

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño del sistema mecánico y chasis de un robot todoterreno
para operaciones de búsqueda y rescate**

Trabajo de graduación presentado por Diego Alberto Hurtarte Vásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



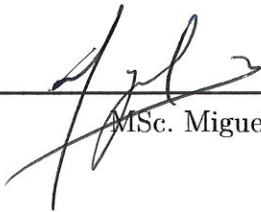
**Diseño del sistema mecánico y chasis de un robot todoterreno
para operaciones de búsqueda y rescate**

Trabajo de graduación presentado por Diego Alberto Hurtarte Vásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

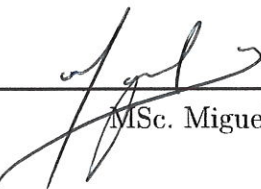
Guatemala,

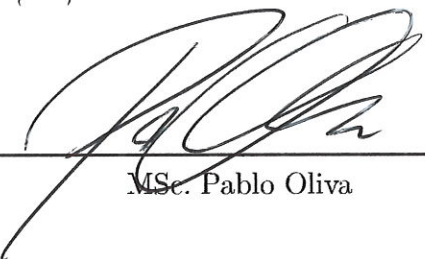
2019

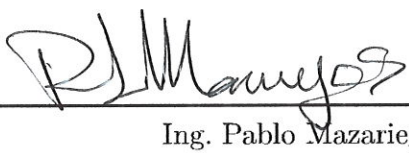
Vo.Bo.:

(f)  _____
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f)  _____
MSc. Miguel Zea

(f)  _____
MSc. Pablo Oliva

(f)  _____
Ing. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 04 de Diciembre de 2019.

Prefacio

Para la realización de este trabajo se contó con el apoyo de profesores de la Universidad del Valle de Guatemala, familia y amigos a los cuales quiero agradecer por la motivación de seguir adelante. También quiero agradecer al ingeniero Miguel Zea por brindar su asesoría durante la elaboración del proyecto. Por último quiero agradecer a la universidad por la oportunidad de realizar este trabajo de graduación.

Prefacio	v
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Opportunity Rover:	3
2.2. Robot Anymal:	4
2.3. Robot Rhex:	4
2.4. Robot Puffer:	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Diseño de mecanismos	13
6.1.1. Eslabonamiento	13
6.1.2. Grados de libertad	15
6.1.3. Mecanismos	17
7. Metodología	19

8. Diseño de mecanismo para control de ángulo de las ruedas del sistema	21
8.1. Selección del mecanismo	21
8.1.1. Mecanismo 1	21
8.1.2. Mecanismo 2	22
8.1.3. Mecanismo 3	23
8.1.4. Mecanismo 4	23
8.2. Prototipo 1	24
8.3. Prototipo 2	25
8.4. Prototipo 3	27
8.4.1. Prueba de desplazamiento por una pendiente	30
8.5. Método de transmisión de potencia	33
8.6. Ángulo de las ruedas	35
8.7. Análisis de resultados del mecanismo planteado	35
9. Cable de alimentación y comunicación	37
9.1. Elección de forma de comunicación y alimentación	37
9.2. Selección de protocolo y cable de comunicación	38
9.2.1. Protocolo de comunicación RS-485	38
9.3. Método de alimentación	39
9.3.1. Selección de cable de alimentación	40
9.4. Pruebas realizadas para la comunicación y alimentación	40
9.5. Análisis del funcionamiento del cable de alimentación y comunicación	43
10. Materiales para aislamiento	45
10.1. Selección inicial de tipos de materiales	45
10.2. Polímeros	45
10.2.1. Aerogel	46
10.2.2. ABS	47
10.2.3. Polimetacrilato	48
10.3. Metales	49
10.3.1. Aluminio	49
10.4. Selección de materiales para el diseño	50
10.5. Pruebas realizadas a los materiales en conjunto	50
10.6. Análisis del comportamiento de los materiales seleccionados	51
11. Diseño de chasis para el sistema	53
11.1. Requerimientos del chasis	53
11.2. Ideación del modelo inicial	53
11.3. Prototipo inicial del chasis	54
11.4. Segundo diseño de prototipo para el chasis	55
11.4.1. Lattice Pattern	56
11.5. Construcción del segundo prototipo	57
11.6. Pruebas mecánicas realizadas al prototipo	58
11.6.1. Pruebas de temperatura	58
11.6.2. Pruebas de pandeo de la base del chasis	59
11.6.3. Esfuerzos en el mecanismo para el cambio de ángulo de las ruedas	60
12. Conclusiones	63

13.Recomendaciones

65

14.Bibliografía

67

Lista de figuras

1. Opportunity Rover	3
2. Robot ANYmal	4
3. Robot RHex	4
4. Robot Puffer	5
5. Desastre en El Cambray II	7
6. Desastre en el Volcán de Fuego	8
7. Rescatistas en el Volcán de Fuego	8
8. Eslabones binario, ternario y cuaternario	14
9. Junta revoluta	14
10. Junta prismática	15
11. Ejemplo de semijunta	15
12. Ejemplo de grados de libertad	16
13. Ejemplo de mecanismo de cuatro barras	18
14. Mecanismo 1	22
15. Mecanismo 2	22
16. Mecanismo 3	23
17. Mecanismo 4	23
18. Diseño del Prototipo 1	24
19. Prototipo 1 con posición de eslabón de salida vertical	24
20. Prototipo 1 con posición de eslabón de salida con un ángulo	25
21. Diseño del Prototipo 2	25
22. Prototipo 2 con posición de eslabón de salida vertical	26
23. Prototipo 2 con posición de eslabón de salida con un ángulo	26
24. Prototipo 2 implementado con ruedas verticales	27
25. Prototipo 2 implementado con ruedas con ángulo	27
26. Diseño del Prototipo 3	28
27. Prototipo 3 con posición de eslabón de salida vertical	28
28. Prototipo 3 con posición de eslabón de salida con un ángulo	29
29. Unión entre el motor y las ruedas para transmisión de potencia	29
30. Prototipo 3 implementado con ruedas verticales	29

31. Prototipo 3 implementado con ruedas con ángulo	30
32. Prototipo 3 subiendo una pendiente con las ruedas en posición vertical	30
33. Prototipo 3 deslizándose por la pendiente con las ruedas en posición vertical al no poder subir	31
34. Prototipo 3 subiendo una pendiente con las ruedas en un ángulo	31
35. Prototipo 3 en la cima de la pendiente con las ruedas en un ángulo	31
36. Prototipo 3 prueba de obstáculos	32
37. Prototipo 3 desplazándose sobre obstáculos	32
38. Modelo de junta homocinética	33
39. Prototipo junta homocinética	33
40. Dificultades en la manufactura de piezas para la junta	34
41. Fallo en la manufactura de piezas para la junta	34
42. Ángulo aproximado de las ruedas	35
43. Ejemplo de la forma de las señales enviadas por el protocolo RS-485 y lectura de datos	39
44. Distribución de los pines del cable DB9	39
45. Conexión realizada para lo comunicación RS-485	41
46. Conexión realizada para la alimentación de los actuadores	41
47. Conexión realizada para la alimentación de los sensores	42
48. Datos obtenidos en la interfaz gráfica de los sensores utilizando la comunicación RS-485	42
49. Pruebas de comunicación realizadas	43
50. Ejemplo del aerogel [15]	46
51. Ejemplo del ABS [18]	47
52. Ejemplo del Polimetacrilato [21]	48
53. Ejemplo del aluminio [22]	49
54. Pruebas térmicas realizadas a los materiales en contacto	51
55. Cambio de la temperatura de los materiales durante las pruebas térmicas realizadas	51
56. Modelo inicial del chasis	54
57. Diseño del prototipo inicial	55
58. Ejemplo de Lattice Pattern [24]	56
59. Prototipo de la parte superior utilizando Lattice Pattern	56
60. Modelo del segundo prototipo	57
61. Segundo prototipo construido	57
62. Segundo prototipo de chasis	58
63. Prueba térmica modelo	59
64. Grafica de prueba térmica modelo	59
65. Pandeo base	60
66. Mecanismo a tensión	60
67. Mecanismo a compresión	61

Lista de cuadros

1. Conexiones del protocolo RS-485 en cable DB9	39
2. Características de los cables AWG [12]	40
3. Características del material aerogel [14]	46
4. Características del material ABS [17]	47
5. Características del material Polimetacrilato [20]	48
6. Características del material aluminio [23]	50

El fin de este proyecto es la realización del diseño de un prototipo robot capaz de adaptarse a distintos terrenos y situaciones que puedan presentársele. Se quiere hacer esto con el objetivo de iniciar un proceso de desarrollo de plataformas para realizar operaciones de búsqueda y rescate en incidentes causados por desastres naturales. Con la realización de una investigación previa se tomó la decisión de llevar a cabo un prototipo con el cual se pueda ingresar en espacios cerrados y andar sobre terrenos difíciles para las personas, evitando que estas se expongan a riesgos. Con esto en mente se procedió al desarrollo de la investigación y el diseño de prototipos de los sistemas mecánicos que se utilizaron en la plataforma que se adecuaron a la tarea. Se hizo el diseño de un mecanismo capaz de modificar la configuración de las ruedas del robot dando a este mayor movilidad, logrando operar a dos ángulos de operación 90 y 53 grados. También se hizo un diseño de un chasis para la plataforma robot utilizando en éste materiales que pueden ayudar a aislar los componentes internos del sistema, seleccionando para la parte exterior del prototipo aluminio por su alta resistencia ante impactos y en el interior polimetacrilato debido a su capacidad de aislar térmicamente los componentes internos. Por último, se seleccionaron dos cables, eligiendo un 14 AWG para la alimentación del robot y un DB9 para la comunicación con el operario, logrando tener una recepción de un 100% de los datos enviados para controlar la plataforma.

The main purpose of this project is the develop of the design of a prototype capable of adapting to different terrains and situations that may to faced. This is going to be done with the objective of starting the process of development of a robotic platform to perform search and rescue operations in incidents caused by natural disasters. With the conduct of a previous investigation, we made the decision to develop a prototype that can enter to enclosed spaces and walk on difficult terrain for people, preventing them from being exposed to risks. With this in mind, we made a research and prototype design of the mechanical systems that were used on the platform that fit the task. We made the design of a mechanism that can modify the configuration of the robot's wheels giving this greater mobility and accessibility, managing to operate at two operating angles 90 and 53 degrees. A chassis design for the robot platform was also made using materials that can help insulate the internal components of the system selecting for the outside of the aluminum prototype for its high impact resistance and inside polymethacrylate due to its ability to thermally insulate the internal components. Finally, the selection of two cables was made, choosing a 14 AWG for the power of the robot and a DB9 for communication with the operator, managing to receive 100 % of the data sent to control the platform.

Debido a que en Guatemala existen casos donde desastres naturales han provocado un gran número de víctimas se ha planteado la idea de que pasaría si se tuviera acceso a tecnología que pudiera ayudar en situaciones como estas. En algunos de estos casos también han resultado afectados los rescatistas que intentan ayudar a los afectados. Debido a esto se tomó la decisión de iniciar el proceso de diseño para una plataforma robot todoterreno capaz de realizar operaciones de búsqueda y rescate para hacer más eficiente la búsqueda de las víctimas sin exponer la vida de las personas que desean ayudar.

El objetivo principal de esta investigación es la elaboración del diseño de un chasis con la capacidad de contener el sistema necesario para que este pueda realizar operaciones de búsqueda y rescate. Según esta meta, se dividió las tareas a realizar en objetivos específicos los cuales se elaboraron para completar la tarea principal.

Como uno de los objetivos específicos planteados en este trabajo de investigación es la necesidad de elaborar el diseño de un mecanismo el cual pueda modificar el ángulo de operación del sistema ruedas para que este pueda obtener una mayor movilidad y accesibilidad en terrenos difíciles. Para esto se desarrollo un proceso de prototipado el cual evaluó distintos mecanismos para que pudieran realizar el movimiento requerido y hacer pruebas para comprobar el funcionamiento del que será seleccionado, describiendo todo este procedimiento en el capítulo de *Diseño de mecanismo para control de ángulo de las ruedas del sistema*. También fue necesaria la selección de un método con el cual se llevo a cabo la comunicación entre el operario de la plataforma y el robot, ya que así se podía obtener información acerca del entorno en el que este se encontraba y prestar ayuda si este llegase a encontrar a alguno de los afectados, para esto se hizo una investigación de protocolos y cables de comunicación que tuvieran la capacidad de realizar una comunicación efectiva en entornos hostiles, para esto se realizó el proceso encontrado en el capítulo *Cable de alimentación y comunicación*. Además, se seleccionaron los materiales de elaboración del diseño, ya que de esto dependería el funcionamiento y la integridad de los sistemas internos de la plataforma debido a que estos deben ser capaces de aislar y proteger los componentes que permiten la correcta operación, por lo que se hizo un proceso de investigación, selección y pruebas por medio de software

de materiales que se adaptan a los requerimientos planteados, haciendo este proceso en el capítulo *Materiales para aislamiento*. Por último, se hizo el diseño del chasis que contuviera el sistema, integrando todos los demás objetivos en este, ya que de esto dependerá la efectividad de la plataforma para cumplir su funcionamiento, se elaboró una serie de prototipos los cuales integrarán todos los componentes necesarios para la operación del sistema y que este los asile parcialmente, observando este proceso en el capítulo *Diseño de chasis para el sistema*. Con el cumplimiento de estos objetivos se pudo abrir paso a fases futuras de mejoras e implementación del proyecto que permitan a este aplicarse en situaciones de riesgo reales.

En el ámbito de la robótica móvil, más específicamente en el campo de la robótica todoterreno, existen muchas universidades y entidades que trabajan en el desarrollo de una plataforma que permita un desplazamiento continuo sobre cualquier superficie para la realización de distintas tareas, como lo son la exploración, análisis de terreno o realización de operaciones de búsqueda y rescate en lugares de riesgo. Este tipo de proyectos se han realizado desde hace muchos años con lo cual se han generado grandes avances científicos en el área y se han logrado hacer investigaciones que en otros casos resultaría imposible completar. Se pueden encontrar muchos prototipos que tienen como objetivo el movilizarse se forma adecuada por terrenos difíciles, entre estos podemos encontrar algunos ejemplos como lo son:

2.1. Opportunity Rover:

El Opportunity Rover [\[1\]](#) observado en la Figura [\[1\]](#), es un robot todoterreno que fue desarrollado por la NASA utilizado para realizar estudios en la superficie de Marte, este se encargaba de tomar fotografías del terreno y realizar análisis del suelo del planeta, gracias a esto se pudieron hacer avances de investigación de suma importancia. El Rover fue de mucha importancia para llevar a cabo estudios, ya que sin este no se hubiera podido realizar estas investigaciones debido a las dificultades que esta tarea presenta.



Figura 1: Opportunity Rover

2.2. Robot Anymal:

Otro prototipo realizado para realizar tareas de movilización todoterreno es el robot ANYmal [2] el cual se puede observar en la Figura 2. Este es un robot cuadrúpedo basado en la forma de caminar de perros que puede adaptarse a las distintas zonas donde se encuentre, así como poder controlar casi cualquier perturbación durante su operación, presentando una configuración robusta. Este es un robot muy similar al Spot realizado en Boston Dynamics, además existen muchas versiones de este debido a su gran capacidad de adaptación y el alcance de este tipo de proyectos. A pesar de que este tipo de prototipo se adapta de manera adecuada en las distintas pruebas realizadas a este, el control y la implementación de este tipo de sistema resulta ser muy compleja y costosa, lo que presenta una desventaja para su construcción.



Figura 2: Robot ANYmal

2.3. Robot Rhex:

Existe también una plataforma que ha sido utilizada e implementada por distintas universidades e instituciones llamada robot RHex [3] observado en la Figura 3. Este es un robot hexápodo con una configuración robusta que permite el movimiento por gran cantidad de terrenos. Se considera que este tipo de plataforma es de alta capacidad de movimiento ya que se adecua de forma adecuada a las pruebas realizadas en este, además presenta gran resistencia ante impactos y perturbaciones lo que lo hace ideal para este tipo de tareas.



Figura 3: Robot RHex

2.4. Robot Puffer:

Además de prototipos que utilicen patas para desplazarse, existen robots que utilizan ruedas para realizar tareas de desplazamiento en terrenos complicados. Como ejemplo se encuentra el robot Puffer [4] desarrollado por la NASA para tareas de exploración, este se puede observar en la Figura 4. Esta plataforma puede soportar fuertes impactos, como caídas, y puede desplazarse por lugares reducidos de difícil acceso, lo que permite que se adapte a casi cualquier terreno en el que se desplace.

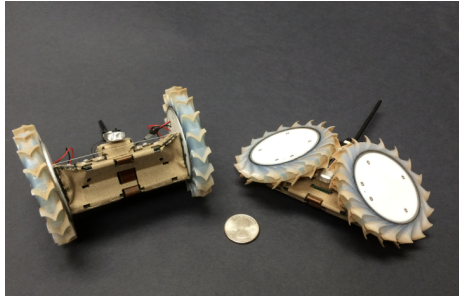


Figura 4: Robot Puffer

Existen muchas áreas en la cuales se puede enfocar este tipo de proyectos, ya sea en el campo científico, de investigación o exploración, pues ya se a visto que han sido desarrollos varios prototipos que cumplen con la tarea de desplazamiento todo terreno los cuales han sido utilizados para investigación espacial y científica así como para la exploración de distintos terrenos que son difícilmente accesibles por el ser humano, por mencionar solo algunos de estos. Sin embargo, el enfoque que se desea para este trabajo es en el ámbito social, ya que se quiere construir una plataforma que tenga la capacidad de realizar operaciones de búsqueda y rescate como método de respuesta para catástrofes naturales. Guatemala, al ser un país del tercer mundo, es susceptible a que desastres naturales afecten al país de manera mas severa ya que no se tiene una planificación para prevenir situaciones de riesgo, lo que hace mas vulnerable a la población de sufrir severos daños a causa de estos. Debido a esto, se desea realizar una plataforma todoterreno que sea capas de ayudar en situaciones de riesgo para evitar mas daños y servir como plan de contingencia en casos de necesidad.



Figura 5: Desastre en El Cambray II

Recordando los incidentes del alud ocurrido en El Cambray [5] y la erupción del Volcán de Fuego [6], ocurridos en el 2015 y 2018 respectivamente, provocan pensar en las víctimas que tomaron estos incidentes y los trabajos realizados para rescatar a los sobrevivientes de estos, ya que estas dos situaciones fueron de gran impacto para el país y su población.

Sin embargo, también es importante mencionar que otras de las personas afectadas en estos incidentes, y algunas de las vidas perdidas por estos, fueron los rescatistas que se encontraban trabajando en las zonas de desastres, debido a lo peligroso y complicado de los terrenos en los que se encontraban, y a accidentes que seguían surgiendo en las zonas donde se encontraban. Además, es importante mencionar que ciertas áreas que fueron afectadas por estos desastre eran inaccesibles debido a su alto riesgo, ya que cualquier persona que entrase en estos lugares pudiera perder la vida intentando cambiar allí, provocando que posibles sobrevivientes no pudieran ser rescatados ya que no se podía acceder a su ubicación. Otra situación de alto riesgo, y que Guatemala es sumamente vulnerable, es la posibilidad de un terremoto en el país debido a su ubicación geográfica, ya que, como se ha podido observar en otros países del mundo, los desastres provocados por estos son de gran escala y la necesidad de acceder a lugares y terrenos difíciles vuelve a ser una tarea obligatoria para los rescatistas.



Figura 6: Desastre en el Volcán de Fuego

Para estos terribles casos podemos apoyarnos en la tecnología para hacer el cambio y evitar estos contratiempos y situaciones de riesgo que puedan cobrar mas vidas, utilizando esta para ubicar a las víctimas de los desastres una manera sin riesgos, así poder realizar un rescate de manera mucho mas eficiente y segura. Basándose en las necesidades a cubrir en estos casos se tubo como idea la elaboración de un robot con la capacidad de operar en terrenos riesgosos para el ser humano y tener la función de enviar información para conocer el estado de este, así como la capacidad de realizar búsqueda e informar si este encuentra alguna persona que necesite asistencia y que se puede proceder las operaciones de rescate, esto se desea hacer con el de evitar la necesidad de exponer mas vidas en misiones de alto riesgo y poder abarcar una mayor área de exploración, haciendo mas eficiente esta labor.



Figura 7: Rescatistas en el Volcán de Fuego

4.1. Objetivo general

Diseñar un chasis que tenga la capacidad de contener el sistema necesario para el funcionamiento de un robot todoterreno, así como la capacidad de aislarlo de agentes externos que comprometan su función, con el fin de que este sea capaz de realizar operaciones de búsqueda y rescate.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un mecanismo que permita el cambio de ángulo de operación de las ruedas del sistema para que este obtenga mayor movilidad.
- Seleccionar el cable de alimentación necesario para la operación del robot que permita la comunicación efectiva con este en entornos hostiles.
- Seleccionar materiales adecuados para el chasis del sistema que sean capaces de aislarlo del entorno para que componentes internos no se vean afectados por este.
- Realizar el diseño del chasis que contenga al sistema y que este pueda proteger cada una de sus partes.

Proyectos de este tipo tienen un gran potencial en distintos ámbitos y áreas, ya que abarca muchos temas de estudio y se le puede dar un enfoque bastante variado. Muchas instituciones invierten en este tipo de proyectos ya que las posibilidades que se tienen al concretarlos son muy amplias, debido a las oportunidades de estudio que estos generan. Ya hemos observado distintos ejemplos en los cuales se tomó como enfoque la elaboración de un prototipo robot todoterreno y los resultados obtenidos, los cuales fueron sumamente positivos. Además, se han visto algunos de los campos en los cuales se puede operar, y las necesidades que puede llegar a suplir. Una de las principales metas del proyecto es darle una orientación a lo social, ya que se quiere que este pueda ayudar de alguna forma a Guatemala en situaciones de dificultad y alto riesgo. Guatemala ha sufrido catástrofes de gran magnitud en las cuales hubiera sido de gran ayuda contar con avances tecnológicos en el área para que se pudiera ayudar de una forma más rápida y eficiente en situaciones como esta. Con respecto al enfoque que se quiere para este proyecto, y en base a los objetivos planteados, se tuvo una planificación y fueron fijadas metas las cuales ayudaron a delimitar el alcance que se quiere lograr en este proyecto y como se deseó que este fuera orientado. Una de las principales metas del proyecto es darle una orientación a lo social, ya que se quiere que este pueda ayudar de alguna forma a Guatemala en situaciones de dificultad y alto riesgo. Fueron ordenados los objetivos en orden de prioridad y necesidad de ser cumplidos, ya que realizando esto de esta forma se puede trabajar en este de forma fluida.

- Diseñar un mecanismo que permita el cambio de ángulo de operación de las ruedas: la realización de este objetivo es necesaria para otorgarle más movilidad al prototipo robot
- Seleccionar el cable de alimentación necesario para la operación del robot que permita la comunicación efectiva: la realización de este objetivo se debe a que se necesita realizar una comunicación efectiva para poder controlar la plataforma robot.
- Seleccionar materiales adecuados para el chasis del sistema que sean capaces de aislarlo del entorno: la realización de este objetivo es necesaria debido a que se deben evaluar

los materiales de construcción que permitan al robot operar en entornos hostiles sin comprometer su funcionamiento

- Realizar el diseño del chasis que contenga al sistema y que este pueda proteger cada una de sus partes: este objetivo es necesario ya que se deben posicionar cada uno de los componentes del robot necesarios para su operación y estos deben ser protegidos de factores externos.

Debido a que esta es la primera fase del proyecto existen limitantes que se deben considerar las cuales definen hasta donde se llevara el diseño y pruebas del primer prototipo. Estas dificultades pueden ser:

- Debido a que es la primera fase del prototipo, no se realizaran pruebas en entornos hostiles o de alto riesgo, únicamente se limitaran a hacer pruebas en ambientes de laboratorio controladas.
- Para las pruebas del cable de comunicación se limitará la longitud del cable debido a el presupuesto disponible para la elaboración del prototipo.
- Las pruebas realizadas en los materiales, así como en el prototipo del chasis se limitarán a ser evaluadas por software debido a la manufactura de las piezas en los materiales seleccionados.
- Las pruebas realizadas en el prototipo del chasis se limitarán a ser evaluadas por software debido a limitaciones de manufactura de las piezas en los materiales seleccionados.

En términos generales, y realizando lo antes mencionado, se definió alcance del proyecto como la realización del diseño de una plataforma robótica móvil que sea capaz de operar en terrenos de alto riesgo con el fin de realizar operaciones de búsqueda y rescate. Este deberá contar con el sistema necesario para la movilización y operación, así como tener definido los materiales con los cuales se elaborará dicho modelo.

6.1. Diseño de mecanismos

Cuando se realiza el diseño de un mecanismo para su utilización en una máquina, se deben de definir los requerimientos de operación necesarios para la ejecución del movimiento que se desea que este realice. Debido a esto, es necesario la realización del análisis de distintos parámetros del sistema para poder observar su comportamiento y capacidad de realizar la tarea asignada. Existen distintos mecanismos utilizados en distintas maquinarias que trabajan en la industria, todos estos pueden ser clasificados según su configuración y funcionamiento. Cada una de las partes de cualquier maquina puede ser simplificada como un conjunto de eslabones y juntas que cumplen una tarea específico. Con este tipo de análisis se puede simplificar el estudio de estas.

Con las distintas clasificaciones de mecanismos se puede realizar un análisis detallado de cada uno, ya sea de comportamiento, posición, velocidad o aceleración según sea requerido. Con estos análisis se puede definir si un sistema es apto cumplir un objetivo.

6.1.1. Eslabonamiento

Para la realización de análisis de maquinarias, están son divididas en subsistemas llamados mecanismos, que a su vez son simplificados utilizando eslabones y juntas, lo que facilita el estudio de estos al obtener sistemas mucho más sencillos. Un eslabón son las piezas básicas de un mecanismo y son utilizadas para la construcción de estos [7]. Los eslabones pueden ser clasificados por su número de nodos o tipos de uniones que estos puedan tener. Si estos son ordenados utilizando el numero de nodos que estos poseen, se podrán dividir en eslabones binarios, ternarios o cuaternarios, observando ejemplos en la Figura 8. Como principal requerimiento de un eslabón estos deben tener por lo menos dos nodos. Diferentes sistemas y partes mecánicas complejas, como lo son levas, engranajes, cadenas, entre otros, pueden ser modelados como sistemas de eslabonamientos, lo cual facilita su análisis.

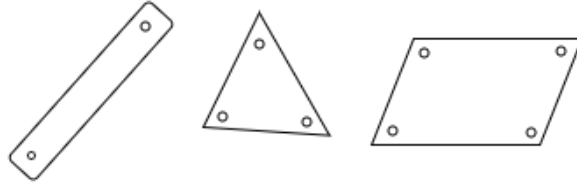


Figura 8: Eslabones binario, ternario y cuaternario

Para el análisis de sistemas utilizando mecanismos es necesario contar con más que solo eslabones para la realización de modelos, también se deben tener uniones que permitan conexiones entre eslabones y a su vez se pueda generar movimientos específicos entre estos. A estas uniones se les conoce como juntas o pares cinemáticos. Una junta es la unión de dos o más eslabones, la cual permite generar un movimiento entre ellos [7]. Existen distintos tipos de clasificaciones de juntas, ya sea por el tipo de contacto, por la forma de la unión, por los grados de libertad o por el número de eslabones que están unidos por esta, debido a los objetivos de este trabajo, se limitara a habla del tipo de juntas por sus grados de libertad.

Dependiendo de los grados de libertad que posea una junta y del tipo de movimiento que esta permita realizar, estas se pueden clasificar utilizando distintos nombres que hacen alusión a dichas características. Al utilizar dichas juntas se necesitan distintos tipos de movimientos de entrada para generar una salida en este. Utilizando esta forma de clasificación podemos observar las siguientes juntas:

- Juntas completas:

Este tipo de juntas permite un único tipo de movimiento de un eslabón respecto al otro, por lo que no existe movimiento relativo. Esto quiere decir que existe únicamente un grado de libertad en este tipo de juntas, teniendo un único tipo de movimiento en el eslabón de salida, ya sea rotacional o traslacional. Estas juntas suelen observarse en mecanismos planos. Entre este tipo de juntas podemos encontrar:

- Junta Revoluta:

Esta junta posee un único grado de libertad. Consiste en la unión de dos eslabones por medio de un pasador que permite un movimiento rotatorio de uno de los eslabones respecto al otro. Este tipo de junta es comúnmente encontrada en distintos mecanismos, ya que es una de las más sencillas y fáciles de utilizar, además permiten un funcionamiento adecuado, usando esta unión como sistema de entrada de potencia para los sistemas. Se puede observar un ejemplo de una junta revoluta en la Figura 9.

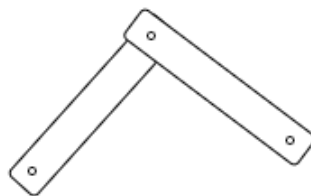


Figura 9: Junta revoluta

- Junta Prismática:

Estas juntas, al igual que la junta revoluta, poseen un único grado de libertad. Estas consisten en la unión de los eslabones por medio de una corredera que permite únicamente en un movimiento lineal. Esta junta también es utilizada en distintos sistemas en la industria debido a su simpleza. Se puede observar una junta prismática en la Figura 10



Figura 10: Junta prismática

- Semijuntas:

Las semijuntas son juntas que poseen dos grados de libertad. Estas permiten generar un movimiento relativo entre eslabones, Esto se refiere a que se puede generar un movimiento tanto rotacional como traslacional entre estos. Entre este tipo de juntas podemos encontrarlas juntas rodantes puras, deslizantes puras y juntas rodantes-deslizantes. Se puede observar un ejemplo de una semijunta en la Figura 11

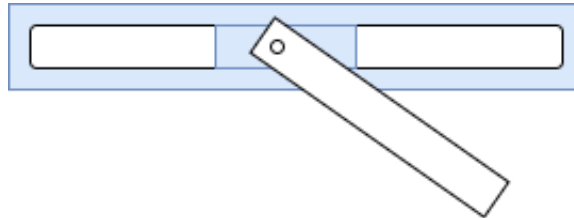


Figura 11: Ejemplo de semijunta

6.1.2. Grados de libertad

Se ha estado mencionando el término de grados de libertad constantemente para referirnos a las juntas y movimientos de mecanismo que estas permiten obtener, pero ¿A qué se refiere el termino de grados de libertad? Los grados de libertad de un mecanismo se refieren a la cantidad de parámetros de entrada necesarios para definir la posición de salida de un sistema en un tiempo determinado [7]. Esto quiere decir que cuantos valores son necesarios conocer para determinar el estado en un instante de tiempo del eslabón de salida del sistema, ya sea posición, velocidad, aceleración, entre otros. Conociendo los grados de libertad se puede determinar la movilidad de un sistema. Como ejemplo de grados de libertad podemos utilizar la posición de un cuerpo rígido en un plano bidimensional, la cual puede definirse utilizando tres parámetros, posición X, Y y un ángulo, observado en la Figura 12, por lo que podemos decir que este posee tres grados de libertad, mientras en un plano tridimensional

son necesarios seis parámetros, ángulos Roll, Pitch y Yaw, así como su posición en X, Y y Z, por lo que un cuerpo en este plano posee seis grados de libertad.

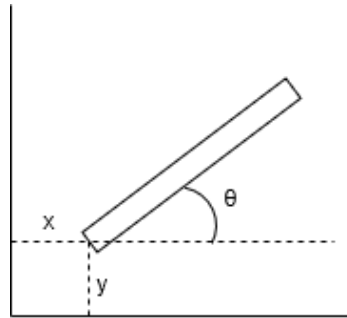


Figura 12: Ejemplo de grados de libertad

Tipos de movimientos

Se puede obtener un numero casi indefinido de movimientos y posiciones de un cuerpo en un espacio definido. Sin embargo, si tomamos un punto como marco de referencia y se fijan ejes respecto a este para su análisis podemos simplificar estos movimientos en tres tipos posibles respecto a este punto de observación y un plano seleccionado. Estos movimientos pueden ser:

- Rotacional:

Un movimiento rotacional consta únicamente de un cambio de posición angular respecto a un centro de rotación. Este centro de rotación no posee movimiento respecto al marco de referencia. Cada punto dentro del cuerpo presenta únicamente un cambio de orientación respecto a los otros.

- Traslacional:

En un movimiento traslacional, el cuerpo presenta un cambio de posición respecto a un marco de referencia. Además, todos los puntos del cuerpo en movimiento presentan trayectorias paralelas uno respecto a los otros, lo que quiere decir que no existe cambio de posición respecto a un eje.

- Complejo:

En un movimiento complejo es la combinación de una traslación y una rotación respecto al marco de referencia. En este tipo de movimiento se presenta movimiento relativo entre diferentes puntos dentro del mismo cuerpo, lo que quiere decir que hay cambio tanto de posición como de ángulo.

Determinar los grados de libertad de un mecanismo

Poder determinar los grados de libertad de un mecanismo es de suma importancia ya que esto es el primer paso para poder realizar un análisis completo de este. Con este valor podemos determinar los parámetros de entrada y como se ven afectados los valores en la salida de un sistema, así como su movilidad. Esto nos sirve para poder realizar un correcto diseño de mecanismos para lograr un movimiento deseado, así como determinar el número de actuadores necesarios para poder realizar control sobre estos. Para determinar este valor es necesario evaluar la cantidad de eslabones y juntas, así como el tipo al que estos pertenecen dependiendo del movimiento que estas permitan. Con cada parte del sistema clasificada de forma correcta, se debe evaluar la movilidad utilizando la ecuación de Gruebler para mecanismos planos.

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

donde:

- M es la movilidad del mecanismo.
- L es el número de eslabones.
- J_1 es el número de juntas completas.
- J_2 número de semijuntas.

Con la ecuación anterior aplicada podremos determinar cuál es el número de parámetros necesarios para conocer y analizar el funcionamiento de un mecanismo. Si la movilidad de un sistema es mayor que cero, este es considerado un mecanismo, ya que se puede obtener un movimiento en el eslabón de salida, si es igual a cero es considerado como una estructura, ya que el sistema no puede presentar ningún movimiento de salida, y si esta es negativa el sistema presenta esfuerzos internos en sus eslabones.

6.1.3. Mecanismos

Ya se ha mencionado el término de mecanismo anteriormente, por lo que deducir que este es un conjunto de eslabones y juntas que sirven para generar un movimiento. Sin embargo, hay otras consideraciones que se deben de tomar al definir este término. Para hablar de mecanismos se tiene que definir primero que es una cadena cinemática. Una cadena cinemática es un conjunto de eslabones en los cuales se puede obtener un movimiento controlado si se identifica la cantidad de parámetros de entrada necesarios para controlar su salida [7]. Con la definición anterior se puede decir que un mecanismo es un sistema conformado por varios eslabones, que conforman una cadena cinemática, de los cuales uno de estos es fijado para actuar como una tierra, con los cuales se puede generar un movimiento deseado, variando sus parámetros de entrada con el fin de realizar una tarea en específico [7]. Estos son ampliamente utilizados en cualquier área de la industria para la construcción de máquinas complejas.

Con esto en mente se puede definir a una maquina como un conjunto de mecanismos los cuales son utilizados para generar trabajo con el fin de realizar un objetivo [7].

Muchos de los sistemas y máquinas complejas que son utilizadas en la industria pueden ser analizadas utilizando sistemas simplificados de eslabones y juntas para conformar mecanismos sencillos que permiten realizar un análisis completo, pero de una manera mucho más sencilla. Existen mecanismos conocidos que son ampliamente utilizados debido a que ya se ha realizado un análisis previo del funcionamiento de este y se conocen los parámetros y comportamiento de estos sistemas. Alguno de estos son eslabonamientos de cuatro, seis y ocho barras, de los cuales ya se tienen establecidas formas de análisis y el comportamiento que estos tendrán cuando se aplique un valor a los parámetros de entrada. Por los fines y alcance de este proyecto, se limitará a hablar sobre mecanismos de cuatro barras.

Mecanismos de cuatro barras

Un mecanismo de cuatro barras consta de cuatro eslabones para generar un movimiento, tres de los eslabones se encuentran en movimiento, mientras que el ultimo de los eslabones que lo conforman es utilizado como tierra. Las juntas que unen a los eslabones de este mecanismo son todas juntas revolutas que sirven como puntos de pivote para estos. Este mecanismo es el sistema más simple que existe para generar un movimiento controlado con un único grado de libertad, pero su uso es muy amplio ya que se puede desde controlar la posición deseada del eslabón de salida, así como su velocidad y aceleración utilizando únicamente un solo actuador como entrada.

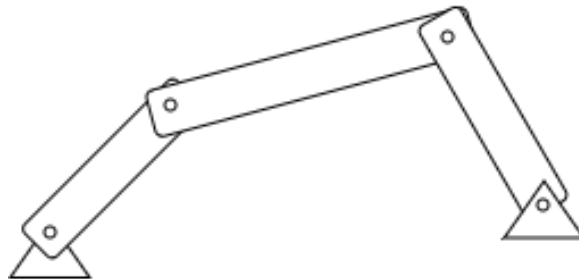


Figura 13: Ejemplo de mecanismo de cuatro barras

Para esta fase del proyecto, en términos generales, se desea centrarse en la realización del diseño de un prototipo robot para que este pueda realizar operaciones de búsqueda y rescate en situaciones de riesgo, este diseño debe constar con el espacio suficiente para todos los componentes y actuadores necesarios para su operación, y al mismo tiempo poder aislarlos de ambientes que comprometan su funcionalidad. En el caso de este proyecto, se basará en el cambio de ángulo de operación de las ruedas del robot Puffer, como sistema de operación principal, así como en el chasis y ruedas del robot Rhex, como método de aislamiento y movilidad respectivamente. Para lograr dicha meta se deben seguir una metodología que consiste en dividir los avances del proyecto en sub-metas que permitan evaluar los avances del mismo. Estas serían:

- Realización del diseño de un mecanismo que sea capaz de cambiar el ángulo de operación de las ruedas del sistema. Esto con el fin de poder modificar el tamaño que ocupara el prototipo y obtener mayor tracción en diferentes terrenos. Para la realización de esta meta, implica la realización de:
 - Búsqueda y selección de mecanismo que sea capaz de realizar la tarea del cambio de ángulo en las ruedas sin afectar otras funcionalidades del prototipo.
 - Selección de actuadores que sean capaces de realizar los movimientos del mecanismo de manera adecuada y controlada.
 - Diseño de prototipo del mecanismo que se adecue a los actuadores seleccionados y cumpla con el requisito de cambio de ángulo para las llantas.
 - Evaluar la funcionalidad y efectividad del mecanismo propuesto para observar si este cumple con los requisitos necesarios de operación.
- Se debe seleccionar un cable de operación que permita la comunicación efectiva y la alimentación del prototipo. El sistema que se va a diseñar funcionara de forma

alámbrica por lo que se debe seleccionar una forma adecuada para poder controlar y obtener información del mismo. Debido a esto se deberá realizar:

- Investigación y selección de protocolo de comunicación a larga distancia por medio de conexión alámbrica.
 - Investigación y selección de cable que permita la utilización del protocolo seleccionado para la comunicación.
 - Evaluar efectividad de la comunicación utilizando envío de datos para comprobar su correcto funcionamiento.
- Se deben seleccionar los materiales necesarios para la operación del prototipo. El sistema que se diseñará deberá funcionar en terrenos en los cuales este será expuesto a elementos que pueden comprometer la ejecución de la tarea asignada. Debido a esto, los materiales de los cuales estará hecho el chasis deberán ser capaces de aislar al sistema casi en su totalidad para que no se comprometa su función. Para poder hacer la selección de materiales se deberá de realizar lo siguiente:
- Investigación y selección de materiales que presenten resistencia a los distintos factores a los cuales será expuesto el prototipo.
 - Evaluación del funcionamiento de los materiales seleccionados para comprobar su efectividad.
- Realización del diseño del chasis que sea capaz de contener el sistema en su totalidad. Este deberá tener la capacidad de aislar los componentes del prototipo casi por completo para evitar que elementos externos comprometan su funcionamiento. Se deberá considerar en el diseño de este todos los mecanismos y subsistemas que participan en la operación del robot todoterreno, para que estos puedan funcionar de manera adecuada. Para el cumplimiento de esta meta se deberá de realizar:
- Dimensionamiento de los componentes y mecanismos a utilizar en el sistema para su posicionamiento.
 - Diseño de prototipo de chasis para la plataforma robot todoterreno el cual tenga el espacio necesario para la contención y posicionamiento de componentes y mecanismos necesarios para su funcionamiento.

Como finalidad de esta parte del proyecto se desea tener el diseño de un prototipo para la plataforma robot todoterreno para que en fases posteriores esta pueda ser implementada.

Diseño de mecanismo para control de ángulo de las ruedas del sistema

8.1. Selección del mecanismo

Como parte de los objetivos específicos de este proyecto se tiene la tarea de realizar el diseño de un sistema o mecanismo que permita la variación del ángulo de operación de las ruedas de la plataforma robot todo terreno, pudiendo variar la configuración de este, haciendo que este sea adaptable a diferentes situaciones que puedan presentarse, como lugares estrechos o pendientes. Para la realización del diseño se decidió utilizar mecanismos planos sencillos para realizar la tarea requerida, optando por cadenas cinemáticas de eslabonamientos de cuatro barras, debido a que se desea el control únicamente de un parámetro de salida utilizando solamente una entrada. Estos sistemas al contar con un único grado de libertad pueden presentar un movimiento con el comportamiento deseado, por lo que se procedió a evaluar distintas variaciones de estos sistemas. Se realizó una búsqueda de distintos mecanismo utilizados en sistemas con ruedas de vehículos y otros de uso mas general como transmisión de potencia. Con la investigación previa, se seleccionó una serie de posibles mecanismos que podrían cumplir con el requerimiento planteado en los objetivos. Para evaluar el comportamiento de los sistemas, fue utilizado el software ForceEffect de Autodesk, con el cual se procedió a elaborar una simulación de los mecanismos para comprobar su funcionamiento al variar el parámetro de entrada, comprobando el comportamiento del ángulo de salida, el cual corresponde a la posición angular de las ruedas.

8.1.1. Mecanismo 1

El mecanismo 1, observado en la Figura 14, es un sistema utilizado para la sujeción de ruedas de automóviles, siendo utilizado como parte del amortiguamiento del vehículo ante perturbaciones. Al evaluar el comportamiento del eslabón de salida al colocar un actuador

en la entrada del sistema se pudo observar que, ante cualquier movimiento de entrada, el eslabón de salida se mantenía siempre de forma vertical sin importar la posición de los otros eslabones. Este mecanismo fue descartado debido a el comportamiento totalmente contrario al deseado para el sistema final.

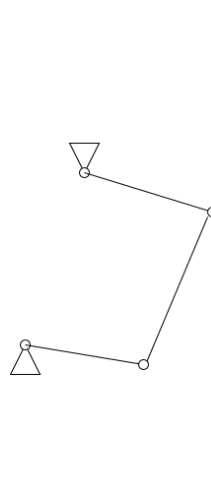


Figura 14: Mecanismo 1

8.1.2. Mecanismo 2

El mecanismo 2, observado en la Figura 15, es un sistema utilizado para el amortiguamiento de las ruedas de automóviles, el cual se encuentra unido al chasis de este. Al evaluar el comportamiento del eslabón de salida del sistema al hacer una variación en el actuador en la entrada del sistema se pudo observar que el eslabón se mantenía de forma vertical. Al presentar un comportamiento similar al mecanismo 1, el cual es un movimiento no deseado, este sistema también fue descartado.

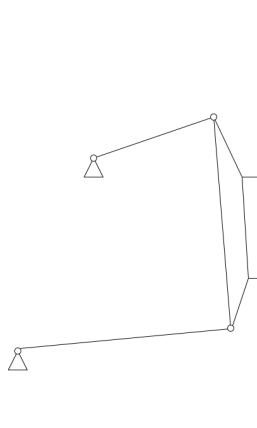


Figura 15: Mecanismo 2

8.1.3. Mecanismo 3

Al observar que el comportamiento de los mecanismos 1 y 2 presentaba un movimiento no deseado se tomó la decisión de no utilizar sistemas de automóviles, debido a su complejidad y su salida no deseada, y en su lugar buscar sistemas de transmisión de potencia más generales que los anteriores con el fin de comprobar si estos se adecuan más a la tarea requerida. Debido a esto, se seleccionó el mecanismo 3, observado en la Figura 16, como posible candidato para la solución de la idea propuesta. Al colocar el actuador en la entrada del sistema y observar el cambio en la posición de salida, se pudo notar que el ángulo del eslabón si presentaba cambios. Sin embargo, el movimiento de los otros eslabones era muy significativo, llegando a pasar por posiciones que pudieran afectar o chocar con otros elementos internos del robot todoterreno. Debido a las observaciones anteriores se decidió descartar este mecanismo y buscar uno similar.

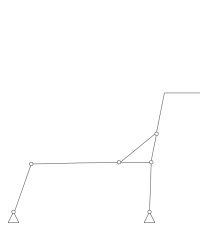


Figura 16: Mecanismo 3

8.1.4. Mecanismo 4

Debido a las complicaciones que se tubo en los mecanismos anteriores, se tomó la decisión de buscar sistemas mas simples que pudieran cumplir con la tarea requerida y que este al operar no afectara otras partes del prototipo. Debido a esto, se eligió un sistema mucho mas sencillo, un mecanismo de doble balancín como mecanismo 4, observado en la Figura 17, para evaluar su funcionamiento. Al colocar el actuador en la entrada del sistema y observar la salida, se pudo comprobar que el ángulo de operación del eslabón de salida cambiaba de manera adecuada y el resto del mecanismo no comprometía las otras partes del robot. Debido a esto se decidió seguir realizando pruebas, a través de prototipos, de este sistema para evaluar su funcionamiento.

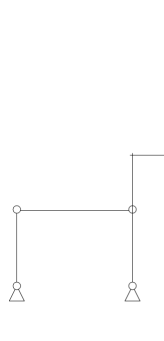


Figura 17: Mecanismo 4

8.2. Prototipo 1

Con el mecanismo seleccionado anteriormente, utilizando la herramienta de Autodesk Inventor, se procedió a la realización de un diseño de un prototipo preliminar con el fin de evaluar el comportamiento del sistema de eslabones en la salida, para dimensionamiento de actuadores y como punto de partida para próximos diseños del sistema de ruedas. Este sistema consistió de cuatro barras unidas a través de ejes que actúan como pivote y permiten movimiento entre cada eslabón, y una rueda fija que actúa como la salida. Cada una de estas barras representa un eslabón del mecanismo uniéndose a tierra por medio del actuador Hitec D950TW y una junta fija a la base del sistema. Se puede observar el sistema diseñado en la Figura 18.

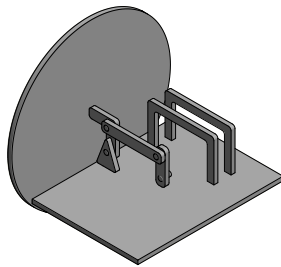


Figura 18: Diseño del Prototipo 1

Evaluando el comportamiento del primer prototipo, se puede comprobar que la salida del sistema es la esperada, pudiendo observar en las figuras 19 y 20 que el ángulo de operación de la rueda cambia de forma adecuada respecto a la entrada. Debido al funcionamiento esperado del sistema se decide seguir utilizando este mecanismo para prototipos posteriores. Sin embargo, debido a la utilización de únicamente ejes en la unión de los eslabones el movimiento presenta algunos problemas debido a la fricción entre las partes del mecanismo, por lo que para prototipos posteriores se toma en consideración.

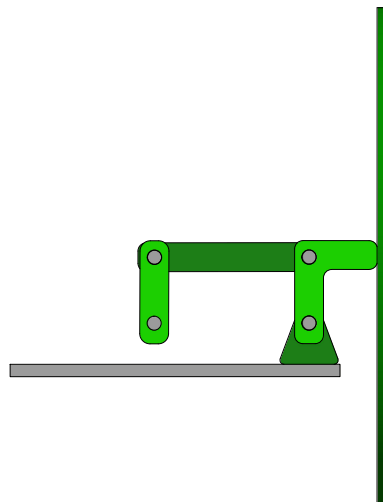


Figura 19: Prototipo 1 con posición de eslabón de salida vertical

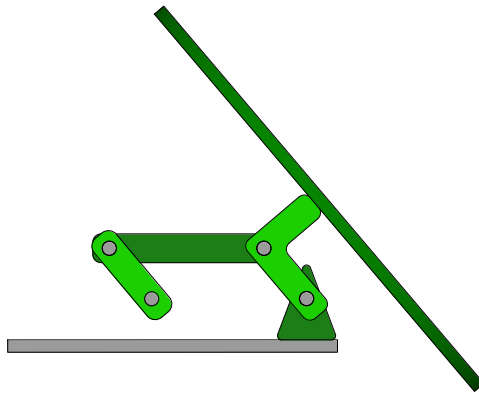


Figura 20: Prototipo 1 con posición de eslabón de salida con un ángulo

8.3. Prototipo 2

Habiendo comprobado el correcto funcionamiento del mecanismo seleccionado para la tarea requerida y evaluando posibles mejoras para sistemas posteriores, se realizó un segundo prototipo mejorando distintos factores deficientes del primero. Como primer cambio, en las uniones de los eslabones fueron utilizados cojinetes 624z (diámetro externo de 13mm e interno de 4mm) y ejes como pivotes para cada junta del mecanismo, esto con el fin de reducir la fricción entre cada unión del sistema. Además, fueron implementadas dos ruedas fijas en el sistema, a diferencia del sistema anterior, con el fin de evaluar el movimiento de dos de estos mecanismos en paralelo para que estos muevan el robot en su totalidad utilizando los actuadores seleccionados y observar si el movimiento requerido por las ruedas puede ser realizado venciendo la fricción y las fuerzas a las cuales el sistema es sometido. Se puede observar el diseño del prototipo en la Figura [21](#).

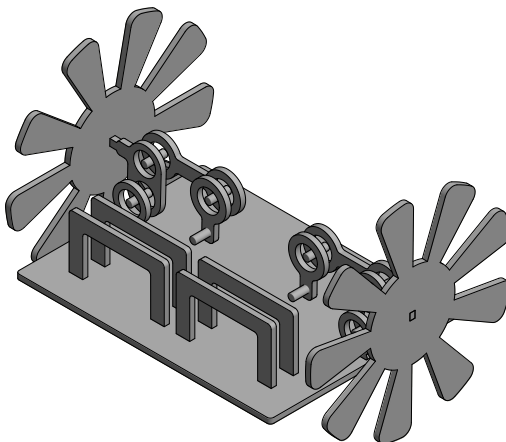


Figura 21: Diseño del Prototipo 2

Visualizando el movimiento del sistema a través de software se pudo evaluar el correcto movimiento del eslabón de salida del sistema, logrando observar en las figuras 22 y 23 que el mecanismo del segundo prototipo sigue cumpliendo con los requisitos de movimiento solicitado en ambos sistemas en paralelo. También se puede notar que debido al ángulo que se les da a las ruedas, existe un diámetro máximo en estas, dependiendo del tamaño de la base, para que el movimiento entre estas no se vea interrumpido por colisiones entre ellas.

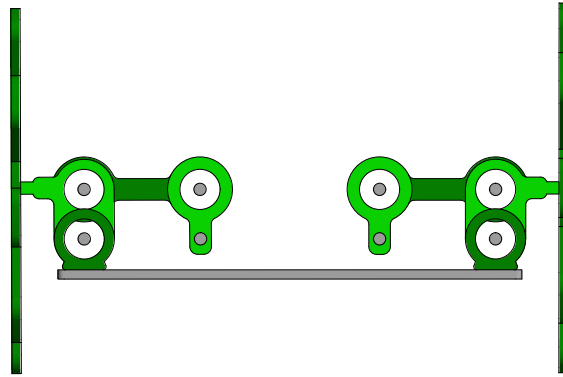


Figura 22: Prototipo 2 con posición de eslabón de salida vertical

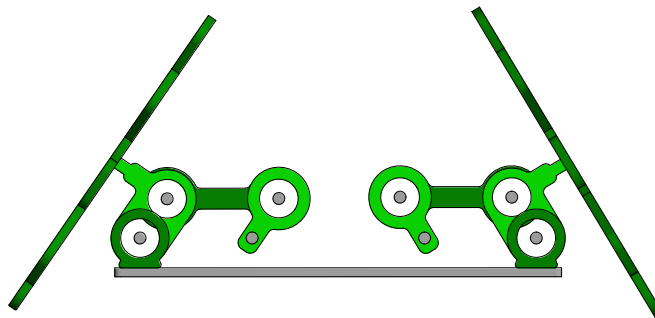


Figura 23: Prototipo 2 con posición de eslabón de salida con un ángulo

Para evaluar si el modelo realizado era capaz de realizar el movimiento requerido se implementó el segundo prototipo de manera física, utilizando los actuadores Hitec D950TW como entrada de potencia y el sistema en material MDF para su construcción. Con el prototipo construido, se puso a prueba el movimiento para evaluar si este era capaz de vencer las fuerzas de fricción y peso que actúan en él efectuándolo de manera correcta, observando el cambio de ángulo de operación en las figuras 24 y 25. Se pudo observar que el

mecanismo y los actuadores son capaces de realizar el movimiento de salida requerido por lo que, para fases posteriores, el mecanismo se considera adecuado

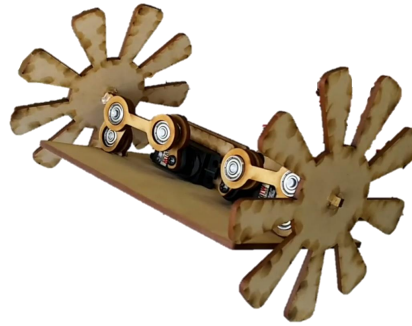


Figura 24: Prototipo 2 implementado con ruedas verticales



Figura 25: Prototipo 2 implementado con ruedas con ángulo

Algunos factores a tomar en cuenta que pudieron observarse en este prototipo es la definición correcta de la distancia entre cada unión de los eslabones, para que la colocación de los ejes y cojinetes sea la adecuada. En términos generales, el mecanismo y su movimiento funcionan de manera adecuada.

8.4. Prototipo 3

Como última parte de la fase de diseño del mecanismo para el cambio de ángulo de operación de las ruedas se realizó un prototipo capaz de trasladarse utilizando los motores Dynamixel AX-12A para dar torque a las ruedas a diferencia de los modelos anteriores, con ruedas fijas. Para la realización del diseño se utilizó los actuadores como el eslabón de salida de los mecanismos, por medio de una base que se acopla al motor, ya que al estar unidos a las ruedas estas cambiarían de ángulo al igual que los motores y estos a su vez permitirían la rotación de las ruedas.

El fin del diseño e implementación del tercer prototipo es evaluar si el movimiento del mecanismo sigue siendo el indicado y a su vez observar el comportamiento del cambio de ángulo de operación de las ruedas cuando estas se encuentran en movimiento, comprobando si el sistema es capaz de realizar el cambio con los actuadores acoplados sin verse afectado. También se evaluó cómo al tener un ángulo diferente entre las ruedas y el suelo podría

presentar ventajas en el desplazamiento del robot, observando su comportamiento al variar la posición de las ruedas. Se puede observar el tercer prototipo en la Figura 26.

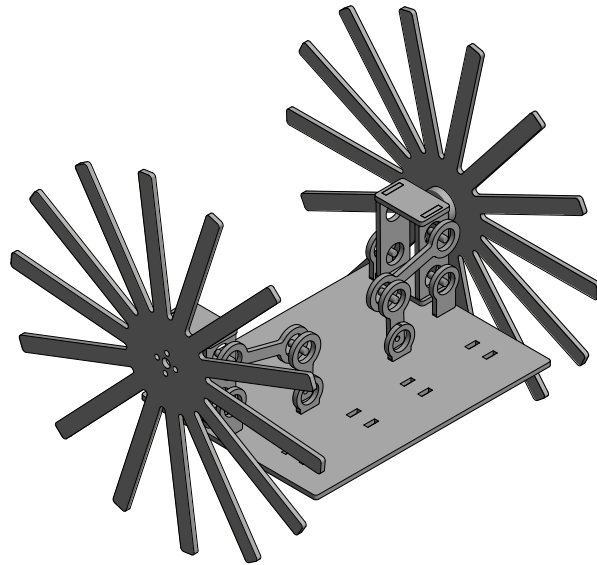


Figura 26: Diseño del Prototipo 3

Se puede observar por medio de software que el nuevo mecanismo del prototipo funciona de manera adecuada al cambiar el ángulo del eslabón de salida, lo que corresponde al actuador que permite el movimiento de las ruedas. Con lo anterior podemos seguir validando el movimiento del eslabonamiento de 4 barras. Se puede observar el sistema en con el eslabón de salida en distintos ángulos de operación en las figuras 27 y 28. Para la trasmisión de potencia de los motores hacia las ruedas del sistema fue necesario el diseño de una unión que se acoplada a los actuadores que permitiera unirse a las ruedas de manera adecuada, por lo que realizo el modelo encontrado en la Figura 29.

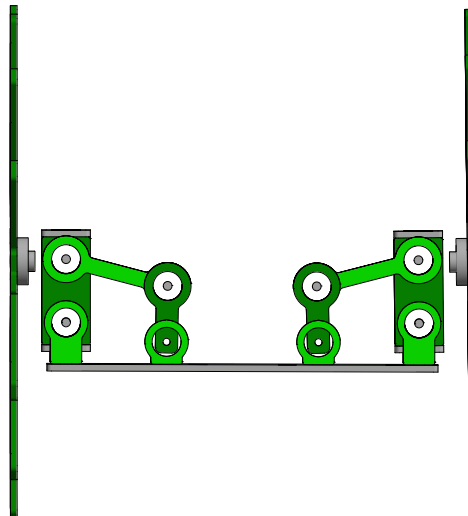


Figura 27: Prototipo 3 con posición de eslabón de salida vertical

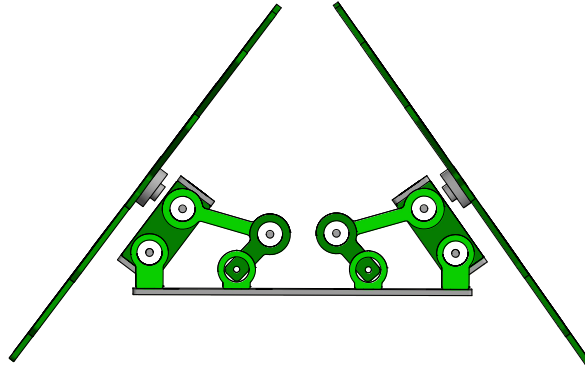


Figura 28: Prototipo 3 con posición de eslabón de salida con un ángulo

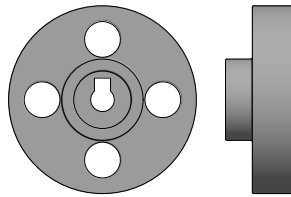


Figura 29: Unión entre el motor y las ruedas para transmisión de potencia

Las pruebas realizadas al tercer prototipo fueron verificar si al incluir más peso en el modelo este era capaz de seguir realizando el movimiento de las ruedas requerido y si este podía efectuarse de manera correcta al incluir los actuadores como eslabón de salida del mecanismo, lo que se puede confirmar observando las figuras [30](#) y [31](#) al realizar el cambio de ángulo de operación de las ruedas. Una complicación que presento el modelo es la estabilidad que este tiene debido al centro de masa que no se encuentra en una posición central. Esto se solucionó al agregar una base de apoyo más al prototipo con una varilla, dando un soporte más amplio y evitando que la base girara con el movimiento de los actuadores.

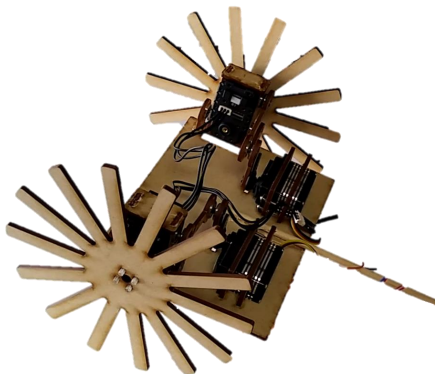


Figura 30: Prototipo 3 implementado con ruedas verticales

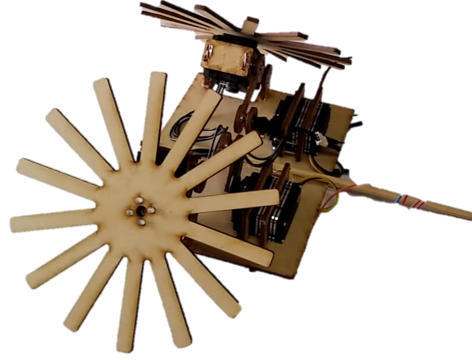


Figura 31: Prototipo 3 implementado con ruedas con ángulo

Además, se realizaron pruebas en el desplazamiento del modelo, evaluando el movimiento de la plataforma variando el ángulo de operación de las ruedas. Para hacer esto se utilizó un controlador Arduino Leonardo para la programación de los actuadores.

8.4.1. Prueba de desplazamiento por una pendiente

Se realizó una prueba para observar las diferencias entre el comportamiento del desplazamiento del prototipo en una pendiente de 25 grados respecto a la horizontal al variar la posición del eslabón de salida. En la realización de esta fase experimental se colocó en los extremos de las ruedas esferas de poliestireno y tela sobre el plano inclinado para aumentar la fricción con la superficie de la cuesta con el fin de simular áreas más rugosas en las cuales el robot todoterreno se desplazará. En todo el proceso se utilizaron las mismas superficies de contacto y se mantuvo la velocidad de los motores constante, variando únicamente el ángulo de operación de las ruedas.

Desplazamiento por una pendiente con ruedas verticales

Para evaluar el desplazamiento del prototipo con las ruedas en posición vertical se procedió a hacer que la plataforma subiera por la pendiente. Al momento que el sistema intenta subir por la cuesta las ruedas se deslizaron provocando que el prototipo no pudiera realizar el movimiento requerido, observándose los resultados en las figuras [32](#) y [33](#).



Figura 32: Prototipo 3 subiendo una pendiente con las ruedas en posición vertical

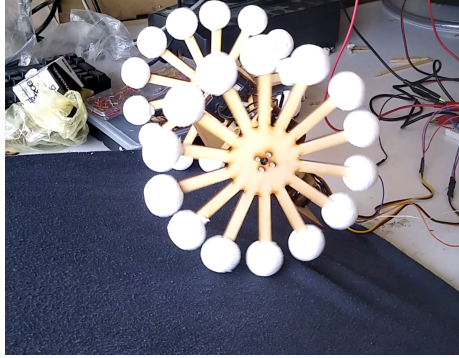


Figura 33: Prototipo 3 deslizándose por la pendiente con las ruedas en posición vertical al no poder subir

Desplazamiento por una pendiente con ruedas en un ángulo

Para comparar el comportamiento observado al subir una pendiente con las ruedas verticales se cambió la configuración del prototipo variando el ángulo de operación de los actuadores, acercando la base a la superficie. Se pudo observar que el desplazamiento sobre la superficie se realizaba sin deslizamiento de las ruedas, logrando que el sistema pudiera subir hasta el final de la pendiente sin problemas. Se pueden observar los resultados en las figuras [34](#) y [35](#).

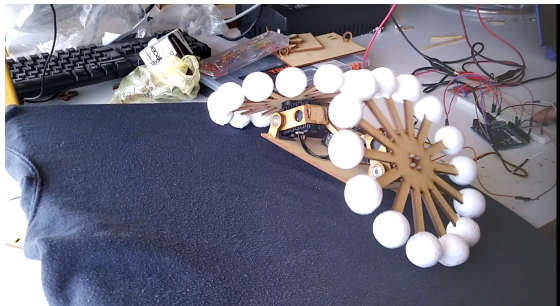


Figura 34: Prototipo 3 subiendo una pendiente con las ruedas en un ángulo

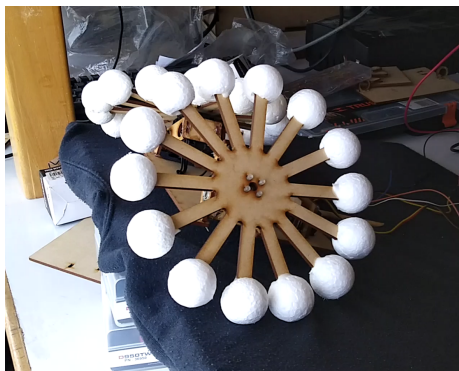


Figura 35: Prototipo 3 en la cima de la pendiente con las ruedas en un ángulo

Al encontrarse las ruedas de forma vertical el prototipo no fue capaz de subir por la pendiente debido a que este se deslizo y cambio su dirección sin poder realizar el desplazamiento requerido. Al contrario, cuando se cambió la configuración de las ruedas para que estas tuviesen un ángulo el prototipo fue capaz de subir por la cuesta demostrando que este cambio beneficia en el movimiento del robot cuando este se encuentra con alguna pendiente.

Desplazamiento por obstáculos

Para evaluar el desplazamiento del prototipo ante terrenos con obstáculos se realizaron pruebas donde el modelo se desplazó sobre plataformas elevadas respecto a su posición. La velocidad de los actuadores se mantuvo constante durante todo el trayecto y se observó el movimiento generado durante la trayectoria.

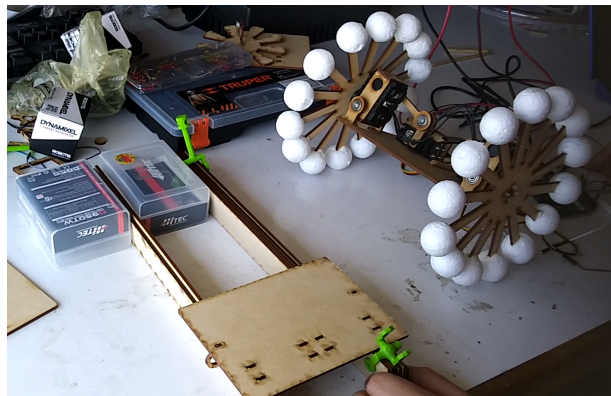


Figura 36: Prototipo 3 prueba de obstáculos



Figura 37: Prototipo 3 desplazándose sobre obstáculos

Al evaluar la traslación de la plataforma se pudo observar que esta logra superar de manera adecuada los obstáculos. Sin embargo, la trayectoria se vio afectada ya que no se mantuvo una línea recta, variando de manera poco significativa su orientación. Al realizar esta prueba se comprueba la efectividad del sistema ante obstáculos.

8.5. Método de transmisión de potencia

Debido a que las ruedas del sistema no se encuentran fijas y estas pueden cambiar su ángulo de operación se decidió evaluar formas alternativas para la transmisión de potencia de los motores hacia estas. Debido a esto se buscó un modelo de una junta homocinética con la cual se pudiera realizar la transmisión a través de dos ejes en distinta posición. Por simpleza se decidió evaluar el funcionamiento de una junta Glaencer-Spicer para movilizar las ruedas. Se utilizó un modelo de junta [8](#) encontrado en la Figura [38](#) y se realizó su manufactura en impresión 3D.

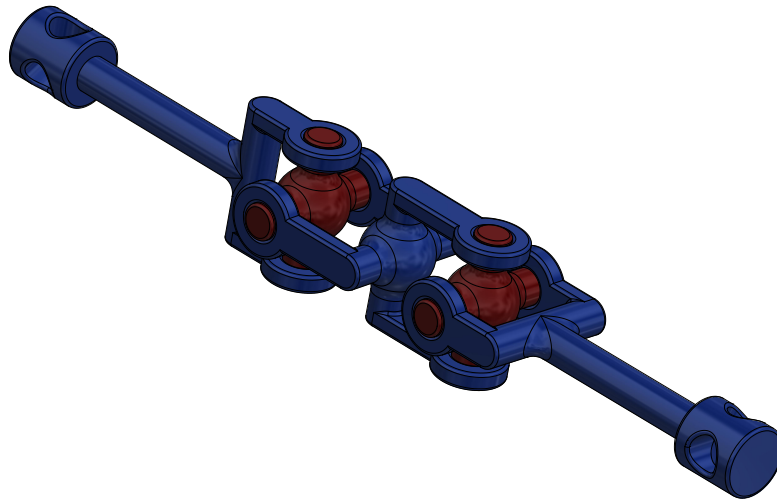


Figura 38: Modelo de junta homocinética

Al finalizar el proceso de manufactura se obtuvieron las piezas observadas en la Figura [39](#) para la construcción del prototipo. Sin embargo, por problemas al momento de la fabricación de las piezas estas no eran las adecuadas para cumplir su función.

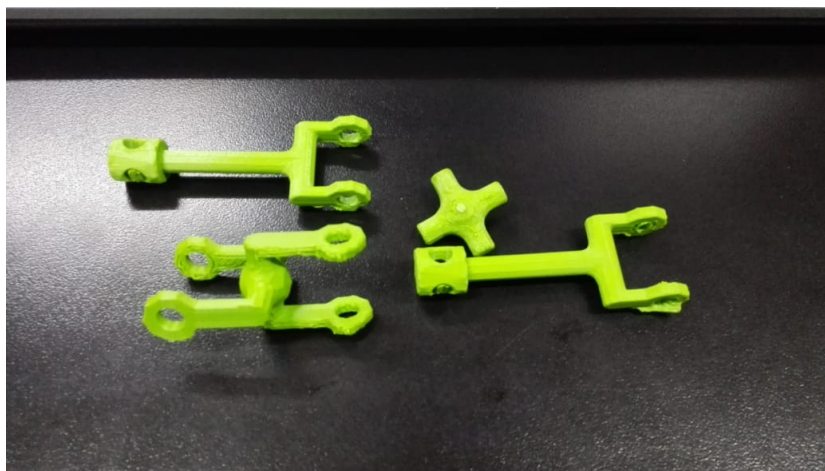


Figura 39: Prototipo junta homocinética

Durante la manufactura de las piezas para el prototipo se presentaron diferentes dificultades por el método de fabricación y la geometría de las piezas, obteniendo resultados no satisfactorios para el ensamble del prototipo. Se puede observar en las figuras 40 y 41 que las partes obtenidas de la impresión 3D presentan deformaciones lo que no permite su ensamblaje.



Figura 40: Dificultades en la manufactura de piezas para la junta



Figura 41: Fallo en la manufactura de piezas para la junta

Debido a estos factores y problemas de manufactura generados por la geometría compleja de las piezas se decide no implementar este sistema de juntas para la transmisión de potencia hacia las ruedas. En su lugar, se seguirá utilizando como eslabón de salida los actuadores logrando así la movilización de las ruedas.

8.6. Ángulo de las ruedas

Observando el ángulo máximo con el cual se puede obtener utilizando el prototipo propuesto, se puede conseguir una inclinación aproximada de 53 grados respecto a la horizontal. Esto depende del diámetro de las ruedas utilizadas en el sistema.

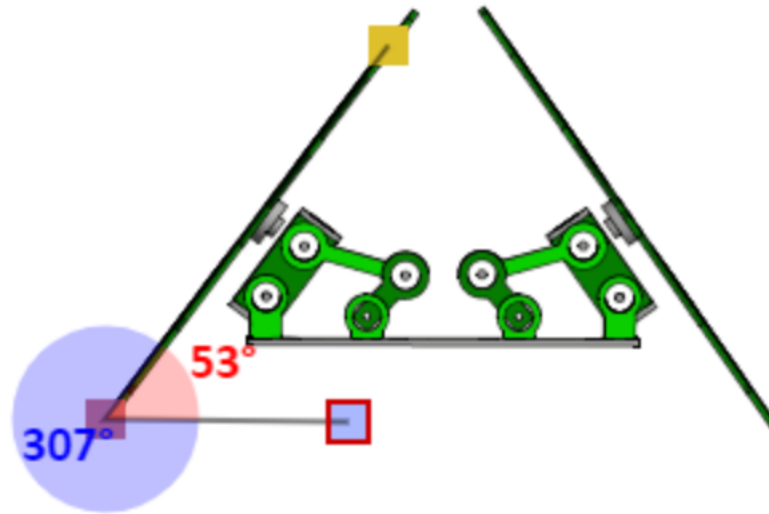


Figura 42: Ángulo aproximado de las ruedas

8.7. Análisis de resultados del mecanismo planteado

Realizando un análisis de las pruebas hechas a lo largo de esta fase del proyecto se puede observar que el mecanismo seleccionado de entre los que fueron evaluados cumple con el requerimiento de movimiento. Al evaluar las diferentes formas de transmisión de potencia a través de juntas y tomar en cuentas las limitantes de manufactura se descarta la opción del uso de juntas homocinéticas como medio para movilizar las ruedas del sistema. Observando el sistema diseñado en el tercer prototipo y los resultados de las pruebas realizadas en este se puede concluir que el modelo planteado para el cambio de ángulo de operación es el adecuado para la tarea requerida logrando cumplir el objetivo planteado.

Cable de alimentación y comunicación

9.1. Elección de forma de comunicación y alimentación

Para que la plataforma robótica funcione de manera adecuada se necesita una forma de alimentación y comunicación con el operador para que este pueda controlar y recibir información del sistema. Debido a esto, se buscó la mejor forma de realizar esta conexión, tomando en cuenta distintos factores que podrían afectar la efectividad de estas.

Ya que las condiciones del terreno y el ambiente al que se podría someter el robot todoterreno, la conexión inalámbrica con este no sería ideal, ya que podría verse afectada por agentes externos, como ruido e interferencia provocado por emisores de frecuencias o altas temperaturas, afectando su efectividad. Considerando lo antes mencionado, la conexión alámbrica entre el operario y la plataforma es considerada la mejor opción ya que con esta se pueden evitar distintos factores que afectan la comunicación. Además, debido a la distancia entre la plataforma robótica y el operador, es necesario la utilización de un protocolo y cable de conexión los cuales permitan realizar un envío y recepción de datos de manera adecuada, sin tener pérdidas o distorsión de la información.

Por otra parte, la alimentación de los sistemas para la operación del robot es otro factor importante que considerar, ya que es necesario para que estos funcionen de manera adecuada. Debido a esto, es necesario la correcta selección de la forma en que se van a alimentar tanto actuadores, sensores como controladores. Ya que la distancia requerida para la operación del sistema es muy larga y la corriente demandada por los actuadores a utilizar es alta, siendo de los motores AX-12a de 900mA [9] y los servos Hitec de 500mA [10] por actuador, la alimentación por medio de una fuente DC no podría realizarse, ya que la caída de voltaje que se presenta debido a la distancia del cable y las altas corrientes del sistema podrían afectar la energización del sistema al no obtener los voltajes requeridos o al necesitar un calibre de cable muy grande. También podría considerarse la utilización de baterías como

fuelle para el sistema, evitando así el requerimiento de una alimentación alámbrica. Sin embargo, debido a la corriente de los motores y el posible tiempo de operación del robot, el tamaño y peso de la batería que se utilizaría resultaría elevado, afectando a los sistemas de movimiento requiriendo más potencia de estos. Por lo anterior mencionado, la alimentación por medio de una corriente AC para la posterior regulación y conversión a una corriente y voltaje regulados se considera la mejor opción.

9.2. Selección de protocolo y cable de comunicación

Para realizar la comunicación entre el operario y la plataforma robótica, debido a las largas distancias de operación, es necesario la utilización de un protocolo especializado en la comunicación donde el receptor y el emisor se encuentran muy separados, ya que una comunicación más sencilla podría producir pérdidas de información. Además, este mismo protocolo no debe de ser susceptible a las interferencias que puedan generarse en el ambiente en el cual se va a encontrar, ya que existe la posibilidad de que existan distintos factores externos que afecten la comunicación. Tomando en cuenta estas consideraciones, se buscó un protocolo de comunicación en conjunto con el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate con las características descritas, tomando la decisión de la utilización del protocolo RS-485 el cual utiliza una conexión DB9.

9.2.1. Protocolo de comunicación RS-485

Este es un protocolo de comunicación que permite la interconexión de hasta de 32 dispositivos conectados para el envío de datos entre estos. La principal característica de este protocolo es que permite la transmisión y recepción de datos a alta velocidad a través de distancias muy grandes, pudiendo realizar una comunicación efectiva hasta 1200 metros con una velocidad de 100kbits/s como máximo [11], variando estos valores dependiendo de la longitud del cable y condiciones del ambiente.

El protocolo de comunicación consiste en la recepción de datos por medio de un voltaje diferencial y una señal de alta impedancia, por medio de un par trenzado como medio de transmisión utilizando dos puertos TX y dos RX, lo que permite un envío de datos a una mayor distancia y una tolerancia mayor al ruido del ambiente, así como a cambios de temperatura y factores que puedan afectar la comunicación. Además, se posee una estructura de comunicación entre esclavos y maestros para la comunicación entre dispositivos, lo que permite una mejor organización de los dispositivos utilizados en la comunicación.

La señal recibida por voltaje diferencial consiste en la lectura de dos señales que representan la información, un voltaje negativo y otro positivo. Para la interpretación de los datos se realiza el envío de una señal de inicio, después se realiza la diferencia de las dos señales obteniendo de esta los valores representativos para los valores lógicos de 1, al obtenerse un valor de voltaje positivo, y 0, al obtenerse un voltaje negativo, enviando en total 8 bits de información, por último, se envía una señal de stop [11]. Ya que, al realizarse la transmisión de datos en un par trenzado, el ingreso de ruido a la señal enviada no representa un problema

ya que al interpretar la información como la diferencia de dos señales la distorsión en los datos es eliminada.

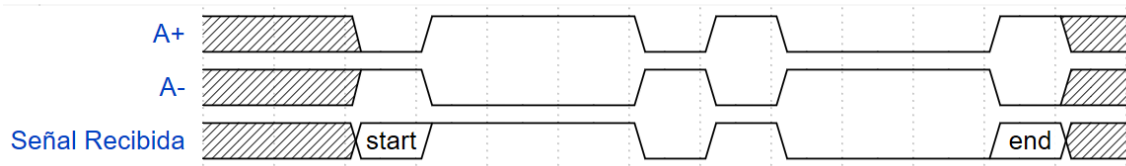


Figura 43: Ejemplo de la forma de las señales enviadas por el protocolo RS-485 y lectura de datos

Para que la comunicación a través del protocolo seleccionado se pueda llevar a cabo, el medio en el que se va a realizar la transmisión de datos debe ser definido. Para el caso de la comunicación RS-485, es utilizada de forma estándar el cable DB9 debido a las conexiones necesarias para la realización de la comunicación y por la configuración del cable, el cual utiliza pares trenzados que ayudan a evitar ruido en el envío de señales. Las conexiones utilizadas en el cable son las observadas en el Cuadro 1. Ya que este cable es el que suele utilizarse en esta comunicación, se decidió la utilización de este como medio de transmisión y recepción de datos entre el maestro, controlado por el operador, y la plataforma robótica móvil, funcionando como esclavo utilizando una Raspberry pi 3b.

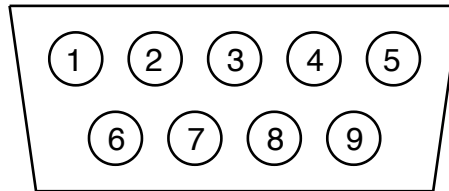


Figura 44: Distribución de los pines del cable DB9

Pin	Conexión
1	TX+
2	TX-
3	RX+
4	RX-
5	GND
6	N/C
7	N/C
8	N/C
9	N/C

Cuadro 1: Conexiones del protocolo RS-485 en cable DB9

9.3. Método de alimentación

Debido a los requerimientos de corriente y voltaje requeridos por los componentes y actuadores utilizados para la operación del robot para búsqueda y rescate se decidió la

utilización de la alimentación de la plataforma a través de una fuente AC para su próxima regulación. A causa de la distancia de trabajo a la cual se encontrará el robot la alimentación por medio de una fuente DC no es posible debido a las pérdidas producidas por la longitud del cable y las limitaciones de corriente que se tienen debido al calibre que se debiera utilizar.

Para la energización de cada uno de los componentes del robot se utilizará una fuente de alimentación fija conectada a la corriente AC para obtener un voltaje DC de 12V constante. Ya que los distintos módulos electrónicos que se utilizaran en el sistema trabajan con distintos voltajes es necesario la regulación del voltaje utilizando módulos de conversión para controlar su alimentación. Esto se realizará utilizando convertidores de voltaje DC-DC con los cuales se pueda modificar los valores a los necesarios para la operación de los actuadores, sensores y controladores.

9.3.1. Selección de cable de alimentación

Debido a que la distancia de funcionamiento del robot para operaciones de búsqueda y rescate es elevada y las corrientes necesarias para la alimentación de todos los actuadores, controladores y sensores es de aproximadamente 6A utilizando voltaje DC, la selección del calibre correcto para el cable de suministro de energía debe elegirse de manera correcta, ya que de lo contrario se podría presentar sobrecalentamiento del mismo y no suministrar la potencia de operación necesaria para el funcionamiento de la plataforma. Para este tipo de conexiones donde se tiene que utilizar una longitud de cable elevada es utilizado distintos calibres de cable basándose en distintos calibres con estándar AWG. En el caso de este proyecto se utilizará un cable 12 o 14 AWG, observando sus características en el Cuadro 2, para potenciar la plataforma robótica debido a su calibre y la capacidad del aislante ante cambios de temperatura. Por motivos de disponibilidad se utilizará un cable 14 AWG.

AWG	Diámetro (mm)	Sección transversal (mm ²)	Resistencia (Ohms/Km)	Corriente Máxima (A)
12	2.053	3.31	5.13	9.5
14	1.628	2.08	8.17	6

Cuadro 2: Características de los cables AWG [12]

9.4. Pruebas realizadas para la comunicación y alimentación

Para realizar las pruebas del cable seleccionado se trabajó en conjunto con el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate utilizando la conexión y programación del protocolo RS-485 y los circuitos de potencia para alimentar los componentes del sistema realizados en este. Durante las pruebas fue utilizado una conexión DB9 de 12 metros de longitud como medio para la comunicación entre el operario y la plataforma, así como un cable 14 AWG del mismo largo para energizar el sistema.

Utilizando el circuito que se encuentra en la Figura 45 se hizo la conexión a través del cable db9 para la realizar de la comunicación utilizando el protocolo RS-485. A su vez, se realizó utilizando el cable 14 AWG la conexión para energizar la fuente del sistema y, utilizando los circuitos de las figuras 46 y 47, se alimentaron cada uno de los componentes de la plataforma robótica.

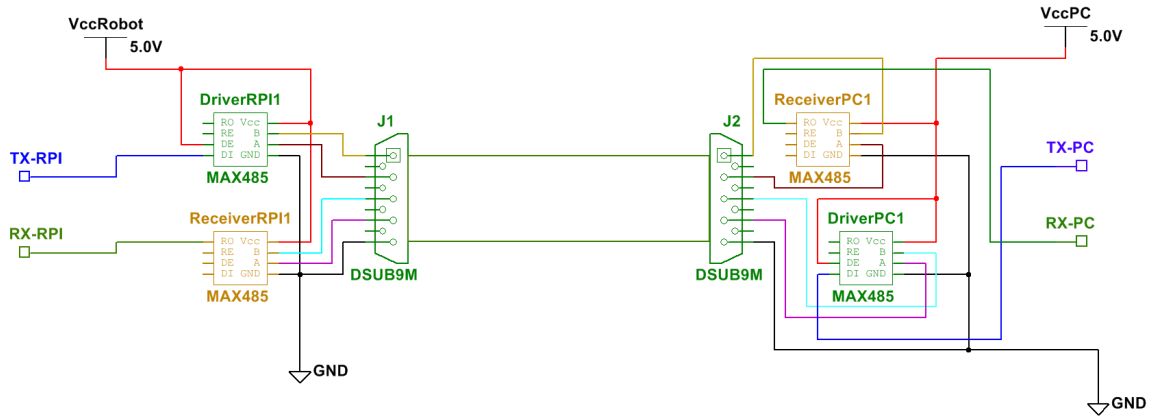


Figura 45: Conexión realizada para lo comunicación RS-485

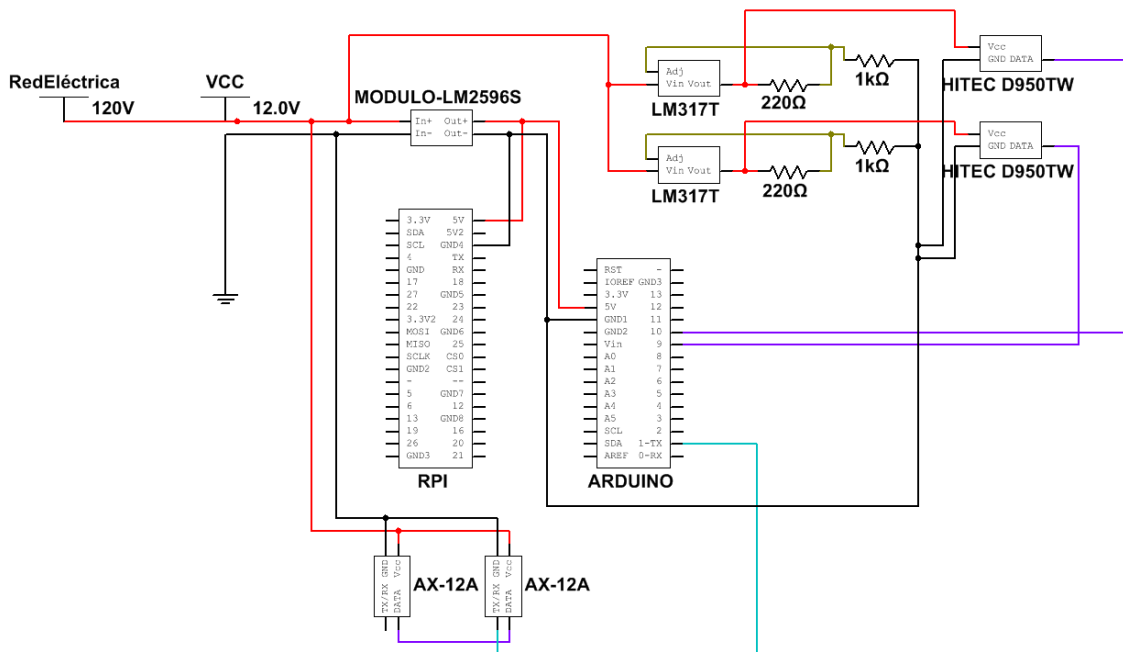


Figura 46: Conexión realizada para la alimentación de los actuadores

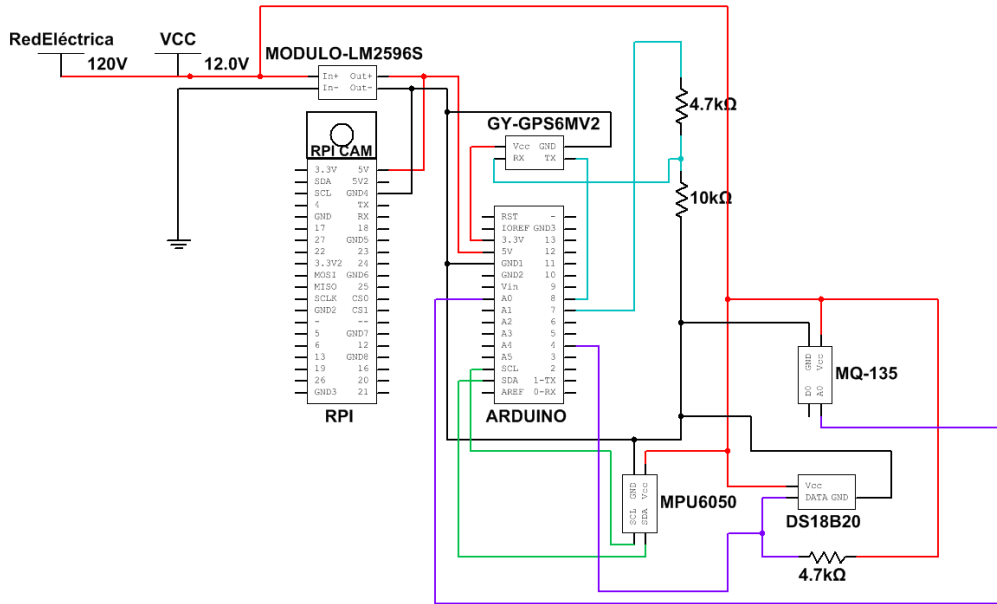


Figura 47: Conexión realizada para la alimentación de los sensores

Contando con el sistema conectado a través de los dos tipos de cable seleccionados, se energizo el sistema y se obtuvo información de los sensores encontrados en la plataforma robótica para que el operario pudiera observar las condiciones del ambiente en la ubicación del robot. Además, se enviaron comandos para observar si estos eran correctamente recibidos y ejecutados según las instrucciones indicadas por la plataforma. Se puede observar en la Figura 48, utilizando la interfaz gráfica diseñada y realizada en el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate, que la comunicación y alimentación de las partes del sistema son correctas, al tener una recepción de datos de forma correcta ya que la información obtenida por los sensores corresponde a la esperada. Además, fueron realizadas pruebas de comunicación, observadas en la Figura 49, las cuales se completaron de forma exitosa.

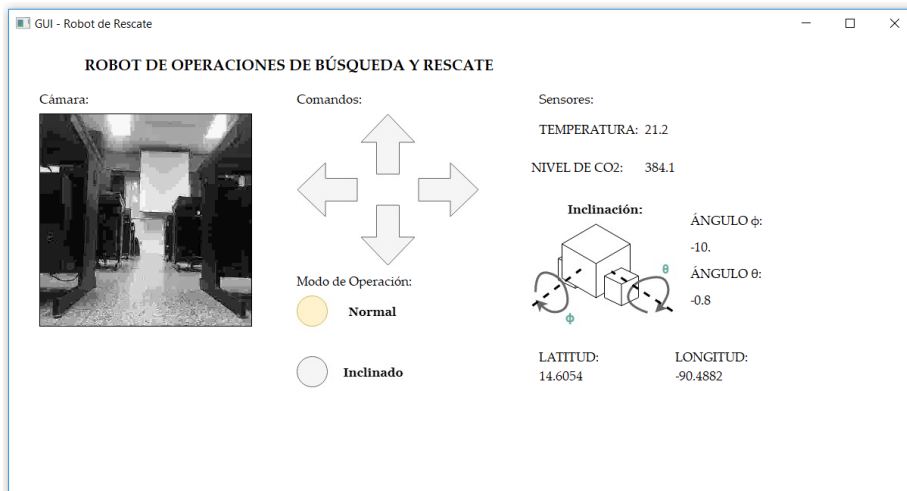


Figura 48: Datos obtenidos en la interfaz gráfica de los sensores utilizando la comunicación RS-485

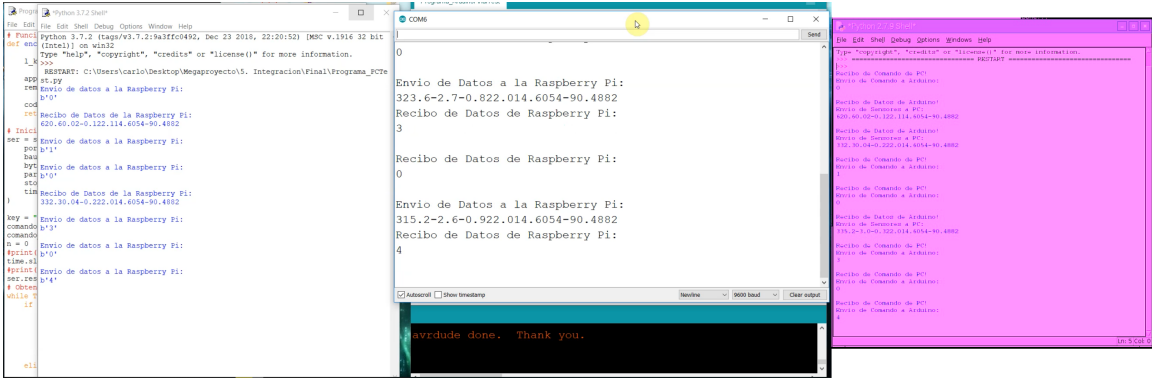


Figura 49: Pruebas de comunicación realizadas

9.5. Análisis del funcionamiento del cable de alimentación y comunicación

Al evaluar el funcionamiento del protocolo de comunicación, así como la recepción correcta de datos al comprobar los valores obtenidos en la información de los sensores y el envío de instrucciones a la plataforma robot para operaciones de búsqueda y rescate al utilizar un cable DB9 de 12 metros de longitud, se puede decir que la selección del cable es la correcta, ya que se obtienen los resultados deseados. Además, al haber alimentado los sensores, controladores, actuadores y módulos para la comunicación, y obtener un funcionamiento adecuado por parte de estos, se puede decir que la selección del cable 14 AWG es la correcta, ya que se logra llevar la potencia requerida por el sistema por distancias largas, cumpliendo el otro requerimiento del objetivo.

10.1. Selección inicial de tipos de materiales

En los distintos ambientes que el robot para operaciones de búsqueda y rescate puede encontrarse este se enfrentará a distintos factores que pueden afectar el funcionamiento correcto de sus componentes, llegando a comprometer las funcionalidades de los sistemas. Factores como la temperatura pueden afectar controladores y sensores lo que podría afectar la integridad de la plataforma robot. Debido a esto se debe seleccionar los materiales de construcción adecuados para el aislamiento de la parte electrónica y mecanismos internos.

Observando otras plataformas robot todoterreno como los mencionados en los antecedentes u otros trabajos de investigación y prototipos similares [13], se puede observar que la combinación de distintos materiales para el diseño del chasis del robot es lo ideal, ya que puede ahorrar costos de manufactura al utilizar materia de menor costo, en lugar de materiales especializados de mayor costo. Debido a esto, y según otras investigaciones, se tomó la decisión de elaborar el chasis del sistema como una combinación de un polímero y un metal actuando como aislante y como material para evitar golpes respectivamente.

10.2. Polímeros

Los polímeros son caracterizados por su bajo peso y su facilidad para la manufactura de pieza utilizando estos para su elaboración. Debido a estas razones, su fácil acceso y disponibilidad, se tomó la decisión de utilizar este tipo de material para realizar el aislamiento de las partes internas del sistema.

Como principal característica para la selección de los polímeros a evaluar para la realización del chasis del sistema se debe comprobar su comportamiento ante cambios de temperatura, ya que estos deben poder soportar y aislar los componentes del robot para que el funcionamiento de estos no se vea afectado. Además, este material debe poder soportar en cierto grado deformaciones de golpes que pueda sufrir la plataforma. Para esto se deben evaluar algunas características mecánicas y térmicas del sistema para evaluar si estos son capaces de efectuar la tarea requerida por el objetivo. Observando estas características se realizó una búsqueda de materiales los cuales cumplieran con los requerimientos de aislamiento, llegando a evaluar el posible uso de algunos de ellos, como lo son el aerogel, el ABS o el polimetacrilato.

10.2.1. Aerogel

El aerogel es un material de ingeniería relativamente nuevo que se caracteriza por sus propiedades muy parecidas a distintos materiales de otras familias, llegando a presentar una resistencia a la temperatura muy alta y una conductividad térmica baja, además de una resistencia elevada y un peso reducido comparado con otros materiales [14]. Se puede observar en la Figura 50 un ejemplo del aislamiento que puede proporcionar este material ante temperaturas elevadas. Se pueden observar las características mecánicas y térmicas que posee el aerogel en el Cuadro 3.

Características	Valor típico
Densidad (g/cm^3)	0.1
Porosidad (%)	80
Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	1.02
Módulo de elasticidad (MPa)	1

Cuadro 3: Características del material aerogel [14]

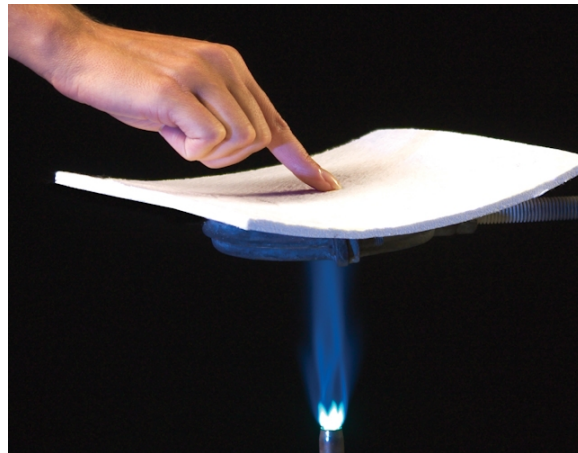


Figura 50: Ejemplo del aerogel [15]

Al observar las propiedades mecánicas del material y los posibles usos que se le puede dar, este resulta ideal para los requisitos necesarios para la construcción del sistema. Sin embargo, a pesar de resultar un material ideal para el proyecto, el precio de este resulta muy elevado para esta fase del proyecto además de que no existe disponibilidad de este en Guatemala, lo que provoca que se descarte este material. A pesar de lo anterior, se menciona este material para posibles fases futuras de proyecto donde pueda considerarse el uso de este polímero.

10.2.2. ABS

El polímero ABS es un material que se caracteriza por su alta resistencia y buenas propiedades mecánicas, logrando resistir muy bien antes distintos esfuerzos. Además, este material soporta temperaturas de hasta 97 grados centígrados antes de presentar deformaciones [16]. La manufactura de piezas utilizando este material puede realizarse mediante la impresión 3D pudiendo fabricar partes de manera sencilla. Se puede observar este material en la Figura 51 y sus características en el Cuadro 4.

Característica	Valor típico
Densidad (g/cm ³)	1.53
Temperatura de ablandamiento (°C)	80
Conductividad térmica (W/m*K)	0.1
Modulo de elasticidad (GPa)	2.3

Cuadro 4: Características del material ABS [17]

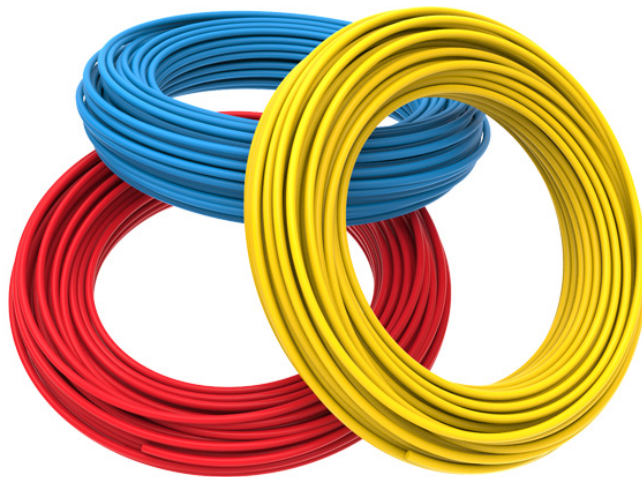


Figura 51: Ejemplo del ABS [18]

Al observar las propiedades del material ABS este cumple con las características necesarias para la fabricación del modelo para el robot de operación de búsqueda y rescate, ya que este material soporta temperatura en donde posiblemente tendrá que operar la plataforma y también soporta muy bien los esfuerzos. Sin embargo, debido a las geometrías y dimensiones de las piezas a utilizar, la impresión 3D podría verse limitada y no lograr obtener las partes requeridas. Este material debido a su método de manufactura podría considerarse para la realización de piezas pequeñas y de geometrías simples para el modelo.

10.2.3. Polimetacrilato

El polimetacrilato, conocido también por el nombre de acrílico, es un polímero transparente caracterizado por su alto índice de refracción de luz. Este material también presenta alta resistencia ante golpe y factores que se encuentran en la intemperie. El material también se caracteriza por ser muy ligero y presentar baja conductividad térmica, lo que impide la propagación de la temperatura [19]. Las piezas fabricadas en este material pueden ser manufacturadas por medio de corte láser si se sigue una geometría 2D en su diseño, lo que permite obtener las partes del sistema de una forma más rápida.

Característica	Valor típico
Densidad (g/cm ³)	1.19
Temperatura de ablandamiento (°C)	95
Conductividad térmica (W/m*K)	0.17
Modulo de elasticidad (GPa)	2.4

Cuadro 5: Características del material Polimetacrilato [20]

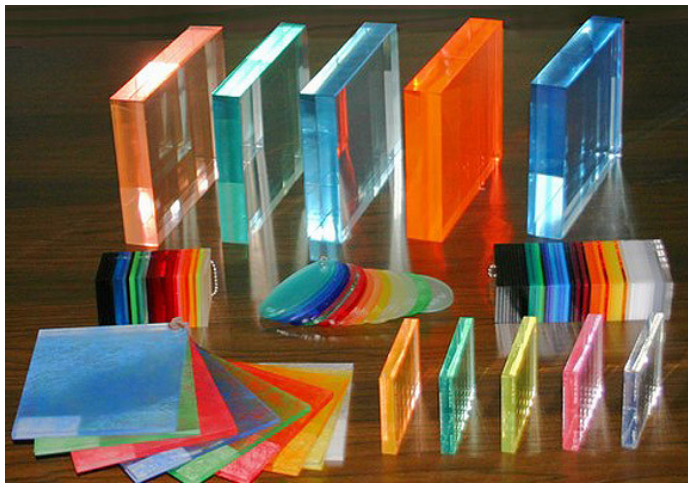


Figura 52: Ejemplo del Polimetacrilato [21]

Tomando en cuenta las propiedades del acrílico ante ciertos entornos, se considera adecuado para ser utilizado en el diseño del chasis del prototipo robot, ya que cumple con los requisitos de diseño. Además, las piezas realizadas con este material pueden ser fabricadas a través de corte láser, lo que agiliza el ensamble y pruebas del prototipo. Debido a estos factores se decidió utilizar el acrílico como material para el diseño del chasis de la plataforma todoterreno.

10.3. Metales

Los metales se caracterizan por su alta resistencia ante deformaciones y ser capaces de resistir factores del ambiente que podrían comprometer otros materiales. También se caracterizan por presentar resistencia ante golpes, lo que sirve como protección de los sistemas internos. Debido a las características que poseen estos tipos de materiales se decidió realizar el diseño de la parte externa del chasis con estos. Además, sistemas que realizan sistemas similares utilizan distintos materiales para el diseño de sus prototipos.

Como principal requisito a cumplir por el material a seleccionar es que este debe soportar golpes que el sistema puede sufrir durante su operación sin aumentar sustancialmente el peso del modelo. Debido a estas razones se tomó la decisión de la utilización de aluminio para el diseño del chasis.

10.3.1. Aluminio

El aluminio es utilizado ampliamente en distintos campos ya sea de estudio, construcción e inclusive en alimentos debido a las distintas propiedades y características que este cumple. Este material presenta alta resistencia ante golpes y ralladuras, haciéndolo ideal para su funcionamiento en entornos que puedan dañar otros componentes. Además, este metal resulta fácil de maquinar para la fabricación de piezas, ya que es blando en comparación con otros. Otro factor a tomar en cuenta del aluminio es el bajo peso que este posee.



Figura 53: Ejemplo del aluminio [22]

Característica	Valor típico
Densidad (g/cm ³)	2.7
Resistencia a la tracción (MPa)	125
Conductividad térmica (W/m*K)	209

Cuadro 6: Características del material aluminio 23

Observando las características del aluminio y su amplio uso en otras áreas similares a este trabajo de investigación, se decide utilizar este material para la realización del diseño del prototipo para el robot de operaciones de búsqueda y rescate.

10.4. Selección de materiales para el diseño

Habiendo realizado el análisis e investigación sobre distintos tipos de materiales para el diseño del prototipo, se decidió la utilización de dos materiales en conjunto para realizar el modelo del chasis. Se utilizará aluminio como medio para proteger el sistema robótico de golpes o daños que puedan ocurrir por el terreno. Por otra parte, el acrílico será utilizado como el medio aislante del sistema ante factores como temperatura o polvo y actuará como la base principal de todo el robot.

10.5. Prueba realizadas a los materiales en conjunto

Para comprobar el funcionamiento de los materiales seleccionados en conjunto ante los cambios de temperatura se realizó un análisis térmico transitorio en ANSYS para evaluar la temperatura de un punto de referencia interno. Para realizar este estudio se utilizó un cuadro de aluminio y uno de acrílico en contacto y se realizó un análisis del cambio de temperatura por conducción hasta que la temperatura llegase a un equilibrio. Los cambios progresivos de temperatura interna del sistema pueden apreciarse en la Figura 54, siendo la placa más baja aluminio, la media acrílico y por último el material de referencia donde se mide la temperatura.

El fin de esta experimentación es poder observar el comportamiento de la temperatura interna del sistema a lo largo del tiempo y poder observar como esta se propaga por todo el robot. Se puede observar en la Figura 55 como cambia la temperatura a lo largo del tiempo, llegando a estabilizarse en un periodo de aproximadamente 400 segundos. Observando los resultados de grafica obtenida se puede notar que existe un retraso significativo de la propagación de la temperatura, logrando así obtener un aislamiento por parte de los materiales.

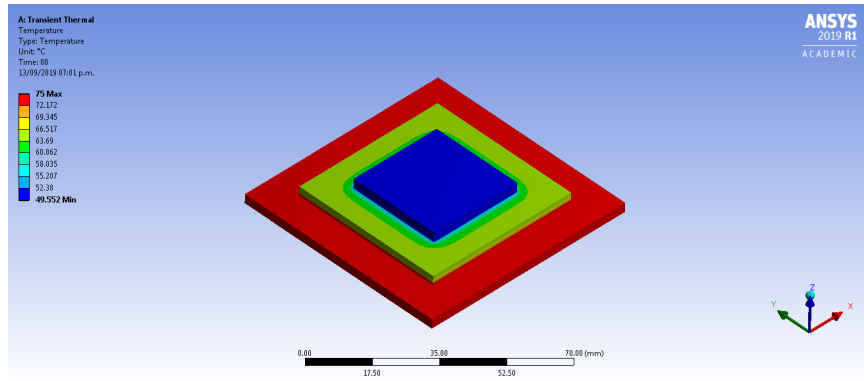


Figura 54: Pruebas térmicas realizadas a los materiales en contacto

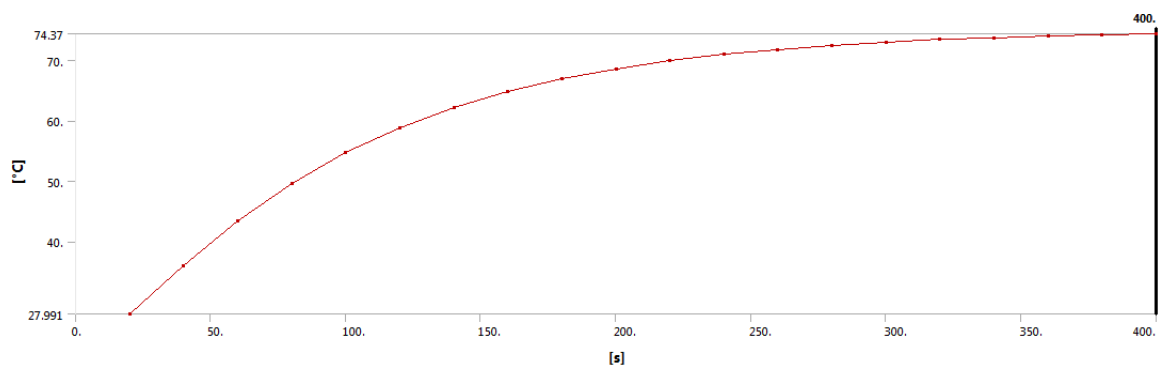


Figura 55: Cambio de la temperatura de los materiales durante las pruebas térmicas realizadas

10.6. Análisis del comportamiento de los materiales seleccionados

Evaluando los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y las características de cada uno de los materiales seleccionados podemos decir que estos se comportan de manera adecuada ante los requerimientos del sistema. Al evaluar el cambio de temperatura interna del sistema se puede observar el retraso que existe en la programación de esta a lo largo del sistema, cumpliendo con el objetivo planteado al aislar los componentes de este.

11.1. Requerimientos del chasis

Para que el diseño del chasis sea considerado como funcional, este debe tener la capacidad de contener todas las partes necesarias para la operación del sistema. Se debe contener dentro de este los actuadores, controladores, sensores y fases de potencia para que el robot para operaciones de búsqueda y rescate pueda funcionar de manera adecuada y realizar lo que sea solicitado por el operador. Debido a esto fue necesario buscar una forma adecuada para realizar un modelo que pudiese cumplir con los requisitos necesario y que este se adecue a las formas de manufactura disponibles para su fabricación.

11.2. Ideación del modelo inicial

Para la fase inicial de modelado del chasis para el sistema fue necesario considerar limitantes que pudieran afectar en el diseño. Debido a esto se tuvo que considerar factores como el tamaño de los actuadores y controladores ya que esto delimita el tamaño mínimo con el cual se iniciaría el modelaje de la plataforma.

Uno de los principales problemas encontrados en el diseño fueron las dimensiones de los motores utilizados para hacer girar las ruedas del sistema, ya que estos al ser utilizados como eslabones de salida del mecanismo para el control del ángulo de operación se encuentran en movimiento. Lo que sucedió en el modelo inicial es que se generaban interferencias entre el chasis y los actuadores cuando se modificaba el ángulo de estos ya que la curva realizada por los motores era muy amplia. Para solucionar este problema, los motores fueron girados 90 grados para ser utilizados de forma horizontal, haciendo que el espacio ocupados por estos se viera reducido y el movimiento realizado por estos no fuese significativo.

Ya que las ruedas tienen la capacidad de cambiar su ángulo de operación, estas generar un arco al moverse por lo que se consideró inicialmente reducir la altura del chasis para evitar contacto entre estas. Sin embargo, cuando se evaluó el movimiento del sistema el cambio de ángulo se veía reducido a causa de interferencias. Debido a esto se decidió utilizar una superficie curva que se adecue al movimiento de estas para que estas tuviesen contacto con el material.

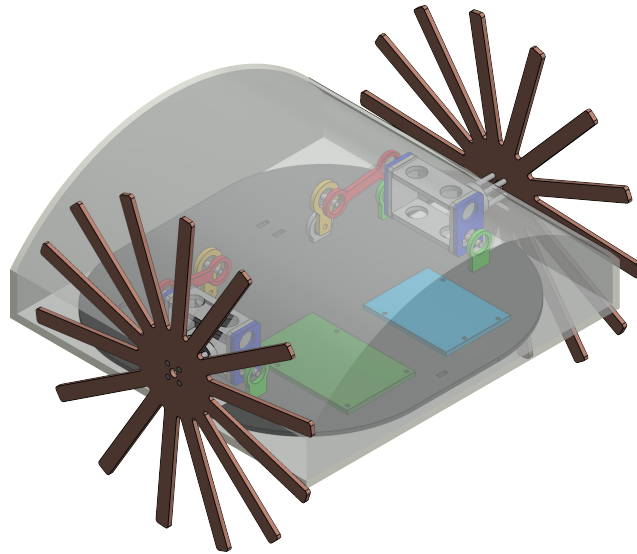


Figura 56: Modelo inicial del chasis

Los resultados de esta fase de ideación pueden observarse en la Figura [56](#), logrando obtener un modelo que cubriera casi en su totalidad todo el sistema interno del robot, únicamente teniendo espacio para la salida del eje del sistema y así conectar con las ruedas. Utilizando este modelo como base se pueden generar nuevos prototipos que adapten esta idea de una mejor manera ya que es necesario la realización de ciertas correcciones para poder implementar este modelo. Uno de los principales problemas con este diseño que es el chasis es una única pieza sólida, lo cual no permite su manufactura, además es necesario realizar el posicionamiento de todos los sensores y circuitos de potencia ya que solo se incluyeron los actuadores y controladores en el sistema.

11.3. Prototipo inicial del chasis

Para la realización del diseño del prototipo inicial del modelo del chasis para la plataforma robot fue necesario idear una forma de realizar el modelo para la parte curva del chasis de forma que esta pudiera ser manufacturada para su implementación. De esta forma se decidió separar esta sección del diseño de tal forma de obtener pequeñas sub-piezas con las cuales se pudiese realizar el ensamblaje del chasis. Basándose en la idea inicial se realizó el diseño del prototipo utilizando las mismas dimensiones que esta, así poder observar distintos factores que puedan afectar al aislamiento de los componentes.

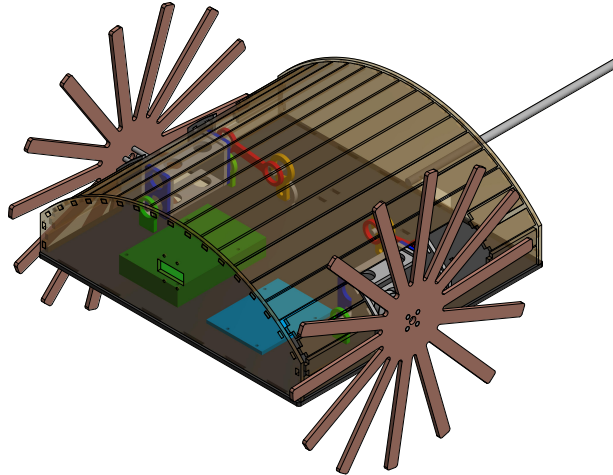


Figura 57: Diseño del prototipo inicial

Al observar el modelo realizado para el prototipo se observa que esta forma de diseño nos permite la construcción del modelo de manera sencilla y con la posibilidad de manufacturar las piezas del sistema con los materiales seleccionados. Sin embargo, se puede notar que existe un espaciado significativo entre cada una de las secciones de la parte superior del chasis lo cual compromete el aislamiento de los componentes del sistema. En términos generales, se considera adecuado el diseño y forma del prototipo, pero es necesario encontrar otro método de manufactura que permita tener un menor espaciado entre las secciones superiores. En este modelo todavía es necesario la colocación de sensores y circuitos de potencia del para el funcionamiento del robot.

11.4. Segundo diseño de prototipo para el chasis

Para el modelo de un segundo prototipo es necesario utilizar un diseño el cual pueda manufacturarse con el material seleccionado y que a su vez evite los distintos factores negativos del sistema anterior, como lo es el espaciado entre las partes que perjudica la protección de los componentes del entorno. Además, junto con el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate, incluir todas las partes necesarias para la operación del sistema, incluyendo controladores, sensores, actuadores, circuitos de potencia y alimentación. También se debe incluir la conexión mediante los cables seleccionados y el mecanismo necesario para el cambio de ángulo de operación de las ruedas anteriormente.

Ya que es necesario la implementación de una parte curva al diseño del sistema se buscaron diferentes formas de producir una pieza con esta geometría utilizando los materiales seleccionados y los métodos de manufactura a disposición. Primero, se pensó curvar el material mediante calentamiento para lograr moldear el material a la forma que se necesita, pero esta forma de manufacturar la pieza podría generar imperfecciones en las dimensiones haciendo que la construcción del modelo no sea ideal. Por otra parte, existe una forma de diseño utilizada en madera la cual permite generar curvas sobre el material, este diseño se conoce como lattice pattern.

11.4.1. Lattice Pattern

El Lattice Pattern es utilizado como método para crear áreas flexibles en piezas solidas utilizando un patrón de corte en el material. Este corte consiste en remover pequeñas porciones de material para crear áreas donde las piezas puedan ser dobladas haciendo el material más flexible en esas zonas [24]. Un ejemplo de este patrón, realizado en acrílico, puede observarse en la Figura 58.

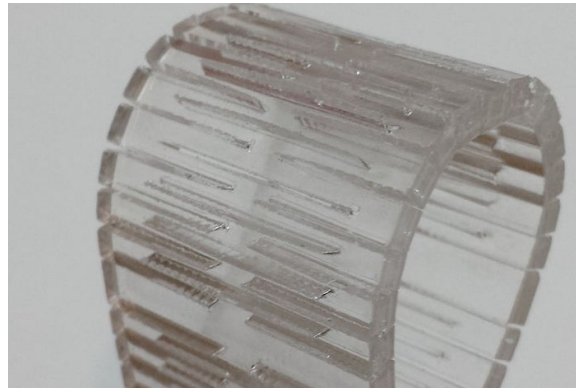


Figura 58: Ejemplo de Lattice Pattern [24]

Como parte del diseño de la parte curva del prototipo para el chasis fue utilizado este patrón para la manufactura de la pieza, ya que con este se logra obtener la forma necesaria para el ensamble y se logran reducir los espacios entre las secciones, siendo más fácil el aislamiento del sistema. Se puede observar el diseño de la pieza incluyendo el patrón de corte en ella en la Figura 59.

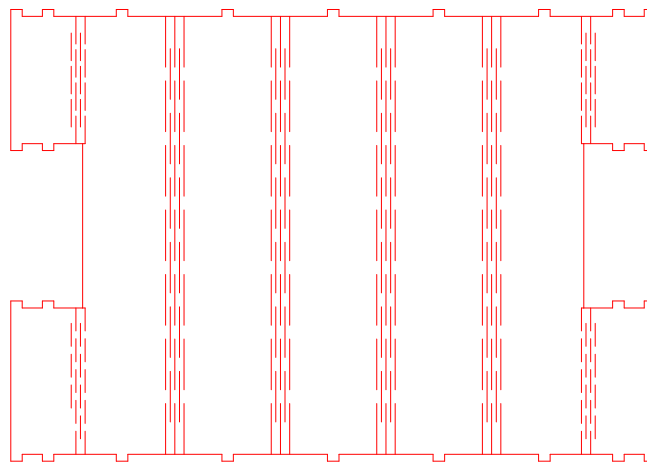


Figura 59: Prototipo de la parte superior utilizando Lattice Pattern

Para el diseño de la base para la plataforma robot se utilizó una geometría similar a la del diseño inicial. Realizando el dimensionamiento de cada uno de los componentes del robot, en conjunto con el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate se realizó la colocación de cada uno de los sensores, actuadores y controladores necesarios del sistema, para que estos pudieran ubicarse dentro de este. Realizando este diseño se pudo obtener el modelo del prototipo observado en la Figura [60](#).

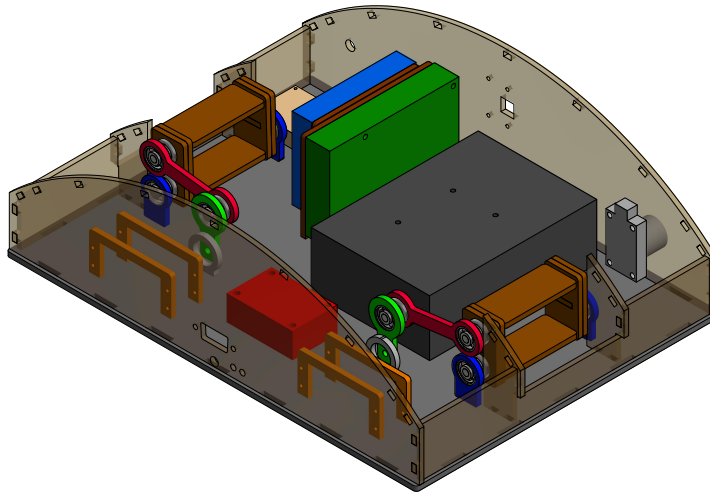


Figura 60: Modelo del segundo prototipo

11.5. Construcción del segundo prototipo

Con el modelo realizado se procedió a la realización de las piezas para su construcción utilizando corte láser y material acrílico para su producción. Se puede observar en la Figura [61](#) que el Lattice Pattern utilizado se acoplo de forma correcta a la forma requerida en el diseño, funcionando de forma ideal para los fines de esta fase diseño de prototipo.

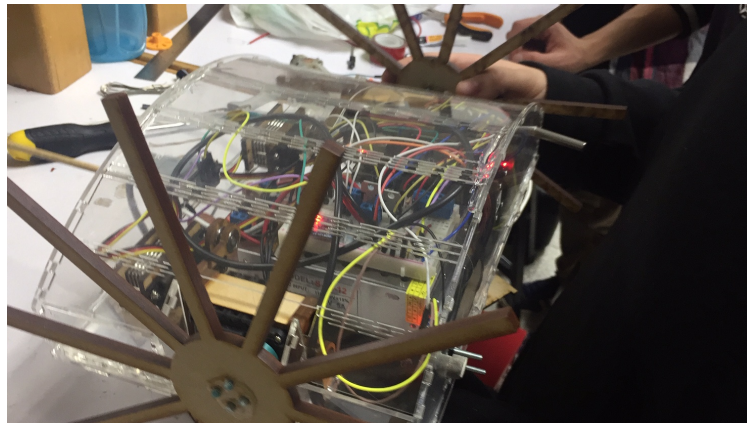


Figura 61: Segundo prototipo construido

En la construcción de este nuevo modelo fueron incluidos los sistemas diseñados en el módulo de diseño y programación de un sistema de navegación y medición para un robot de operaciones de búsqueda y rescate, los cuales son los módulos de comunicación, sensores y potencia, así como el sistema de control de ángulo para las ruedas. Este último prototipo logra cumplir con el requisito de contener todos los sistemas necesarios para la operación del sistema, tanto alimentación como medición o funcionalidades que este posee. Además, los actuadores utilizados para la modificación del ángulo de operación fueron capaces de levantar el peso del robot y fuerzas a las que estaban sometidos, observando esto en la Figura [62](#).

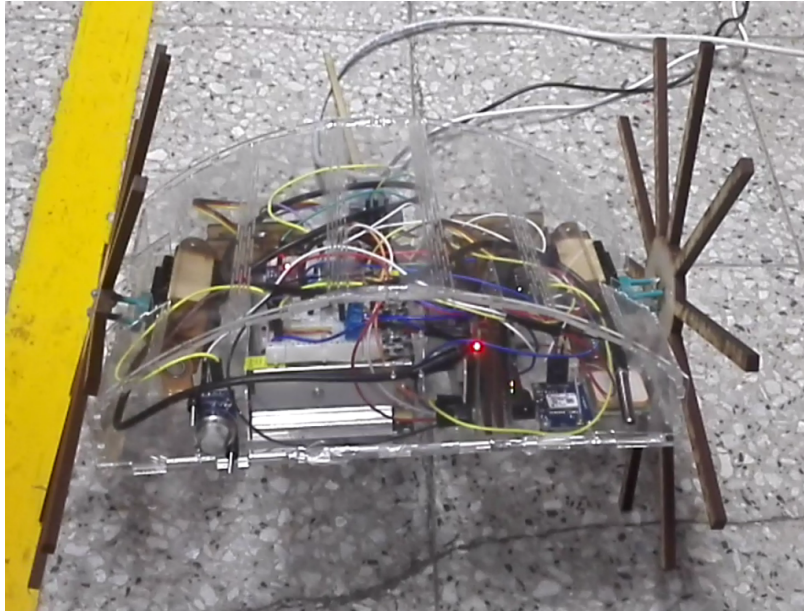


Figura 62: Segundo prototipo de chasis

11.6. Pruebas mecánicas realizadas al prototipo

Para evaluar distintos factores que pueden afectar al sistema, como lo son la temperatura o esfuerzos que sufre el mecanismo para el cambio de ángulo de las ruedas, se utilizó los softwares de ANSYS y Autodesk Inventor para realizar distintas pruebas ante estos agentes. Para la realización de las pruebas fueron utilizados los modelos realizados para los prototipos y en estos fueron evaluados los cambios o valores obtenidos durante estas.

11.6.1. Pruebas de temperatura

Para evaluar el factor de aislamiento de temperatura de la base para el robot todoterreno fue utilizado un análisis térmico en ANSYS. La prueba consistió en comprobar el cambio de temperatura interna en un periodo de tiempo de los componentes al poseer una temperatura externa constante de 75 grados centígrados. Se puede apreciar el proceso de calentamiento de cada parte de la plataforma en la Figura [63](#).

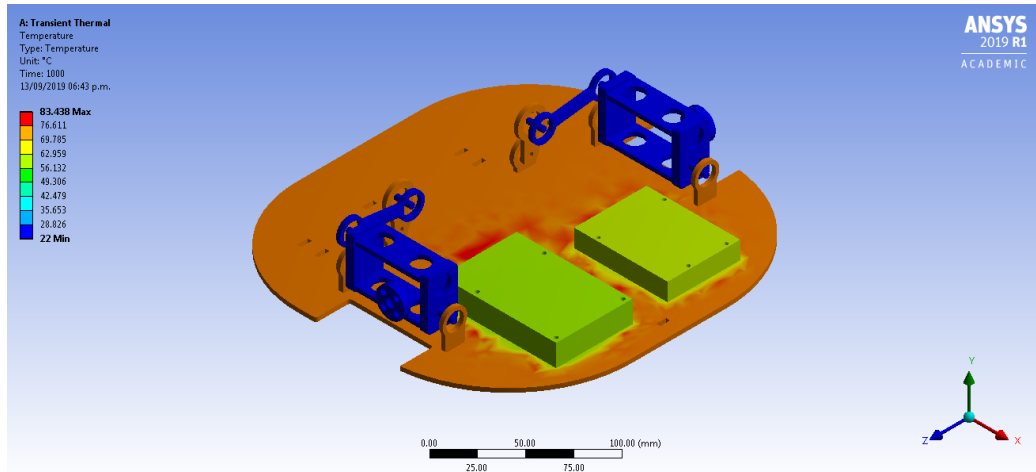


Figura 63: Prueba térmica modelo

Durante las pruebas fue utilizado como material el seleccionado anteriormente, que es el acrílico, para que el sistema y la experimentación estuvieran realizadas con el material del cual se construirá el modelo final. Se puede apreciar en la gráfica encontrada en la Figura 64 que el proceso de calentamiento interno del sistema robótico es lento, lo que permitirá una operación del sistema durante un periodo de tiempo prolongado, validando así el factor de aislamiento requerido.

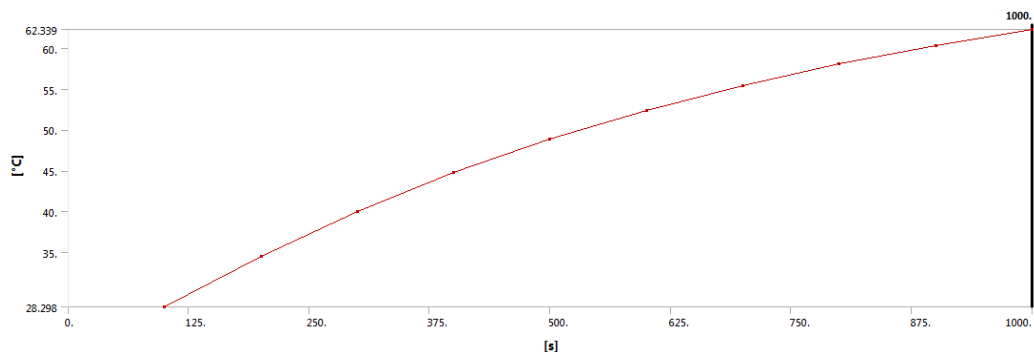


Figura 64: Grafica de prueba térmica modelo

11.6.2. Pruebas de pandeo de la base del chasis

Para verificar si el sistema diseñado con todos los componentes sobre este es capaz de operar sin presentar deformaciones por su mismo peso, se realizó una prueba de deformación de la plataforma, para evaluar donde existe un mayor desplazamiento sobre la placa inferior del modelo. Para esto se utilizó el peso del robot, de aproximadamente 5 libras, con lo cual se evaluó el pandeo producido en la parte inferior de la base, donde todo el sistema será cargado.

Al observar la Figura 65 puede notarse que la zona central de la base del robot todotieno es la que presenta una mayor deformación en todo el sistema. Sin embargo, esta no

es significativa por lo que no afectara en el funcionamiento del mismo. Con esto podemos asegurar que se podrán apoyar todos los componentes y partes del robot dentro de la base sin riesgos de que esta sufra algún daño ocasionado por su propio peso.

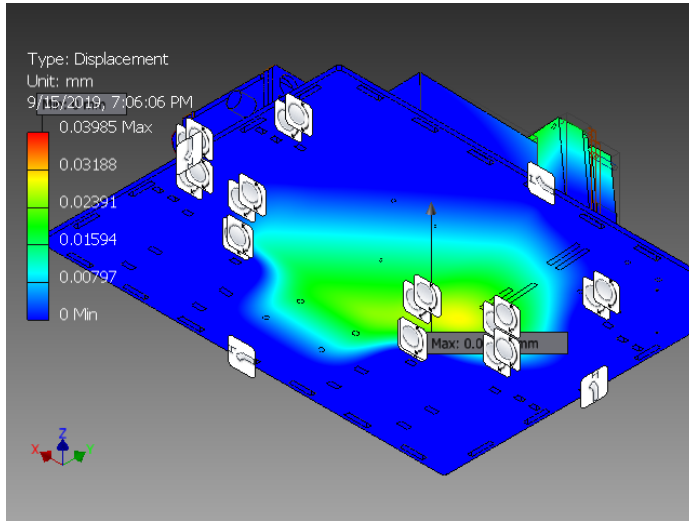


Figura 65: Pandeo base

11.6.3. Esfuerzos en el mecanismo para el cambio de ángulo de las ruedas

Debido a que la carga soportada por los eslabones del mecanismo utilizado para el cambio de ángulo de las ruedas debido al peso total del sistema, se evaluaron los esfuerzos a los que se somete para comprobar cómo están repartidos estos en todo el mecanismo. Se puede observar en la Figura 66 que los esfuerzos a tensión al cargar el mecanismo son mínimas y despreciables, por lo que estas no representan ningún problema para el sistema.

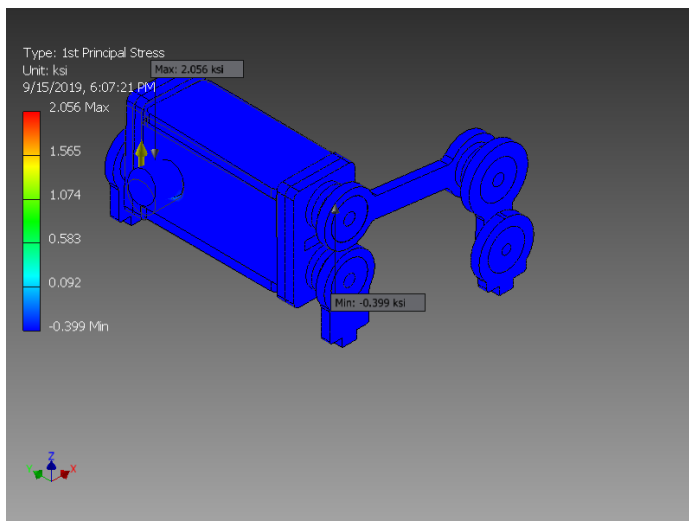


Figura 66: Mecanismo a tensión

En las pruebas de compresión el sistema se ve más afectado por los esfuerzos ocasionados por la carga en el sistema. Esto se puede apreciar en la Figura 67 ya que se puede observar una concentración de esfuerzos mayor. Sin embargo, los esfuerzos en estas zonas no son muy elevados por lo que no comprometen la funcionalidad del mecanismo

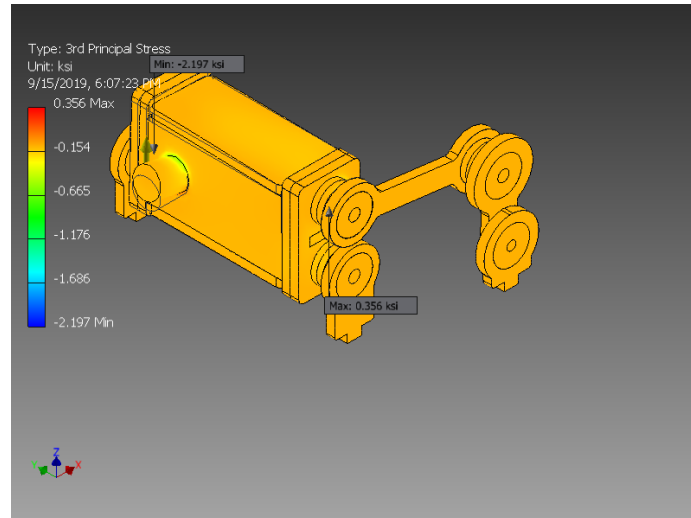


Figura 67: Mecanismo a compresión

- Se realizó, a través de pruebas y realización de prototipos, el diseño de un mecanismo de cuatro barras con un grado de libertad capaz de realizar un cambio en el ángulo de operación del sistema de ruedas de aproximadamente 57 grados respecto a la horizontal, con el cual se pudo comprobar el aumento de la movilidad del sistema al subir por pendientes o pasar sobre obstáculos en el terreno.
- Se realizó la selección de dos cables para la operación del robot, uno para la alimentación de este y otra para la comunicación con el operador siendo un cable 14 AWG y otro DB9 respectivamente. Por medio de pruebas de alimentación y comunicación utilizando estos como conexión se logró comprobar su efectividad obteniendo una recepción del 100 % de la información enviada desde una computadora..
- Se realizó la selección de los materiales para adecuarse a los factores externos necesarios requeridos por el sistema logrando concluir que la mejor opción para la creación del chasis es una combinación de polímero con un metal, seleccionando para la realización del diseño acrílico y aluminio.
- Se realizó el diseño de un chasis capaz de contener todos los componentes y partes necesarios para la operación del sistema dentro de este, logrando ubicar todos los sensores, actuadores, circuitos y controladores que forman parte de la plataforma robot.

- Se recomienda la utilización de componentes y actuadores de menor tamaño con lo cual se pueda reducir las dimensiones de la plataforma robot y así volver a hacerlo mas accesible a diferentes zonas.
- Se recomienda considerar la utilización de fuentes alternas de alimentación para todo el sistema ya que la fuente de potencia utilizada resulta muy grande aumentando el tamaño del robot.
- Se recomienda evaluar otro estilo de ruedas con lo cual se puedan probar distintos ángulos de operación para las ruedas del robot, para así poder observar si distintas configuración de estas presentan algún otro beneficio en la movilidad del robot.

-
- [1] P. Voosen, *Windy season fails to revive fading Mars rover*, 2019.
 - [2] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M. Bloesch y col., “Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot”, en *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2016, págs. 38-44.
 - [3] K. C. Galloway, G. C. Haynes, B. D. Ilhan, A. M. Johnson, R. Knopf, G. A. Lynch, B. N. Plotnick, M. White y D. E. Koditschek, “X-RHex: A highly mobile hexapedal robot for sensorimotor tasks”, 2010.
 - [4] J. T. Karras, C. Fuller, K. C. Carpenter, A. Buscicchio y C. E. Parcheta, *Puffer: pop-up flat folding explorer robot*, US Patent App. 15/272,239, mar. de 2017.
 - [5] R. Berganza, “¿Se repetirá la tragedia de El Cambra y II?”, *Revista Científica CON-RED*, vol. 1, n.º 1, págs. 49-54, 2016.
 - [6] J. Elías y B. O. Helicopter, *La violenta erupción del volcán de Fuego en Guatemala deja decenas de muertos*, jun. de 2018. dirección: https://elpais.com/internacional/2018/06/04/actualidad/1528071667_196341.html.
 - [7] R. Norton, *Diseño de maquinaria*. McGraw-Hill Interamericana, 2009.
 - [8] *3D CAD Model Collection: GrabCAD Community Library*. dirección: <https://grabcad.com/library/juntas-homocineticas-glaencer-spicer-1>.
 - [9] T. Robotis, *Dynamixel ax-12a robot actuator*, 2014.
 - [10] *D950TW 20mm Premium Coreless Titanium Gear Torque Version*. dirección: <https://hitec.com/actuators/20mm-class/d-950tw-32-bit-ultra-torque-titanium-gear-servo/product>.
 - [11] N. G. F. Saboya, “Normas de Comunicación en Serie: RS-232, RS-422 y RS-485”, *Revista Ingenio Libre*, vol. 9, 2012.
 - [12] *Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength*. dirección: https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm.

- [13] D. P. Quezada Cepeda, “Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema ROCKER-BOGIE y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE”, B.S. thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecatrónica., 2014.
- [14] N. Hüsing y U. Schubert, “Aerogels—airy materials: chemistry, structure, and properties”, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, n.º 1-2, págs. 22-45, 1998.
- [15] *Saving Energy and Money with Aerogel Insulation*. dirección: <https://www.energy.gov/articles/saving-energy-and-money-aerogel-insulation>.
- [16] T. Sonsalla, A. L. Moore, W. Meng, A. D. Radadia y L. Weiss, “3-D printer settings effects on the thermal conductivity of acrylonitrile butadiene styrene (ABS)”, *Polymer Testing*, vol. 70, págs. 389-395, 2018.
- [17] F. M. G. Benítez, *Materiales en impresoras 3D*, ene. de 1970. dirección: <http://fernandogonzalezbenitez.blogspot.com/2015/07/materiales-en-impresoras-3d.html>.
- [18] *ABS Plastic Bundle*. dirección: <https://scribbler3dpen.com/filaments/abs-plastic-bundle/>.
- [19] *Polimetacrilato de metilo*. dirección: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/polimetacrilato-de-metilo.html>.
- [20] Wwv.goodfellow.com, *Polimetacrilato de Metilo (PMMA, Acrilo)*. dirección: <http://www.goodfellow.com/S/Polimetacrilato-de-Metilo.html>.
- [21] *Metacrilato en placas*. dirección: <https://www.polimertecnic.com/metacrilato-en-placas/>.
- [22] *El aluminio y sus aleaciones se mecanizan*, feb. de 2017. dirección: <https://www.mecanizadossinc.com/aluminio-aleaciones-se-mecanizan/>.
- [23] *Propiedades Mecnico-Qumicas del Aluminio*. dirección: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>.
- [24] A. Porterfield e Instructables, *Curved Laser Bent Wood*, oct. de 2017. dirección: <https://www.instructables.com/id/Curved-laser-bent-wood/>.

