaciar el cilindro fijo y que este material llegara al contenedor de depósito puesto a 50 [cm] de altura sobre la superficie del simulante BP-1. Además de realizar estas dos tareas se tendría una tolva que pudiese disminuir la generación de polvo al estar en la función de excavado.

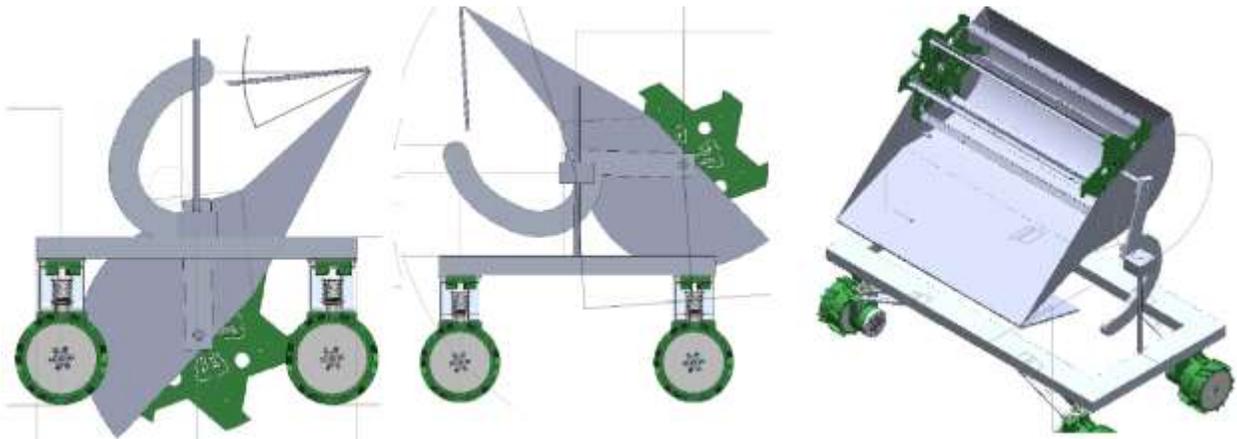


Imagen 5.59. Sistema de Elevación y Depósito.

Se realizó un primer análisis y experimentación con los brazos de este diseño per se dio cuenta que debido a la velocidad de subida así como a la trayectoria que este tipo de brazos describiría tendríamos serios problemas





de atascamiento en la curva del brazo, por ello se analizó más a fondo la forma en que los brazos pudieran hacer que se volteara el mecanismo. Del mecanismo que más se tomó en cuenta fue un sistema de engranes helicoidales que pudiera ir cambiando la trayectoria del brazo a la vez que este se elevaba sin embargo se encontró que los engranes cargarían todo el peso del cilindro más la fuerza ejercida por la inercia y podrían llegar a romperse.

Por otro lado se empezó a analizar la función de poner solo un tope en la parte de en medio para que el cilindro pudiera subir recto y ejercer bien la función de excavado a diferentes profundidades hasta cierta altura y luego este por la oposición del tope y si se realizaba un buen diseño del brazo, el brazo se deslizaría sobre el tope cambiando su trayectoria y logrando el objetivo de voltear el cilindro. Para realizar los brazos se tenía que tomar en cuenta el sentido del giro, la fuerza de oposición, y la fuerza que se ejercería en el punto de apoyo sobre el tope para que no se tronara el brazo.



*Imagen 5.60. Concepto del tope.*

Por cuestiones de tiempo y manufacturación el tope se realizó con perfil modular de aluminio item MB® esto permitió ensamblar un tope al chasis robusto, estable y a su vez muy ligero además de que se ahorró mucho tiempo. Otra importante ventaja de usar perfil modular fue que el tope se podría ajustar a diferentes alturas y así sería más fácil su calibración. En el tope se colocó un rodamiento para no generar tanta fricción cuando el brazo entrara en contacto con este.

Para los brazos a diferencia del primer diseño que describiría una trayectoria muy brusca se diseñaron dos brazos casi rectos con un cierto grado de inclinación el medio suficiente para que describieran la





trayectoria exacta que se requería además de ser reforzados en la parte donde recibirían más fuerza por parte del tope. Los brazos fueron maquinados en maquina CNC con material de Aluminio.



*Imagen 5.61. Brazos maquinados.*

Para la rampa/tolva debido a las grandes dimensiones que requería se hizo en fibra de vidrio para bajar su peso considerablemente se diseñó de tal forma que cuando el cilindro estuviera hasta la parte máxima de la altura, la rampa pudiera quedar a un ángulo de 30 grados que según los experimentos realizados [véase Capítulo IV. Etapa Creativa.] Era el ángulo crítico para que el material simulante BP-1 pudiera deslizarse por completo. Además se le dio un acabado interior fino sin rugosidades que pudieran tener mucha fricción con el simulante. Las dimensiones finales necesarias para que la rampa pudiera depositar el material fuera del rover por obvias razones se salía de las dimensiones que se tenían por lo que se decidió añadirle una extensión de aluminio que estuviera contraída por medio de bisagras hasta que el material se deslizara por la rampa y esta se extendiera llegando a las dimensiones deseadas.



*Imagen 5.62. Robot ensamblado, mostrando el sistema de levantamiento*





## V.VIII Energía.

Para poder controlar los motores tanto de la excavadora, depósito como los cuatro motores del sistema de tracción se diseñó un driver dentro de una etapa de potencia para poder mover dos motores con cada circuito considerando que cada motor requeriría alrededor de 10 [A] y 24 [V].

Se diseñaron dos puentes H usando 4 mosfets IRF1405 y 2 IR2112 IC, cada mosfet maneja la mitad de un puente H. Teniendo como resultado una etapa de potencia que pueden teoría tener una carga máxima de 70 [A] para cada motor con un voltaje de 24 [V] que es lo necesario para emplear en cada motor.

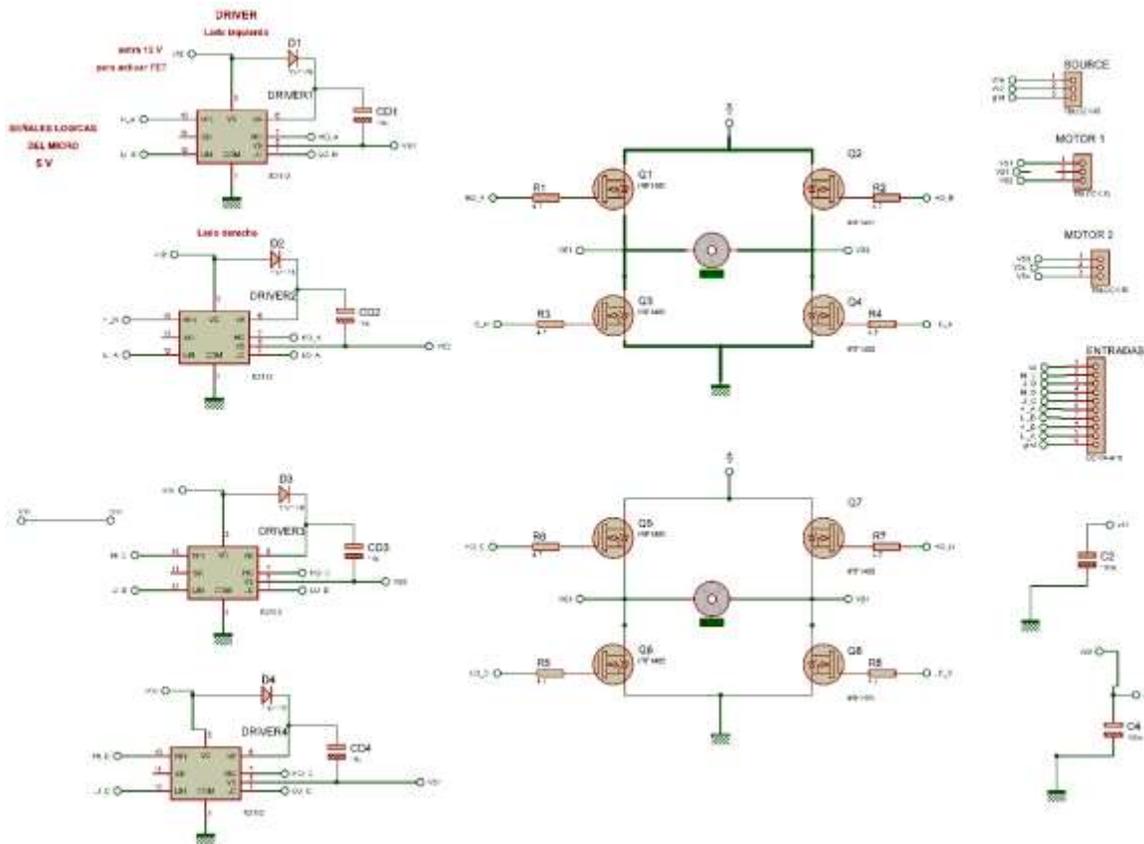


Imagen 5.63. Diagrama eléctrico del circuito de potencia.





## V.VIX Control.

Este Sistema fue diseñado para ser el responsable de la lógica y el control de los actuadores de todo el rover. Consiste en un microcontrolador maestro Microchip PIC® que se conecta a una computadora portátil por USB 2.0 nativo, este microcontrolador maestro está conectado a su vez a otros tres microcontroladores esclavos que se encargan de las tareas específicas como son los motores de la tracción y los actuadores de la excavación y deposito. Todos los microcontroladores se comunican entre por medio del protocolo I2C. En el diagrama X se muestra la distribución del sistema y sus interconexiones.

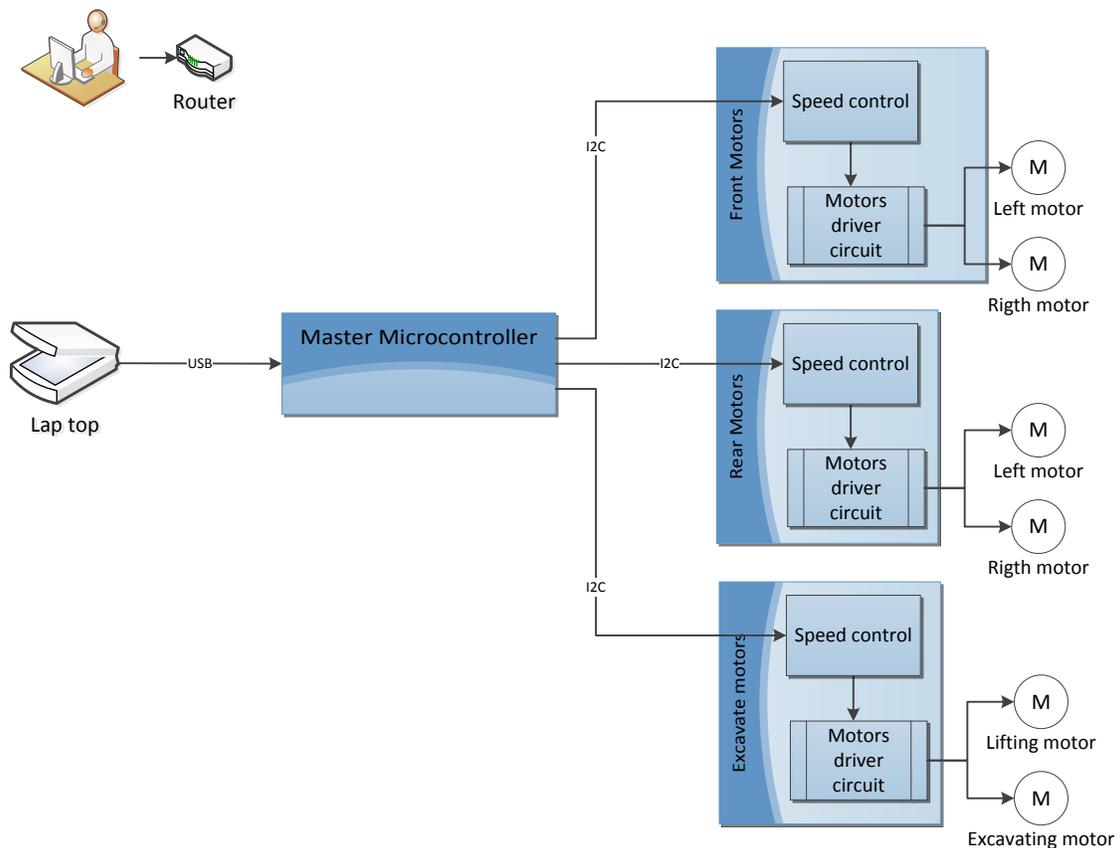


Imagen 5.64. Diagrama del sistema de control.

Para el control de velocidad se usó un microcontrolador Microchip PIC® PIC16F1939, se usaron 4 pines para generar diferentes señales por pulsos de ancho modulados (PWM por sus siglas en inglés) para poder activar los drivers mosfets y poder controlar la velocidad de cada motor independientemente. La comunicación también se usó I2C.

El microcontrolador maestro recibe las instrucciones desde la computadora portátil y envía los diferentes comandos a cada microcontrolador esclavo





por medio del protocolo de comunicación I2C. Se usó un microcontrolador Microchip PIC® 18F4550 por que tiene integrado la comunicación por el modulo USB lo que facilitaría el intercambio de datos con la computadora. Además de su velocidad máxima que puede usar para el modulo USB 2.0.

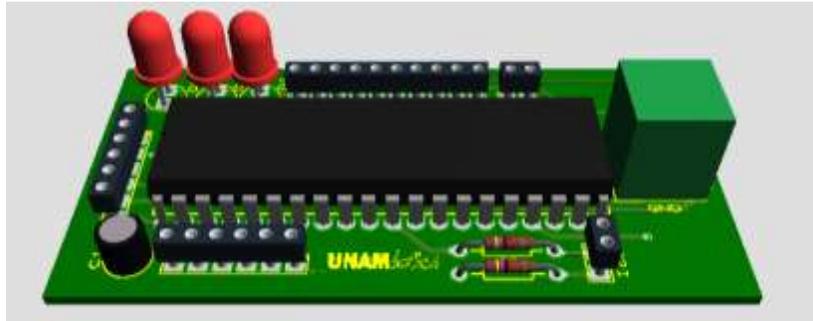


Imagen 5.65. Imagen 3D de la tarjeta del microcontrolador maestro.

La comunicación se realizó con la arquitectura del tipo cliente/servidor. En la aplicación del cliente se empieza el proceso del control remoto (manual o autónomo) que está controlado por medio de una red local wifi que está a 15 [m] del rover. La parte del servidor es la aplicación que contiene el rover dentro de la computadora portátil. Esta aplicación espera los comandos que provienen desde el centro de control (la aplicación del cliente), procesa los datos que vienen de los sensores del rover, realiza un procesamiento de ruta y envía estos datos procesados de nuevo al cliente para que se pueda monitorizar.

El control está dado por dos formas manualmente controlado remotamente y autónomo. El control manual consiste en enviar los comandos necesarios al rover desde el centro de control (la aplicación del cliente) para que el rover ejecute determinadas tareas o acciones por separado. Las decisiones para el control remoto se basan en la cámara fija que se instala en la arena para poder monitorizar los movimientos del robot.

El control autónomo consiste en un algoritmo reactivo de inteligencia artificial diseñado específicamente para el rover que es una variante del algoritmo de Puntos de frontera sucesivos. Este algoritmo realiza la generación de todas las posibles rutas que el rover podría tomar para trasladarse del punto inicial en la arena hasta la zona de excavación pasando por la zona de obstáculos y lo hace definiendo la ruta más óptima basado en un criterio especificado, este criterio fue dado por la posición instantánea en que estuviera el rover en la arena, numero de movimientos necesarios para lograrlo y el esfuerzo necesario para poder esquivar los diferentes obstáculos.

Para poder obtener la posición relativa del rover en la arena y las posibles rutas que el rover pudiera tomar se obtenían por medio de un sensor laser telemétrico Hokuyo®, que puede encontrar cualquier distancia menor a 3 metros en un rango de 245°.





Se usó también una cámara web para reconocimiento de formas y colores que servía para detectar ambos obstáculos tanto rocas como cráteres y un objetivo de referencia pegado en la zona de excavación el cual serviría para guiar al rover a su objetivo y ayudar al algoritmo a buscar la mejor ruta. Se programó un software que pudiera identificar diferentes objetivos por forma y color así le proporcionaba al algoritmo datos de posición de los obstáculos presentes y se usó el objetivo de referencia para cuando el rover se dirigía desde la zona de excavación al depósito para poder depositar el material simulante BP-1 y que no se perdiera en el trayecto.

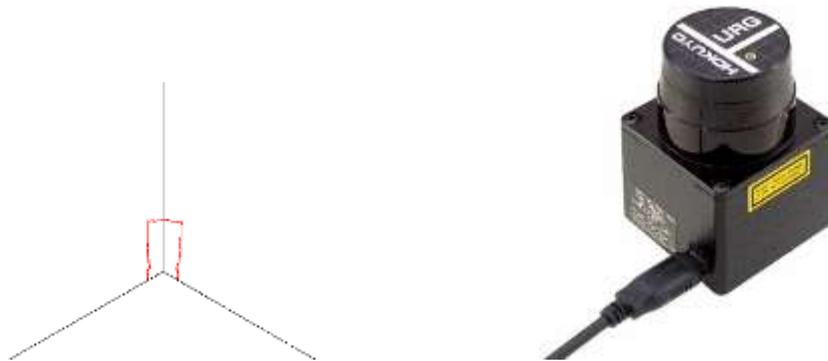


Imagen 5.66. Sensor Hokuyo y grafica de los datos que arroja.

La combinación del sensor y la cámara web hicieron una combinación efectiva para detectar los obstáculos a tiempo y poder tomar la mejor decisión para evitarlos, la cámara web filtra la imagen que toma abstrayendo el color y dejando únicamente la forma y la figura deseada, el sensor podría detectar la figura del obstáculo y a que distancia estaba, para esto se colocó con una inclinación de  $17^\circ$  respecto a la horizontal del rover para detectar los obstáculos oportunamente.



Imagen 5.67. Detección de patrones y filtrado de la cámara web.





## Capítulo VI.

### Diseño final y resultados del producto.





Imagen 6.1. Imagen del diseño final en CAD SolidWorks.

## VI.1. Diseño final del robot.

El diseño final, como se muestra en la imagen 6.1 presenta características únicas y muy diferentes a los dispositivos de excavación actuales. Sin embargo y considerando que el campo de la ingeniería espacial específicamente en robótica espacial en México es un área completamente virgen y con mínimo desarrollo, se logró presentar un producto completo y funcional completamente nuevo e innovador (según los ingenieros de la NASA y jurados del evento).

El diseño y la manufactura se realizaron al 100% en México, se manufacturó en el centro industrial de Querétaro, México; gracias al apoyo de la empresa FHO y Maquiespel. Estas empresas apoyaron máquinas de control numérico, que nos permitieron la correcta manufactura de los elementos que conformarían al prototipo del diseño.

Por lo que el prototipo final (imagen 6.2), que representó a la UNAM en la competencia Lunabotics Mining Competition cuenta con varias características que se enlistan en la tabla 6.1 que se muestra a continuación.





Imagen 6.2. Imagen del prototipo del diseño final, en su presentación oficial en la FI UNAM.

<p>Sistema de tracción y chasis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El chasis pesa solo 2.5 kg y el sistema completo resiste una carga estática hasta 300 kg.</li> <li>• Es capaz de transportar hasta 200 kg.</li> <li>• Suspensión y tracción independiente en cada llanta.</li> <li>• Motores y alambrado completamente aislados y con protección al polvo.</li> </ul>	
<p>Sistema de excavación y almacenamiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 80 kg de almacenamiento con excavación continua.</li> <li>• Diseño de cangilones específicos para simulante de material lunar.</li> </ul>	

Tabla 6.1. Resumen del diseño final.





El desarrollo del prototipo final “Cougar” se concluyó con éxito dentro de los requisitos técnicos de la competición, que requiere una plena integración de las diferentes áreas de la ingeniería, minería, mecánica, sistemas, electrónica y telecomunicaciones. Así como la ejecución de varios procesos de fabricación en diferentes materiales: plásticos, madera, metales y materiales compuestos.

#### Nuestras ventajas de diseño

- Completamente el sistema de excavación, el de almacenamiento y vaciado están integrados en un solo sistema.
- Relativamente pocas partes móviles.
- El centro de gravedad y la masa es adaptable, ofrece una gran estabilidad, ya que podría ser modificado en función de la topografía del terreno.
- El chasis permite una distribución uniforme de la carga.
- El sistema de vertido del material es sencillo, solo necesita de gravedad.
- Sistema de visión con láser es menos afectado por el polvo, y proporciona una medición precisa de la distancia y tiempos de respuesta más cortos.
- El Lunabot puede cargar más que su propio peso.

En general se presenta un diseño realizado 100% en la UNAM, que presenta muchas innovaciones o ideas alternas a la mayoría de los pocos robots diseñados para realizar minería en el satélite natural terrestre.





## VI.II. Prueba final de los sistemas

Antes de llevar el prototipo al Centro Espacial Kennedy en Florida, Estados Unidos. Se realizaron pruebas a los sistemas completos, esto con el objetivo de estar seguros del funcionamiento de los mismos, para hacer dichas pruebas era necesario recrear el lugar de donde sería la próxima competencia. Como se mencionó con anterioridad, las condiciones donde se realizan las pruebas a los prototipos de la competencia Lunabotics Mining Competition, es en la denominada "Lunarena", esta área es un espacio completamente sellado que contiene simulante de suelo lunar BP-1 con cráteres y rocas para aumentar el realismo de la simulación dentro de un área determinada.

Dado que el volumen de material necesario para probar todo los sistemas a la escala final 1:1, supera los 10 kg de simulante lunar de suelo lunar JSC-1A de la empresa Orbitec, que nos la patrocina la empresa constructora DICA, por ello decidimos analizar las propiedades del simulante lunar, que es muy similar al BP-1 (Simulante de uso en la competencia) y estudiar su origen. Debido a la agresiva formación de la Luna, y los constantes impactos de meteoritos, el regolito lunar es muy similar a materiales volcánicos en la Tierra, de hecho el término BP-1 surge de "Black Point 1" que es un lugar en California, Estados Unidos, que presenta actividad volcánica.



Imagen 6.3. Extracción de ceniza volcánica del Popocatepetl y su posterior tratamiento.

Con esta información y con las tablas geológicas proporcionadas por la NASA, se realizó una extracción de ceniza del volcán Popocatepetl, aproximadamente del área, se recolecto una tonelada, con palas y costales. Este material posteriormente con apoyo del departamento de minas y metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se le dio un tratamiento de tamizado, para alcanzar una granulometría muy similar a la que se presenta en el BP-1.





Con el material recolectado y tratado, se realizó una Lunarena a dimensiones reales, como se puede observar en la imagen 6.4, donde se consiguieron realizar pruebas de la mayoría de los sistemas. Debido a que las partículas que componen el material son muy pequeñas y al respirarlas pueden provocar una enfermedad del sistema respiratorio llamada silicosis, se tomaron todas las medidas de seguridad necesarias para asegurar la integridad de los que estuvieran en contacto con el material.



Imagen 6.4. Lunarena realizada (Izq.) y pruebas de tracción en el simulante (Der.).

Estas pruebas constituyeron una validación de las ideas y del diseño ya que aunque presentaban aún algunos pequeños detalles, el funcionamiento y el desempeño de la función crítica era correcta. Gracias a estas pruebas se pudieron ajustar ciertos detalles antes de la competencia, como la velocidad del motor de excavación, la posición del sistema de vertido inicial y final, las pruebas de visión con la cámara web y la cámara laser Hokuyo y su comportamiento y reacciones con el excesivo polvo, además de ajustar los algoritmos de navegación y control del robot para tener lista la parte de autonomía en la competencia.

Desgraciadamente, por falta de tiempo, no se realizaron pruebas al sistema de vertido ni a la autonomía completa del robot, lo que aunado a problemas con el envío dificultarían más adelante la participación y el desempeño del robot en la competencia.





## VI.III. Resultados.

Debido a las características del presente trabajo, no es posible incluir un apartado de resultados como tal, ni obtener resultados cuantitativos de la aplicación de la metodología para el diseño que se propone en el mismo; lo que sí es posible considerar como resultado es lo siguiente:

Partiendo del objetivo, el cual fue establecido como el seguimiento de la metodología propuesta, se espera obtener como resultado un planteamiento que ejemplifique el seguimiento de las etapas de diseño propuestas en la presente tesis, hasta la etapa de diseño conceptual que se estableció también como el alcance de este trabajo. De esta forma, si hablamos de los recursos obtenidos, es posible calificar a todo el trabajo en general como principal resultado, puesto que para llegar al planteamiento del seguimiento de la metodología fue necesario en primer lugar ubicar la información generada en las asignaturas de diseño de la facultad de ingeniería.

Con lo que respecta al prototipo y a la competencia, el robot minero "Cougar", diseñado y construido por jóvenes ingenieros de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, participó en la cuarta edición de la competencia anual Lunabotics Mining Competition, convocada por la agencia Estadounidense del Espacio y la Aeronáutica (NASA, por sus siglas en inglés).

La competencia se llevó a cabo del pasado 20 al 25 de mayo del 2013 en el complejo de visitantes del Centro Espacial Kennedy, en Florida, Estados Unidos, donde el prototipo se dio cita junto con otros 49 prototipos de igual número de universidades de Bangladesh, Australia, Canadá, Colombia, India, Polonia y la Unión Americana.

Cougar acreditó satisfactoriamente las inspecciones periódicas de peso, dimensiones y comunicación inalámbrica requeridas para acceder a las pruebas de excavación en el terreno que simula la superficie del satélite. El diseño innovador del robot, su gran tamaño comparado con el de otros participantes y el diseño de un control autónomo (que sólo 5 equipos participantes intentaron), generaron gran expectación por parte de los jueces, que siguieron de cerca al equipo y calificaron al diseño y desempeño de Cougar como "de lo mejor de la competencia".

En la primera, de las dos rondas de excavación, el robot tuvo un gran desempeño, logró evadir la zona de obstáculos y llenar su depósito casi totalmente, sin embargo, por cuestiones no previstas, en la etapa de final del ciclo, el material recolectado fue depositado a tres centímetros fuera del área establecida por la competencia y por lo tanto, no fue posible cuantificarlo.





En la segunda prueba se vivieron auténticos minutos de angustia, pues a pesar del esfuerzo, el equipo no logró establecer la comunicación remota con Cougar, que permaneció inmóvil los 10 minutos de la prueba. A pesar de ese percance, la determinación y trabajo lograron demostrar ante los jueces que el problema de comunicación fue ocasionado por la infraestructura que la NASA preparó para la competencia, por lo que se les otorgó la oportunidad de una tercera participación, algo que jamás había sucedido en la historia de la competencia, según miembros del jurado.

Después de un gran desempeño en la etapa de excavación y hacia el final de su tercera participación, Cougar sufrió una volcadura a causa del nerviosismo del operador que decidió cambiar del modo autónomo a manual, lo que le impidió completar el ciclo de depósito. En la revisión posterior se determinó que, pese a la pérdida de material provocada por la volcadura, el robot logró recolectar 11.8 kilogramos del simulante lunar BP-1, suficientes para considerarlo dentro de los primeros lugares del ranking.

Aunque no logró acceder a las primeras posiciones de la tabla, Cougar logró funcionamiento semiautónomo, que junto con el innovador método de excavación y el sistema de protección contra polvo fueron reconocidos por los jueces en la ceremonia de premiación.

En palabras enviadas por el afamado ingeniero de la NASA y por el cual, el máximo premio de la competencia recibe su nombre: Joe Kosmo "Your wide wheelbase to drive right over craters and rocks is the best we have seen yet! They were able to manage the (heart breaking) regolith dump in front of the bin very well. Excelent work!"

Además de ocupar el segundo lugar en la categoría de diseño innovador de la competencia.



Imagen 6.5. Equipo LUNAMbotics en el Centro Espacial Kennedy durante la competencia.





## VI.IV. Recomendaciones de futuras implementaciones.

Las recomendaciones que se postulan, con base en las experiencias generadas en el desarrollo de este proyecto, son de varias plataformas profesionales, que para efectos prácticos se estructuraran de la siguiente manera:

- Aspectos técnicos.
- Aspectos administrativos.
- Aspectos sociales.

Cada uno de estas, enlistara las áreas potenciales de crecimiento y algunas que resultaron ineficientes durante el desarrollo de este proyecto, esto con la finalidad que equipos posteriores de trabajo puedan recapitular las mismas y tomar a bien dichas recomendaciones de implementación.

### Aspectos técnicos.

Los denominados aspectos técnicos son aquellos que se involucran directamente con el producto y sus características, además del proceso de diseño empleado.

- Altos niveles de calidad en la ingeniería de detalle. Esto implica que la calidad en los planos, las tolerancias y las especificaciones de manufactura sean con base en normas del tipo ANSI o ISO (estandarice aspectos de planos y técnicos como tolerancias, roscas y soldaduras), que además se especifiquen, antes de la manufactura, algunas normas de materiales (propiedad, composición, lubricantes, combustibles, etc.), además se involucre la estandarización de piezas y mecanismos (dimensiones, funcionamiento, tolerancias máximas de manufactura, máquinas y herramientas, etc.).
- Simulación dinámica y de operación con plataformas computacionales. La simulación dinámica por medio de una herramienta de computo es un elemento que debiera incluirse como proceso obligado de diseño, esta herramienta auxilia en etapas anteriores a la de ingeniería a detalle y sirve como plataforma de mejora para el diseño en general, ayudando al ingeniero a entender de mejor manera el funcionamiento y los potenciales campos de mejora.
- Benchmarking de piezas y materiales estándar en el mercado. Uno de los factores cruciales para llevar a un proyecto al éxito es la correcta selección de piezas y materiales. Como principio debe





tenerse que la eficiencia será directamente proporcional al número de piezas estándar en el mercado que se pueden emplear en el diseño. Una de las cuestiones resaltables en este proyecto fue que las piezas como rodamientos, chumaceras, bandas, etc. Se requerían ajustar al diseño, lo que resultó en un costo mucho más elevado, que si se hubiesen realizado pequeños ajustes al diseño, para el empleo de piezas estándar, fáciles de conseguir y mucho más económicas.

- Optimización de manufactura. La herramienta CAM (Computer Aided Manufacturing – Manufactura Asistida por Computadora) es altamente recomendable emplearla para la estimación de tiempos y eficiencia, además para la consideración del tipo de herramienta a emplear y consideraciones adicionales, que en primera instancia, sin el empleo de esta herramienta resultan difíciles de detectar.
- Pruebas del producto. Sin duda alguna, las pruebas de los prototipos previos y la del producto final resultan vitales para el éxito del proyecto. Por lo que pruebas de sistemas independientes y en conjunto son recomendables que se realicen amplia y meticulosamente. La inclusión de protocolos de operación para los que fue creado el producto y condiciones similares a las que se enfrentara en operación, también resultan importantes.

### **Aspectos administrativos.**

Los aspectos administrativos es un punto medular para el éxito del proyecto, de hecho es uno de los campos que a través de la experiencia y la observación hemos notado que es una de las mayores áreas de oportunidad y crecimiento para los ingenieros.

- Establecimiento de objetivo. El establecimiento de un objetivo general y que todos los elementos del equipo lo entiendan y estén convencidos de este, hace la diferencia y pone en sincronía al motor humano del proyecto.
- Planeación. La planeación del proyecto es recomendable que se constituya como el pilar del proyecto, que se establezcan tiempos, objetivos, recursos, actividades y responsabilidades por persona y por área funcional, estos deberían de ser claros, concretos y que todo el equipo humano este consiente y este de acuerdo con los mismos. También es muy recomendable que se generen rutas críticas y planes emergentes. Pero la recomendación más importante es que esta planeación se respete y se exija el cumplimiento de la misma de cada elemento humano del proyecto.
- Delegación de responsabilidades. La delegación de responsabilidades a los elementos humanos y áreas funcionales es vital, es recomendable que esta delegación no solo se haga





mediante medios verbales, sino por medios escritos y que se firme de enterado y de aceptación para esas responsabilidades.

- Buen manejo de los recursos. El manejo de los recursos se recomienda que se haga mediante una plataforma transparente y que toda la solicitud de los recursos y entrega de los mismos se haga de manera escrita y con visto bueno de los asesores académicos.
- Comunicación. La recomendación para la comunicación es el establecimiento de canales formales, debe de evitarse el uso de medios informales como las redes sociales para temas importantes del proyecto, la generación de reuniones y la asistencia de los elementos humanos resulta vital para la homologación del conocimiento y la visión del estatus y avance. A la vez deben de establecerse medios de retroalimentación con los asesores académicos.

### Aspectos sociales.

Esta área es fundamental para una conclusión y desarrollo armonioso del proyecto, al igual que el campo de los aspectos administrativos, en particular para los ingenieros es un campo de potencial crecimiento.

- Trabajo en equipo. El trabajo en equipo es el motor para que un proyecto se desarrolle exitosamente, las recomendaciones para un futuro desarrollo de este tipo es que la influencia de este tipo de trabajo sea psicológicamente positivo y alentado. Para es recomendable la elaboración de reglas, que se deben respetar por todos los miembros del grupo. Son reglas de comportamiento establecidas por los miembros del equipo. Estas reglas proporcionan a cada individuo una base para predecir el comportamiento de los demás y preparar una respuesta apropiada. Incluyen los procedimientos empleados para interactuar con los demás. La función de las normas en un grupo es regular su situación como unidad organizada, así como las funciones de los miembros individuales.
- Valores. El establecimiento de los valores del equipo, así como la difusión de los mismos, el seguimiento y la puesta en práctica en cada actividad es muy recomendable, no solo para un crecimiento integral de los integrantes, sino para un desarrollo integral del proyecto. Alguno de los valores que se proponen incluir son Respeto, Responsabilidad, Disciplina, Honestidad, etc.
- Relaciones profesionales. Las relaciones dentro del equipo y dentro del tiempo “laboral”, deberán realizarse de manera profesional, es decir, con respeto, transparencia y profesionalismo, siempre tomando como base los valores del equipo. Esto con objeto de preparar a los





elementos humanos del equipo para el ambiente laboral afuera de la universidad y para crear ingenieros integrales y profesionales.

- Misión y Visión. La redacción y el conocimiento de la misión y visión por parte de los elementos humanos del proyecto es una excelente herramienta para que se tenga un desarrollo en conjunto y se posea una visión clara del camino a seguir de todos los miembros del equipo.





## Bibliografía

### Referencias.

- Astrobotic Inc. (2011), <http://astrobotic.net/> (access March 17, 2013)
- Balasubramaniam, R., Gokoglu, S., Sacksteder, K., Wegeng, R., Suzuki, N.: Analysis of Solar-Heated Thermal Wadis to Support Extended-Duration Lunar Exploration. *J. Thermophysics and Heat Transfer* 25(1), 130–139 (2011)
- Bar-Cohen, Y., Zacny, K. (eds.): *Drilling in Extreme Environments Penetration and Sampling on Earth and Other Planets*. Wiley, New York (2009)
- Bernold, L.: Motion and Path Control for Robotic Excavation. *Journal of Aerospace Engineering* 6(1), 1–18 (1993)
- Bernold, L.: Compaction of Lunar-Type Soil. *Journal of Aerospace Engineering* 7(2), 175–187 (1994)
- Bishop, Robert H., *Mechatronics an introduction*, USA, Taylor & Francis, 2006
- Blair, B., Zacharias, M.: The Value of Fuel Transfer to a Space Network. Presented at the NASA/USAF Advanced Space Propulsion Workshop (ASPW 2010), Colorado Springs, CO, November 15-17 (2010)
- Bucek, M., Agui, J., Zeng, X., Wilkinson, R.A.: Experimental Measurements of Excavation Forces in Lunar Soil Test Beds. In: ASCE Conf. Proc. doi:10.1061/40988(323)5, Proc. of the 11th Int. Conf. on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments (2008)
- Chandler, F., Bienhoff, D., Cronick, J., Grayson, G.: Propellant Depots for Earth Orbit and Lunar Exploration. In: AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, Long Beach, California, AIAA 2007-6081, September 18-20 (2007), [http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMSPACE07\\_1808/PV2007\\_6081.pdf](http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMSPACE07_1808/PV2007_6081.pdf)
- Colaprete, A., Schultz, P., Heldmann, J., Wooden, D., Shirley, M., Ennico, K., Hermalyn, B., Marshall, W., Ricco, A., Elphic, R.C., Goldstein, D., Summy, D., Bart, G.D., Asphaug, E., Korycansky, D., Landis, D., Sollitt, L.: Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume. *Science* 330(6003), 463–468 (2010)
- Carter, G.A., McCain, D.C.: Relationship of leaf spectral reflectance to chloroplast water content determined using NMR microscopy. *Remote Sensing of Environment* 46(3), 305–310 (1993)





- Chaikin, A.: The Other Moon Landings. Air & Space Magazine, 30–37 (February/March 2004)
- Chang, K.: After 17 Years, a Glimpse of a Lunar Purchase. New York Times (2010), <http://www.nytimes.com/2010/03/31/science/space/31moon.html?ref=science> (retrieved March 1, 2011)
- Duarte, C., 2013, “Ingeniería Aeroespacial”, Conferencia, Ciudad de México
- Gaier, J.: The Effects of Lunar Dust on EVA Systems During Apollo Missions. NASA TM- 2005-213610/REV1 (2005)
- Gibson, M., Knudsen, C.: Lunar Oxygen Production from Ilmenite. In: Mendell, W.W. (ed.) Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, Lunar and Planetary Institute, Houston, p. 543 (1985)
- Harris, H.A., Introduction to Robotics, Department of Mechanical Engineering, MIT (2009).
- Heiken, G., Vaniman, D., French, B. (eds.): Lunar Sourcebook: A User’s Guide to the Moon. Cambridge University Press (1991)
- Herman, J., Sadick, S., Maksymuk, M., Chu, P., Carlson, L.: Dust-Tolerant Mechanism Design for Lunar & NEO Surface Systems. Paper #1401, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 5-12 (2011)
- Johnson, N.L.: Handbook of soviet lunar and planetary exploration. Science and technology series, vol. 47. Amer. Astronaut Soc. Publishing (1979)
- Jones, H.L., Thornton, J.P., Balasubramaniam, R., Gokoglu, S., Sacksteder, K., Whittaker, W.L.: Enabling Long-Duration Lunar Equatorial Operations with Thermal Wadi Infrastructure. In: 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting (January 2011)
- Lin, C., Goodings, D., Bernold, L., Dick, R., Fourny, W.: Model Studies of Effects on Lunar Soil of Chemical Explosions. Journal of Geotechnical Engineering 120(10), 1684–1703 (1994)
- Lunabotics Mining Competition, NASA Kennedy Space Center (2011), <http://www.nasa.gov/offices/education/centers/kennedy/technology/lunabotics.html>
- Mueller, R.P., van Susante, P.A.: Review of Lunar Regolith Excavation Robotic Device Prototypes. In: AIAA Space 2011, Long Beach, CA, September 26-29 (2011)
- NASA Data Center (accedido 22/12/2013), <http://www.nasa.gov/>
- Okon, A. (2010) Mars Science Laboratory Drill. In: Proc. 40th Aerospace Mechanism Symposium, NASA KSC, May 12-14 (2010)





- Olvera-Cervantes, J., Cressler, J., Medina-Monroy, J.-L., Thirivikraman, T., Banerjee, B., Laskar, J.: A New Analytical Method for Robust Extraction of the Small-Signal Equivalent Circuit for SiGe HBTs Operating at Cryogenic Temperatures. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 56, 568–574 (2008)
- Oravec, H.: Understanding Mechanical Behavior of Lunar Soils for the Study of Vehicle Mobility. PhD Thesis, Case Western Reserve University, Civil Eng. (2009), <http://etd.ohiolink.edu/>
- Paige, D.A., Siegler, M.A., Zhang, J.A., Hayne, P.O., Foote, E.J., Bennett, K.A., Vasavada, A.R., Greenhagen, B.T., Schofield, J.T., McCleese, D.J., Foote, M.C., De Jong, E.M., Bills, B.G., Hartford, W., Murray, B.C., Allen, C.C., Snook, K.J., Soderblom, L.A., Calcutt, S., Taylor, F.W., Bowles, N.E., Bandfield, J.L., Elphic, R.C., Ghent, R.R., Glotch, T.D., Wyatt, M.B., Lucey, P.G.: Diviner Lunar Radiometer Observations of Cold Traps in the Moon's South Polar Region. *Science* 330, 479–482 (2010)
- Paulsen, G., Zacny, K., McKay, C., Glass, B., Szczesiak, M., Craft, J., Santoro, C., Shasho, J., Davila, A., Marinova, M., Pollard, W., Jackson, A.: Field Testing of the IceBreaker Mars Drill in the Antarctic. In: *LPSC 2011, Abstract #190* (2011)
- Peñuelas R. Ulises M., *Metodología para el diseño mecatrónica*, FI. UNAM, 2007
- Reyes, F.: *Control de robots manipuladores*, Alfaomega, 2011
- Peter Eckart (2006). *La Base Lunar*, 2nd edition. McGraw-Hill
- Joseph A. Angelo Jr. *Space Technology*, Greenwood.
- Wendell Mendell (1986). *Lunar bases and space activities of the 21st century*. Lunar and Planetary Institute.
- Roozenburg, N.F.M. and Eekels J. *Product Design: Fundamentals and Methods*. USA, John Wiley & Sons, 1996.
- Sacksteder, K.R., Wegeng, R.S., Suzuki, N.H.: Lunar Prospecting Using Thermal Wadis and Compact Rovers Part A: Infrastructure for Surviving the Lunar Night. In: *AIAA Space 2010 Conference* (August 2010)
- Shabo, B., Barnes, F., Sture, S., Ko, H.: Effectiveness of vibrating bulldozer and plow blades on draft force reduction. *Trans. of the ASAE* 41(2), 283–290 (1998)
- Sullivan, T., Koenig, E., Knudsen, C., Gibson, M.: Pneumatic conveying of materials at partial gravity. *J. of Aerospace Engineering* 7(2), 199 (1994)





Thornton, J., Whittaker, W., Jones, H., Mackin, M., Barsa, R., Gump, D.: Thermal Strategies for Long Duration Mobile Lunar Surface Missions. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting (January 2010)

Ulrich Karl & Eppinger Steven, Diseño y desarrollo de productos, McGraw-Hill, 2009

van Susante, P., Dreyer, C.: Lunar and Planetary Excavation Prototype Development and Testing at the Colorado School of Mines. In: ASCE Earth and Space 2010, Honolulu, HI, March 5-8 (2010)

Wagner, S.: The Apollo Experience Lessons Learned for Constellation Lunar Dust Management. NASA TP-2006-213726 (2006)

Wegeng, R.S., Mankins, J.C., Taylor, L.A., Sanders, G.B.: Thermal Energy Reservoirs from Processed Lunar Regolith. In: 5th Int. Energy Conv. Eng. Conf. (July 2007)

Zeng, X., He, C., Oravec, H., Wilkinson, A., Agui, J., Asnani, V.: Geotechnical Properties of JSC-1A Lunar Soil Simulant. J. Aerosp. Engrg. 23, 111 (2010)

Zacny, K., Huang, K., McGehee, M., Neugebauer, A., Park, S., Quayle, M., Sichel, R., Cooper, G.: Lunar Soil Extraction Using Flow of Gas. In: Proc. of Revolutionary Aerospace Systems Concepts - Academic Linkage (RASC-AL) Conference, Cocoa Beach, Florida, April 28-May 1 (2004)

Zacny, K., Glaser, D., Bartlett, P., Davis, K., Wilson, J.: Test Results of Core Drilling in Simulated Ice-Bound Lunar Regolith for the Subsurface Access System of the Construction & Resource Utilization Explorer (CRUX) Project. In: 10th Int Conf on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments, Earth & Space 2006 Conference, League City, TX, March 5-8 (2006)

Zacny, K., Bar-Cohen, Y., Brennan, M., Briggs, G., Cooper, G., Davis, K., Dolgin, B., Glaser, D., Glass, B., Gorevan, S., Guerrero, J., McKay, C., Paulsen, G., Stanley, S., Stoker, C.: Drilling Systems for Extraterrestrial Subsurface Exploration. Astrobiology Journal 8(3), 665-706 (2008a)

Zacny, K., Mungas, G., Mungas, C., Fisher, D., Hedlund, M.: Pneumatic Excavator and Regolith Transport System for Lunar ISRU and Construction. Paper No: AIAA-2008-7824 and Presentation, AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition, San Diego, California, September 9-11 (2008)

Zacny, K., Craft, J., Wilson, J., Chu, P., Davis, K.: Percussive Digging Tool for Lunar Excavation and Mining Applications. Abstract 4046, LEAG-ICEUM-SRR, Cape Canaveral, FL, October 28-31 (2008c)

Zacny, K., Craft, J., Hedlund, M., Chu, P., Galloway, G., Mueller, R.: Investigating the Efficiency of Pneumatic Transfer of JSC-1a Lunar





Regolith Simulant in Vacuum and Lunar Gravity During Parabolic Flights. In: AIAA Space 2010, AIAA-2010-8702, Anaheim, CA, August 31-September 2 (2010a)

Zacny, K., Mueller, R.P., Craft, J., Wilson, J., Hedlund, M., Cohen, J.: Five-Step Parametric Prediction and Optimization Tool for Lunar Surface Systems Excavation Tasks. In: ASCE Earth and Space, Honolulu HI, March 15-17 (2010b)

Zacny, K., Bar-Cohen, Y.: Drilling and excavation for construction and in situ resource utilization. In: Badescu, V. (ed.) Mars: Prospective Energy and Material Resources, ch. 14. Springer, Heidelberg (2010c)

Zacny, K.: IceBite Blog: Remote Control (2011), [http://www.astrobio.net/index.php?option=com\\_expedition&task=detail&id=3692](http://www.astrobio.net/index.php?option=com_expedition&task=detail&id=3692) (accessed March 21, 2011)

XPRIZE, The Google Lunar X PRIZE (2011), <http://www.googlelunarxprize.org/> (accessed March 21, 2011)

G. Jeffrey Taylor (2004). Cosmochemistry and Human Exploration, <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec04/spaceResources.html>

