

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO MECÁNICO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO  
DE UN ROBOT RECONFIGURABLE PARA  
LABORES DE RESCATE ANTE UN INMINENTE  
TERREMOTO**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR**

Renzo Anton Ñiquen (ORCID: 0000-0003-2145-0126)

**ASESOR**

Emir Augusto Vela Saavedra (ORCID: 0000-0002-9397-2452)

Lima – Perú

2021

*Dedicatoria:*

A mi esposa y a mi madre que estuvieron siempre conmigo en los momentos más complicados durante mi etapa como estudiante, aconsejándome de no desistir en cada paso que daba. De la misma forma, a mi líder Bruno Vaccari que siempre me aconsejó para ser un mejor hijo de Dios y un mejor esposo.

*Agradecimientos:*

Al profesor Emir Vela por aceptar ser mi asesor y acompañarme en cada paso que he dado durante la elaboración de mi tesis. Asimismo, a todos los profesores que gracias a sus clases aprendí a ser un mejor profesional.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Resumen	
Abstract	
Introducción.....	1
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
1.1    Áreas en una zona de desastre.....	11
1.2    Estado del arte.....	13
1.2.1    Robot Mori .....	14
1.2.2    Robot RISING STAR.....	16
1.3    Patrones de locomoción .....	20
1.3.1    Sistemas de locomoción y sus variaciones .....	21
1.3.2    Descripción de las características y criterio de evaluación de los distintos sistemas de locomoción.....	23
1.4    Grados de libertad de un robot y espacio de trabajo .....	26
1.5    Modelado cinemático del robot.....	28
1.5.1    Cinemática directa de un robot.....	29
1.5.2    Cinemática inversa de un robot .....	30
1.6    Modelado estático .....	31
1.7    Modelado cinemático.....	34
1.7.1    Transformación de coordenadas.....	36
1.7.2    Matriz de rotación.....	37
1.7.3    Posición y velocidad de traslación de los sólidos .....	39
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....</b>	<b>43</b>
2.1    Concepción de la solución .....	44
2.1.1    Lista de exigencias.....	44

2.2	Elaboración del concepto.....	47
2.2.1	Abstracción o representación de nivel.....	47
2.2.2	Estructura de funciones.....	48
2.2.3	Concepto de solución.....	49
2.2.4	Disposición básica.....	50
2.2.5	Evaluación del concepto solución.....	51
2.3	Propuestas de conceptos para el robot.....	53
2.3.1	Consideraciones geométricas del diseño.....	54
2.3.2	Análisis cinemático.....	59
2.3.3	Análisis estático.....	65
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS.....</b>		<b>68</b>
3.1	Diseño final del robot.....	69
3.1.1	Mecanismo utilizados para el diseño del robot.....	70
3.1.2	Medidas geométricas del diseño.....	71
3.2	Cinemática del robot.....	73
3.3	Análisis estático.....	91
3.4	Demostración de la utilidad de una rueda reconfigurable.....	101
3.4.1	Simulación del robot con superficie plana e inclinada.....	102
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>107</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>109</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Característica de los sistemas de locomoción.....	23
<b>Tabla 1.2</b> Criterio de evaluación de las características de los sistemas de locomoción...25	
<b>Tabla 2.1</b> Tabla de requerimientos 1.....	45
<b>Tabla 2.2</b> Table de requerimientos 2.....	46
<b>Tabla 2.3</b> Matriz morfológica.....	49
<b>Tabla 2.4</b> Evaluación técnica del proyecto.....	51
<b>Tabla 2.5</b> Evaluación económica del proyecto.....	52
<b>Tabla 2.6</b> Descripción de los diseños previos.....	53
<b>Tabla 2.7</b> Criterios de diseño.....	55
<b>Tabla 2.8</b> Parámetros de criterio para ruedas espirales.....	57
<b>Tabla 3.1</b> Centros de masa de los componentes del robot.....	77
<b>Tabla 3.2</b> Propiedades mecánicas del ABS.....	100
<b>Tabla 3.3</b> Valores de torque obtenidos en plano recto.....	106
<b>Tabla 3.4</b> Valores de torque obtenidos en plano inclinado de 60°.....	106

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Áreas de zonas luego de un desastre .....	11
<b>Figura 1.2</b> Tipos de obstáculos a los que está expuesto el robot durante su operación.....	12
<b>Figura 1.3</b> Obstáculos en la movilidad del robot.....	13
<b>Figura 1.4</b> Robot origami Mori .....	16
<b>Figura 1.5</b> Robot RISING STAR .....	17
<b>Figura 1.6</b> Robot RISING STAR 2 .....	18
<b>Figura 1.7</b> Vista frontal y superior que muestra el volumen de trabajo de la FBEM.....	19
<b>Figura 1.8</b> Robot diferencial con locomoción de tipo ruedas.....	20
<b>Figura 1.9</b> Tipos de locomoción en robots de rescate terrestres.....	21
<b>Figura 1.10</b> Diseño y simulación del sistema de locomoción de un robot .....	22
<b>Figura 1.11</b> Definición gráfica de grados de libertad.....	27
<b>Figura 1.12</b> Robots no redundantes .....	28
<b>Figura 1.13</b> Problema cinemático.....	29
<b>Figura 1.14</b> Robot referencial de cálculo .....	35
<b>Figura 1.15</b> Análisis tridimensional de rotación.....	37
<b>Figura 1.16</b> Esquema simplificado con distancias .....	39
<b>Figura 1.17</b> Representación en 3D del vector en movimiento .....	40
<b>Figura 2.1</b> Diagrama de flujo para el diseño mecánico del robot.....	43
<b>Figura 2.2</b> Caja negra .....	47
<b>Figura 2.3</b> Caja blanca.....	48
<b>Figura 2.4</b> Mapa de alternativas .....	50
<b>Figura 2.5</b> Geometría de una rueda tipo pata .....	56

<b>Figura 2.6</b> Análisis geométrico tipo espiral.....	58
<b>Figura 2.7</b> Flujograma de análisis cinemático.....	59
<b>Figura 2.8</b> Esquema del robot.....	60
<b>Figura 2.9</b> Medida del plato que soporta a los servomotores .....	61
<b>Figura 2.10</b> Centro de masa del sólido .....	61
<b>Figura 2.11</b> Coordenadas del robot (aspa) con respecto al centro de coordenadas inercial	63
<b>Figura 2.12</b> Coordenadas en 2 dimensiones, eje X y Z (aspa) .....	63
<b>Figura 2.13</b> Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido anti horario) ....	64
<b>Figura 2.14</b> Simulación del movimiento en línea recta del robot.....	64
<b>Figura 2.15</b> Flujograma de análisis estático .....	65
<b>Figura 2.16</b> Esfuerzo de VON MISSES obtenido en software similar al ANSYS.....	67
<b>Figura 2.17</b> Análisis estático del robot .....	67
<b>Figura 3.1</b> Diseño final del robot.....	68
<b>Figura 3.2</b> Robot con aspas expandidas y contraídas .....	69
<b>Figura 3.3</b> Mecanismos colocados en el cuerpo del robot.....	71
<b>Figura 3.4</b> Medida del diámetro en contracción .....	72
<b>Figura 3.5</b> Medida del diámetro en expansión .....	72
<b>Figura 3.6</b> Longitud del robot.....	73
<b>Figura 3.7</b> Coordenadas del centro de gravedad del sistema marcado en negro .....	74
<b>Figura 3.8</b> Representación gráfica del centro de gravedad del robot .....	74
<b>Figura 3.9</b> Representación gráfica del centro de gravedad de la locomoción.....	75
<b>Figura 3.10</b> Coordenadas del centro de gravedad del sistema marcado en negro .....	75
<b>Figura 3.11</b> Coordenadas del centro de gravedad del aspa derecha y cuerpo central .....	76
<b>Figura 3.12</b> Coordenadas del robot (aspas contraídas) respecto al centro coordenadas inercial .....	78
<b>Figura 3.13</b> Coordenadas en dos dimensiones, eje X y Z (aspas contraídas).....	79

<b>Figura 3.14</b> Punto tangente del radio exterior .....	80
<b>Figura 3.15</b> Coordenadas del centro de gravedad del sólido 2.....	82
<b>Figura 3.16</b> Coordenadas del robot (aspa expandida) respecto al centro de coordenadas inercial .....	83
<b>Figura 3.17</b> Coordenadas en dos dimensiones, eje X y Z (aspas expandidas) .....	84
<b>Figura 3.18</b> Simulación del movimiento en línea recta del robot.....	87
<b>Figura 3.19</b> Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido anti horario) ....	87
<b>Figura 3.20</b> Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido horario) .....	88
<b>Figura 3.21</b> Movimiento del robot asignando aceleración a un aspa .....	88
<b>Figura 3.22</b> Comparación entre aspas expandidas y retraídas.....	89
<b>Figura 3.23</b> Módulo de velocidades entre aspas expandidas y retraídas .....	90
<b>Figura 3.24</b> Variación de diámetros cuando un aspa se expande y otro se contrae .....	90
<b>Figura 3.25</b> Deformación lateral del punto en donde reposa el aspa.....	91
<b>Figura 3.26</b> Punto de deformación y contacto.....	92
<b>Figura 3.27</b> Esfuerzo de Von Misses del tubo fijo .....	92
<b>Figura 3.28</b> Fuerzas aplicada en el plato externo (Fuerzas superiores y de contacto) .....	93
<b>Figura 3.29</b> Análisis de deformación (fuerzas superiores y de contacto).....	94
<b>Figura 3.30</b> Valor de Von Misses de la parte central del plato .....	94
<b>Figura 3.31</b> Valor del momento generado en la parte central del plato .....	95
<b>Figura 3.32</b> Conexión entre el motor DC y plato extensión-contracción.....	96
<b>Figura 3.33</b> Momento generado entre el motor DC y el plato de expansión-contracción... 96	
<b>Figura 3.34</b> Esfuerzo generado entre la unión del motor DC y el plato expansión-contracción .....	97
<b>Figura 3.35</b> Deformación entre unión de cremallera y soporte de plato de extensión .....	97
<b>Figura 3.36</b> Valor de Von Misses entre unión de cremallera y soporte de plato de extensión	98
<b>Figura 3.37</b> Fuerza aplicada en el segundo plato de extensión .....	99

<b>Figura 3.38</b> Valor de la deformación máxima en el segundo plato de giro.....	99
<b>Figura 3.39</b> Valor de Von Misses en el segundo plato de giro.....	100
<b>Figura 3.40</b> Funcionamiento del robot en software V-REP .....	101
<b>Figura 3.41</b> Simulación del robot (aspas expandidas) en superficie plana.....	102
<b>Figura 3.42</b> Torque vs Tiempo del robot (aspas expandidas en superficie plana) .....	103
<b>Figura 3.43</b> Torque vs tiempo del robot (aspas contraídas en superficie plana) .....	103
<b>Figura 3.44</b> Giro del eje Y en 60° .....	104
<b>Figura 3.45</b> Torque vs tiempo del robot (aspas contraídas en 60°) .....	105
<b>Figura 3.46</b> Torque vs Tiempo del robot (aspas expandidas en 60°) .....	105

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Concepción de la solución	115
Anexo 2: Programación en Matlab - Simulink	120
Anexo 3: Programación en V-REP	122

## **RESUMEN**

Al año se observa 2990 labores de rescate de personas a causa de dos factores: Primero, por el derrumbe de sus hogares de tipo apilamiento y segundo, debido al tiempo que demoran las labores de rescate a causa del derrumbe. El presente estudio busca disminuir este tiempo que, normalmente, dura mínimo diez horas en ejecución, mediante el diseño de un robot explorador reconfigurable. En base a la metodología, esta se dividirá en cuatro etapas. Primero, se sabrá las características de diseño según necesidades del cliente, luego, se plantearán tres diseños tentativos. Posteriormente, se conocerá la cinemática del autómatas para entender su comportamiento en una determinada trayectoria con su sistema de control y, por último, se mostrará la simulación en Simulink y V-REP. En síntesis, se busca implementar un robot para una ayuda social que sea de montaje sencillo y de costo accesible.

### **PALABRAS CLAVES:**

**Robot, rescate, terreno, ictiología, Mercalli, cinemática directa, sistema de control, grado de libertad, locomoción.**

## **ABSTRACT**

# **MECHANICAL DESIGN AND KINEMATIC ANALYSIS OF A RECONFIGURABLE ROBOT FOR RESCUE WORKS BEFORE AN IMMINENT EARTHQUAKE**

Every year, 2990 people are rescued due to two factors: First, due to the collapse of their stacking-type homes, and second, due to the length of time rescue efforts are taking due to the collapse. The present study seeks to reduce this time, which normally lasts at least ten hours in execution, by designing a reconfigurable robot explorer. Based on the methodology, it will be divided into four stages. First, the design characteristics will be known according to customer needs, then three tentative designs will be considered. Subsequently, the kinematics of the automaton will be known to understand its behavior in a certain trajectory with its control system and, finally, the simulation will be shown in Simulink and V-REP. In short, it seeks to implement a robot for social assistance that is easy to assemble and affordable.

### **KEYWORDS:**

**Robot, rescue, terrain, ichthyology, Mercalli, direct kinematics, control system, degree of freedom, locomotion.**

# INTRODUCCIÓN

Los países que bordean el Océano Pacífico, además de tener biodiversidad ictiológica, también tienen algo más en común, son parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, pero en este punto se plantean dos preguntas, la primera es ¿qué significa ser parte de este Cinturón? Y la segunda es ¿qué consecuencias tiene? La respuesta para la primera pregunta es amplia; sin embargo, la explicación estará basada en un punto, la migración de fuentes sísmicas en el Perú.

Entre los años de 1960 y 2014 se registraron tres mil sismos entre 6 y 7 Mw con una profundidad de 100 kilómetros entre las naciones que bordean dicho Cinturón de Fuego [1]. El Perú, ubicado en la costa oeste de Sudamérica, no es ajeno a estos movimientos sísmicos, es por eso que, en los años 1513, 1974 y 2017 alcanzó los 9 Mw, el de mayor magnitud presentado a lo largo de su historia republicana, así mismo se presentaron otros más al norte del país, específicamente en Trujillo (año 1619) y Tumbes (año 1953) ambos con medición de grado IX MM 3 que trajeron muerte y destrucción a ambas ciudades con aproximadamente 3 000 víctimas atrapadas debido al derrumbe de sus viviendas.

Igualmente fue en el centro y sur del Perú, afectando ciudades como el Callao (IX MM) en 1746, en donde produjo unos 20 000 fallecidos a causa de un tsunami con olas que alcanzaban los veinte metros de altura que arrasó con hogares destruyéndolos por completo, y Arequipa (VIII MM) en donde se da el derrumbe de algunas estructuras bien construidas, en 1784, que causó la caída por completo de la ciudad, ocasionando la muerte de 54 personas y más de 500 heridos [1]. En resumen, son 8 000 los eventos sísmicos mayores a 4Mw producidos en el Perú, según el Instituto Geofísico (IGP), hasta el año 2018 [2].

En respuesta a la segunda pregunta y como se ha mencionado con anterioridad, la principal consecuencia que trae este evento natural es la debilitación de las estructuras de casas y edificios pudiendo producirse un derrumbe o colapso durante el tiempo en el que se da el sismo o posteriormente. Según el último Censo Nacional realizado en el año 2017, 9 millones 218 mil 299 viviendas particulares ocupadas en todo el Perú que representan un 91.2%, a diferencia de las que se encuentran desocupadas que son un total de 884 mil 550, el 55.8% están construidas con ladrillo y cemento, el 27.9% con adobe y tapia, el 9.5% de madera, el 3.1% de calamina y estera, el 2.1% de quincha y el 0.6% de piedra o sillar con cal o cemento [3].

Asimismo, en una entrevista que tuvo la radio RPP el 27 de mayo del 2019 con el actual ministro de vivienda, Miguel Estrada, este menciona que, del total de viviendas habitadas, el 70% se encuentra en peligro de colapso o derrumbe debido a la construcción informal que es un conjunto de utilización de materiales no adecuados y/o edificaciones en un suelo no apto. Un ejemplo claro lo da la Organización de Formalización de la Propiedad Informal (COFOPRI) en su artículo Memoria Institucional publicada en el 2018, en donde muestra que solo en Lima, en un año, la cantidad de viviendas colapsadas son 137 e inhabitables son 88 y en total, en todo el Perú, son 4709 viviendas que han colapsado y son inhabitables.

Lo anterior, por supuesto, causa una serie de emergencias como lo son el rescate de personas atrapadas dentro de los escombros que causan los derrumbes de estas viviendas. En el mismo año, el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú y el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) muestran un total de 4545 rescates por derrumbe [4] y en lo que va del 2019, hasta agosto, un total de 2990. Solo en Lima y Callao se realizaron 23 rescates por el mismo problema resultando 74 damnificados, 29 viviendas afectadas y 3 destruidas; mientras que en lo que va del 2019 se registraron 2 emergencias por derrumbe obteniendo 191 damnificados [5].

Finalmente, luego de todo lo mencionado, se llega a la conclusión que la cantidad de eventos ocurridos por derrumbe debido a sismos u otros fenómenos naturales no son atendidos, de manera eficiente, en su totalidad por la cantidad de bomberos y rescatadores que existen en el Perú. Un ejemplo claro es lo que sucedió en Pisco el día 15 de agosto del 2007, en donde las labores de rescate tuvieron una duración de más de un mes necesitándose ayuda extranjera. Este terremoto tuvo una magnitud de 7.9 Mw que afectó también Ica, Huancavelica y Lima teniendo un epicentro de 60 km al oeste de Pisco con una profundidad de 40 km. El resultado fue un total de 58 581 viviendas colapsadas, 519 muertos y 1366 heridos.

Como se observa, la consecuencia que trae un terremoto es devastador en todos los aspectos posibles. No solo para las víctimas que se encuentran atrapadas en los escombros, sino también, para las personas encargadas de rescatarlos. Estos últimos necesitan salvar sus vidas y/o procurar que las víctimas salgan de los escombros con el menor daño posible.

El procedimiento que siguen los bomberos y rescatistas consiste en tres fases: La primera es la organización e inicio de una operación. Aquí pueden tardar más de 4 horas. La segunda es la fase de búsqueda, en donde se encuentran varios tipos como la búsqueda por llamado y escucha,

transmisión de sonidos, búsqueda canina y búsqueda técnica. Esta fase puede tardar desde 45 minutos a más de una hora. Por último, la fase 3, que es de remoción, levantamiento, penetración y rescate que suele durar como mínimo 5 horas.

En total, como mínimo, se tienen 10 horas destinadas para labores de rescate cuando el derrumbe es severo y por datos recopilados que serán expuestos más adelante, una persona, en promedio, puede durar máximo 8 horas bajo los escombros por distintos motivos como lo son la falta de aire, tuberías de desagüe rotas y que provocan inundaciones, fuego por corto circuito, concreto u otro material noble que se encuentra encima de la víctima, etc.

Ante tal situación planteada, es importante reconocer que la vida de las personas está por encima de cualquier circunstancia, por este motivo y para este trabajo de tesis, se plantea una solución para el problema que acontece. Esta solución implica poder implementar tecnología robótica que permita poder disminuir el tiempo de localización de las víctimas para que los bomberos y rescatistas puedan llegar al área del siniestro en el menor tiempo posible, y para que la solución se pueda cumplir es que se llevará a cabo el diseño de un robot reconfigurable de rescate que permita movilizarse en cualquier tipo de terreno no estructurado de difícil acceso.

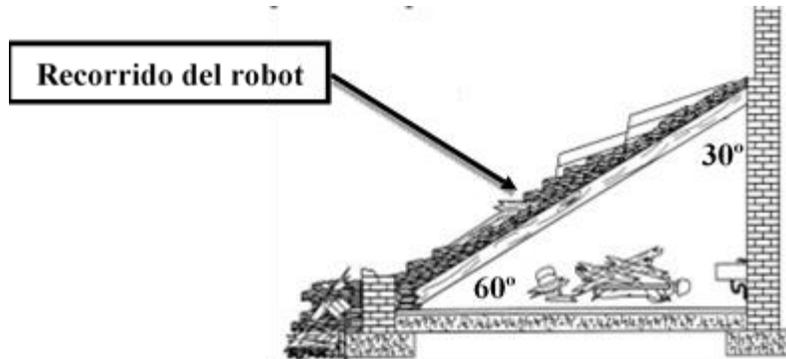
## **Alcance**

En este trabajo de tesis, que se basa en el diseño del sistema mecánico y análisis cinemático de un robot reconfigurable para terrenos no estructurados, tendrá como aplicación el rescate de víctimas atrapadas ante derrumbes o colapsos de viviendas luego de un sismo o terremoto. Habrá 3 actividades definidas:

1. Diseñar el sistema mecánico de un robot siguiendo la metodología de la norma VDI 2221 que sea capaz de poder ingresar por espacios con un área de acceso máximo de 20 cm de ancho y 20 cm de alto.

2. Posteriormente, se realizará un estudio cinemático para que así pueda atravesar obstáculos con las siguientes características:

- Si el colapso es del tipo apoyado al piso (el más común [64]), en donde la supervivencia de la víctima es alta [6], el robot debe poder subir la superficie no lisa, con un ángulo máximo de 60° de subida. La figura 1 muestra lo expuesto:



**Figura.1** Colapso con apoyo al piso [6].

- Siguiendo la misma lógica del punto anterior, se realizará un estudio cinemático del robot para que este pueda movilizarse sobre terrenos que presenten diversos tipos de obstáculos.

3. Asimismo, se realizará un estudio estático de un sólido que compone el robot que soportará la acción más crítica. Aquí se escogerá un material y se verá su comportamiento para finalmente, validarlo.

4. De la misma forma, se simulará el funcionamiento del robot utilizando el software V-REP bajo condiciones reales: Ingreso por un área de acceso ya descrita y paso por un terreno irregular con condiciones mencionadas en el capítulo de metodología.

## Antecedentes

Los últimos avances tecnológicos, nos enseñan la importancia que este tendrá en un futuro no tan lejano. Esto porque en todo lo que existe hoy en día hay tecnología (automóviles, productos para el hogar, televisores, etc.); sin embargo, es factible recalcar la relevancia que tendría la tecnología si estuviera basado, en su mayoría, a la ayuda social. Es por eso que este trabajo de investigación, basado en el diseño del sistema mecánico de un robot adaptable a todo tipo de terreno para labores de rescate, tiene como premisa la pregunta

¿de qué forma se puede ayudar a la sociedad, sin comprometer el medio ambiente, para minimizar riesgos en caso de que ocurra algún desastre natural? Para responder esta pregunta se presentarán estudios anteriores realizados por empresas de mayor arraigo en el tema de robótica con ayuda de instituciones universitarias.

En primer lugar, tenemos a Risign Sprawl-Tuned (RSTAR) un robot autónomo, dedicado a labores de rescate luego de derrumbes de edificios o viviendas, presentado en mayo del año 2018 en la Conferencia Internacional sobre Robótica y Automatización (ICRA 2018) por la Universidad Ben-Gurión del Negev (BGU). Este robot utiliza ruedas como patas que son extensibles, ajustables y unidas a un cuerpo que le permiten moverse de manera independiente y reposicionarse para correr superficies planas, superar obstáculos grandes, con pendientes de 45°, e ingresar por espacios pequeños como tuberías [7].

El largo de este robot mide 12 cm y el peso es 73 gramos (incluida la batería y el sistema autónomo debido al uso de plástico), además es accionado por 2 motores (cada uno en la posición de cada conjunto de patas) de 12 mm de diámetro que brindan una variación de 6-9 voltios. Con mención a las patas, tenemos que estas pueden tomar una inclinación de 60° hasta 90°. Así mismo, se trabajó con un factor de seguridad en un rango de 3-4 [8].

La velocidad que alcanza es de 0.6 m/s lo que permite que realice labores de rescate reduciendo el tiempo en 50% de lo que normalmente se demora un rescatista en hacerlo. Sin embargo, algo que podría mejorar este diseño es el uso de materiales más resistentes ya que en un derrumbe, debido a que las estructuras están debilitadas, pueden seguir cayendo mientras transcurre el tiempo y el robot puede verse afectado imposibilitando o retrasando en tiempo la labor de rescate. En cambio, lo que se puede tomar como principio es su sistema de locomoción

o movimiento en el que las patas pueden pasar en un estado de 180° en contacto con el piso a 90° permitiendo que pueda rodar en superficies lisas.

En segundo lugar, se presenta al conjunto de robots hechos en Perú por la Universidad Católica San Pablo de Arequipa. En total son tres robots que trabajan con un dron. El primero se llama Komodo con medidas de 80 cm de largo x 50 cm de ancho y 50 cm de alto que tiene por deber inspeccionar ambientes cerrados. El segundo, de nombre Oruguin, mide 1 m x 70 cm x 70 cm que, debido a su mejor nivel de desplazamiento de motor, tiene como característica desarrollarse con agilidad en los espacios abiertos.

Mientras que el tercero llamado Konan, con medidas de 30 cm x 30 cm x 30 cm, tiene la capacidad de movilizarse por cualquier tipo de terreno como estructuras colapsadas con ángulo de pendiente de 30° [9]. De estos tres robots, dos ayudarán para el diseño final de este trabajo de investigación, estos serán Komodo que permitirá conocer cómo puede desenvolverse nuestro diseño en ambiente cerrados por donde no llegue luz y, por último, Konan, que tiene la característica principal de desenvolverse en cualquier tipo de terreno debido al tipo de ruedas que posee. En mi opinión, estos robots podrían alcanzar mayor velocidad si su peso fuese menor al utilizar menos cantidad de acero en su sistema. Si bien es cierto es más seguro ante posibles caídas de concreto, pero también lo hace más lento.

En tercer lugar, tenemos al robot arácnido RDB-10, presentado por el Instituto Politécnico de México el 10 de febrero del 2019 capaz de localizar personas atrapadas en los escombros luego de un derrumbe en edificio o vivienda. El prototipo es ligero y resistente debido a que su construcción está hecha de PLA (polímero parecido al plástico), además presenta doce servomotores que accionan cuatro patas y le permiten poder moverse hacia adelante, atrás, izquierda y derecha [10].

Así mismo, se alimenta de baterías de litio y powerbands que pueden recargarse para ampliar los tiempos de búsqueda, también presenta tres tipos de sensores: temperatura, sonido y distancia del espacio en donde se encuentra atrapada la víctima. El sensor de temperatura registra valores en un rango de 50°C hasta 120°C, el de sonido detecta hasta 400 dB (decibeles) en un perímetro de tres metros y el sensor de distancia funciona de acuerdo al avance del robot.

Un punto importante es que el robot opera mediante un dispositivo móvil con bluetooth con un sistema operativo Android 5.0 en adelante. Este robot servirá para conocer qué fuentes de

alimentación debe tener el que se desarrollará en este trabajo de tesis para que su trabajo sea continuo sin interrupciones, así como su sistema de locomoción que serviría en caso el diseño sea híbrido. Algo que podría implementarse a este trabajo es la disminución de tamaño por parte del prototipo cuando encuentre algún obstáculo de menor tamaño que al de este.

En cuarto lugar, se presenta al robot Big Dog construido por la empresa Boston Dynamics. Dentro de sus características están que es de cuatro patas con capacidad de cargar 150 kg. Tiene un metro de alto y es exclusivamente hecho para labores militares.

También puede atravesar terrenos complicados a una velocidad de 6.4 km/h y subir pendientes de 35°. Posee un ordenador que controla la tracción, debido a la información que recibe de los múltiples sensores con los que cuenta [11]. Este robot puede inspirar este trabajo de investigación, en su robustez para poder cargar esa cantidad de peso a la velocidad ya descrita.

Así mismo, de poder subir pendientes sin deslizarse y pueda cumplir su labor de rescate sin pasar contra tiempos. Algo a mejorar sería el tamaño o medidas que tiene Big Dog, porque al ser tan grande, no le permite ingresar a espacios reducidos para poder rescatar víctimas cuando se da un derrumbe de vivienda o edificio.

## **Justificación y motivación**

En este trabajo de tesis se busca incentivar el uso de la robótica en el campo social. Esto significa, poder utilizar cada vez más, robots que permitan tomar el lugar del hombre, en este caso bomberos y rescatistas, en trabajos que impliquen alto riesgo. Es importante aclarar que no es aumentar el nivel de desempleo permitiendo que robots tomen el lugar de un hombre en cierto tipo de empleo que este desarrolla, sino que sea un complemento cuando este necesite apoyo durante acciones que puedan causarle algún daño físico e inclusive llevarlo a la muerte.

Además, no solo sería de ayuda para las profesiones que se mencionaron con anterioridad, sino también a personas naturales como tú y yo que no estamos libres a que nos ocurra algún tipo de catástrofe causada por la fuerza de la naturaleza y queramos saber dónde se encuentra un familiar que, puede darse el caso, se encuentre atrapado en los escombros que este acto puede causar.

Para ilustrar dos ejemplos de tipos de catástrofes a la que un robot de rescate puede ser de gran ayuda es, en primer lugar, lo que sucedió en Oyón en donde las tareas de rescate tomaron

más de 22 horas obteniendo un total de trece fallecidos y solo dos personas vivas. Aún más crítico es lo que sucedió en Bangladesh en el año 2013. Aquí se produjo el derrumbe del edificio Rana Plaza de ocho pisos, dedicado a la confección de ropa de marca como The Gap, Adidas, etc.

Este acontecimiento trajo consigo un total de 1129 personas fallecidas, 2438 rescatadas y otras con lesiones debilitantes de por vida. Las labores de búsqueda y rescate duraron en total 17 días conociéndose la historia de sobrevivencia de Resham Begum, una joven de 19 años que sobrevivió bajo ruinas de concreto y hierro todo el tiempo en el que demoraron en rescatarla [14].

Situaciones como las descritas, no pueden repetirse. Lamentablemente, el tiempo que demora las labores de rescate de víctimas bajo escombros es muy amplio por razones ya descritas con anterioridad y trae como consecuencia el fenecer de personas que se ven inmersas a causa de negligencias de otras. Por este motivo, implementar robótica sería necesario para ayudar a los bomberos y rescatistas a que su labor tenga la menor duración posible. De esta forma, se pudieron haber evitado la cantidad de muertes que han suscitado.

Por último, lo que se desea es que el robot tenga la posibilidad, en un futuro, de ser utilizado en diversas áreas de nuestras vidas y también en industrias grandes. Por ejemplo, para repartir y entregar paquetes, cuidar de niños y adultos mayores o servir como guía turística. Para el caso de utilización en industrias grandes, serviría para minería, agroindustrias, apicultura, etc.

## **Objetivo general**

Diseñar el sistema mecánico y realizar un análisis cinemático de un robot reconfigurable capaz de ingresar por áreas de acceso con medidas de 20 *cm* de alto y 20 *cm* de ancho para que ayuden a bomberos a disminuir el tiempo durante las labores de rescate.

## **Objetivos específicos**

1. Realizar el cálculo cinemático del modelo de robot y simular su comportamiento implementando datos reales en un entorno virtual en los softwares MATLAB-SIMULINK.
2. Realizar el análisis estático mediante el software ANSYS de los elementos más críticos que forman parte del robot.
3. Demostrar mediante el uso de SIMULINK, la utilidad de tener unas ruedas tipo aspas reconfigurables que sean capaces de atravesar distintos tipos de terrenos.

4. Realizar una simulación del comportamiento del robot bajo algunas circunstancias reales a las que se podría enfrentar realizando su labor.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

En la introducción, se mencionó cómo afecta un solo desastre natural a la vida humana. En este capítulo nos centraremos en conocer, en primer lugar, la zona por donde actuará el robot y quiénes lo operarán. Luego, se conocerá a detalle los tipos de locomoción que existen hoy en día y se le dividirá en cuatro grupos: Patas, eslabones, ruedas y otros. Es por eso que los robots híbridos poseen dos tipos de locomoción en un mismo sistema.

Posteriormente, se mencionarán las características más importantes que deben tener los sistemas de locomoción de un robot, así mismo, cada uno tendrá criterios de evaluación divididos en rangos bajo, medio y altos. También, se conocerá a qué se refiere cuando se habla sobre grados de libertad, es decir, qué movimientos cumplirá el robot en el espacio. Por último, se mencionará brevemente la cinemática directa e inversa en el diseño, explicándose de manera más detallada con el ejemplo de diseño de un robot con sistema de locomoción del tipo ruedas.

## 1.1. Áreas en una zona de desastre

Como se mencionó con anterioridad, la ocurrencia de derrumbes debido a movimientos sísmicos, debilitamiento de viviendas, etc. traen consigo pérdida de víctimas que muchas veces, sin desearlo, terminan heridas o difuntas. Lo que no se sabe es cómo se distribuye el espacio en dicho desastre, a continuación, se muestran las tres zonas y se mencionará en dónde se moverá el robot:



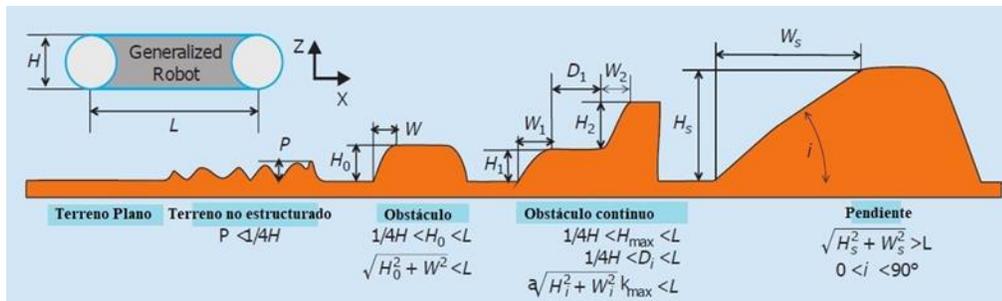
Figura 1.1 Áreas de zonas luego de un desastre [1].

- Zona caliente: Es el lugar en donde las víctimas serán rescatadas o en donde se llevó a cabo el desastre. Solo ingresan a este lugar los equipos de rescate y/o personas especializadas en realizar dicha labor. Esta zona puede extenderse un poco más allá del sitio colapsado como tal, debido a posibles derrumbamientos que puedan ocurrir en un futuro. Frecuentemente, esta zona es insegura, forzando a los equipos de rescate, como por ejemplo USAR Perú, a actuar con cuidado para no provocar más heridos y evitar nuevos derrumbamientos. En ella el movimiento de los equipos de rescate está restringido, y a menudo hay una ventilación pobre, lo que implica frecuentemente que los equipos de rescate deban llevar bombas de oxígeno.

- Zona Tibia: Es en esta zona donde suelen estar los jefes de los equipos de rescate, así como parte del personal médico. Las familias de los afectados, también suelen estar en esta zona.
- Zona fría: Es en esta zona donde se suelen situar las tiendas de campaña para heridos y donde se gestiona su traslado al hospital con ambulancias. Esta zona, a diferencia de las otras dos, no está restringida al público ni a la prensa [17].

Es importante mencionar, que el robot cumplirá su labor en la zona caliente.

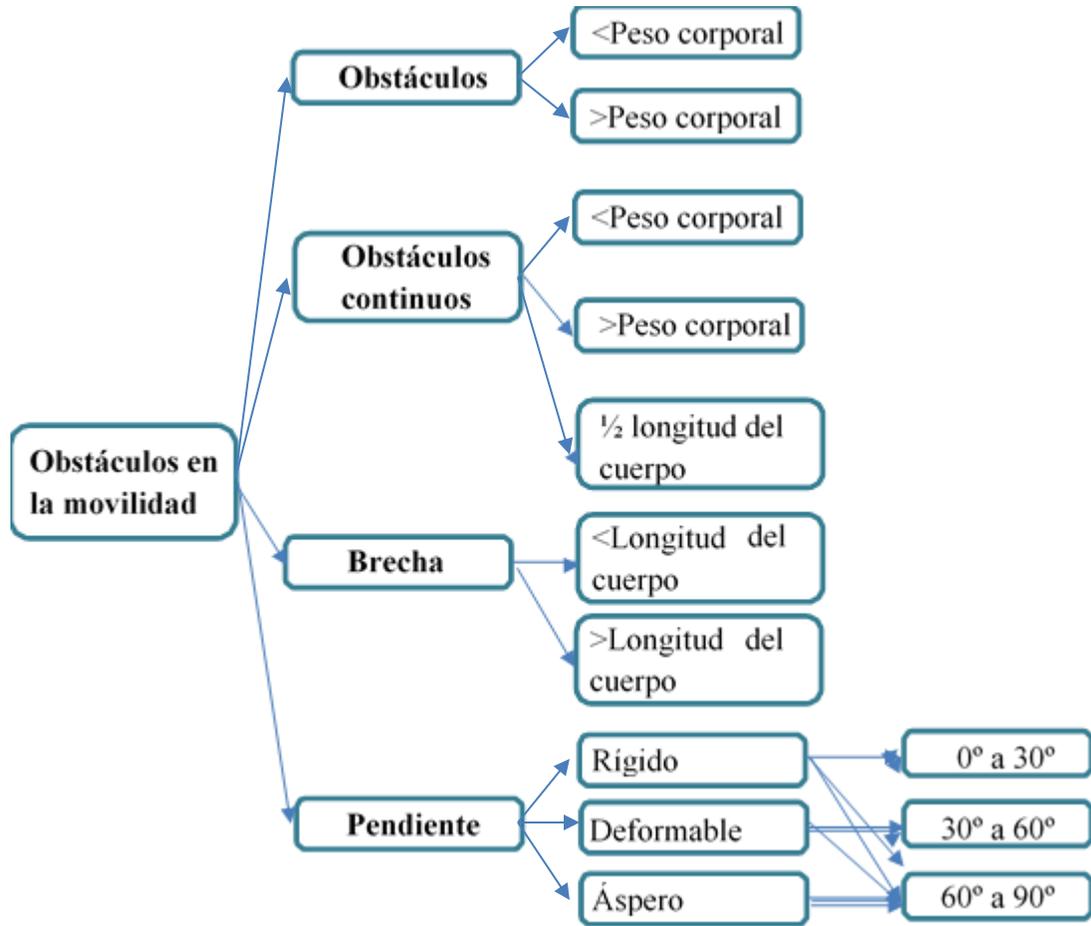
Ahora ¿por qué es relevante saber en qué zona actuará el robot? A continuación, se recalca, que mediante una entrevista hecha a un miembro del Cuerpo General de Bomberos del Perú el robot debe tener una medida máxima de 20 cm, para que no tenga ningún problema en ingresar por lugares pequeños, es por eso que se plantea el uso de un robot reconfigurable, que sea capaz de poder ingresar por lugares de hasta 10 cm. Sin embargo, también se debe conocer los tipos de obstáculos a los que estará expuesto el robot durante su operación, es por eso que se presenta la Figura 1.2 y 1.3. La segunda, es un mapa que describe las características físicas que debe tener el robot mientras atraviesa estos tipos de obstáculos.



**Figura 1.2** Tipos de obstáculos a los que está expuesto el robot durante su operación [4].

En primer lugar, en la figura 1.2, se observa un terreno plano, sin problemas. Luego, un terreno difícil en donde P significa la distancia que existe entre el punto más alto de dicho obstáculo hasta el punto de referencia que es el piso plano. Posteriormente, se muestran los valores de  $H_0$  y  $W$ , el primero es la altura que puede tener el obstáculo a atravesar y el segundo es la distancia que existe entre el inicio del obstáculo y el radio de curvatura que tiene el mismo a una determinada altura. En cuarto lugar, tenemos un obstáculo continuo, es decir, que posee dos alturas diferentes como lo son  $H_1$  y  $H_2$  y dos distancias  $W_1$  y  $W_2$ . Por último, tenemos una

pendiente con un ángulo de inclinación “ $i$ ” que varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , además,  $H_s$  es la altura y  $W_s$  es la distancia horizontal que tiene la pendiente.



**Figura 1.3** Obstáculos en movilidad del robot.

## 1.2. Estado del arte

La tecnología no deja de innovarse cada año, más aún en lo que respecta a la tecnología robótica en donde, por supuesto, los pioneros son las universidades mexicanas, japonesas y chilenas. Esta última se encarga optimizar los procesos mineros mediante la implementación, en planta de dicha tecnología. Sin embargo, en este caso nos centraremos en las innovaciones que existen en la robótica orientada a labores de rescate y que presenten una principal característica que es ser reconfigurable.

A continuación, se detallan dos robots reconfigurables, teniendo en primer lugar a Mori.

### **1.2.1. Robot Mori**

Sus parámetros de diseño se seleccionaron cuidadosamente para lograr un grosor bajo, simplicidad, funcionalidad y actuación en cada interfaz de un triángulo equilátero para que sea reconfigurable, modulado y posea una movilidad similar a la del origami.

El primer prototipo de Mori es un robot plano de forma triangular. Es móvil en terreno plano, se puede conectar a otros módulos de este tipo y puede pasar de formas bidimensional a estructuras tridimensionales. Además, el prototipo es autónomo con control a bordo, actuación e integración de sensores, con la excepción de la fuente de alimentación. El sistema robótico de origami logra modularidad a través de los mecanismos de activación, que en su combinación explican las características clave del robot. Cada lado de un módulo contiene elementos sobresalientes y receptores de ambos mecanismos, lo que permite conectar cualquier lado de un módulo a cualquier lado de otro. Los dos mecanismos sin género se ilustran en la Figura (1.4b) y (1.4c).

Como un perfil bajo es deseable en los robots de origami para permitir un ángulo de plegado máximo, la selección de componentes se enfoca en minimizar el grosor total del robot. Las dimensiones restantes se definen principalmente por un diseño mínimo que alberga todos los mecanismos y componentes necesarios con un peso mínimo. El cuerpo principal de Mori tiene un grosor de 6 mm y la longitud lateral del triángulo equilátero formado por los ejes de acoplamiento es de 80 mm. Se fabrica con una impresora 3D (Objet Connex 500). El peso total del prototipo de Mori es de 26 g, de los cuales más de dos tercios son consumidos por los mecanismos de actuación de la Figura (1.4b).

La actuación es proporcionada por un motor de paso fijado en paralelo al eje de acoplamiento, Faulhaber FDM0620, 6 mm de diámetro, 0.25 mN·m (Mili Newton metro) de par de apriete, ángulo de paso de 18°, se eligió un motor de paso, ya que tiene un tamaño fijo, lo que permite el control de posición de bucle abierto, proporciona un par de retención y puede girar libremente si es necesario. Se adjunta un reductor planetario con una relación de 256: 1 para aumentar el par efectivo y reducir el tamaño del paso. Se instala un sistema de engranaje

secundario que consta de tres engranajes rectos con relaciones 1: 1: 1.2 para trasladar el accionamiento del motor al eje de acoplamiento [25].

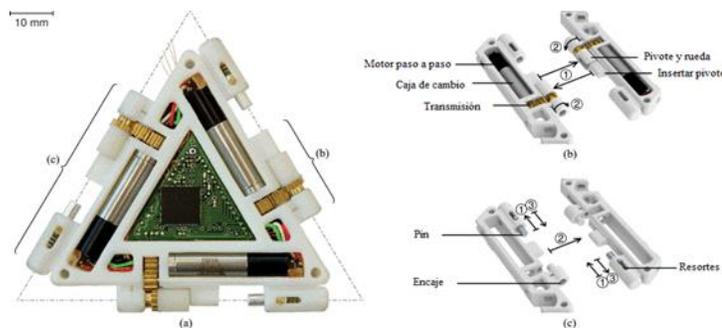
Un pivote ranurado está unido al engranaje final en el sistema de transmisión, formando la parte activa del mecanismo de accionamiento. Este pivote en forma de U está integrado en la carcasa. Los mecanismos de actuación de dos módulos se juntan, como se indica en 1 en la Figura (1.4b). La parte pasiva de un módulo se inserta en el pivote de otro de tal manera que cuando se aplica un par al pivote hace que los dos módulos se plieguen entre sí, denotado por 2 en la misma figura.

El mecanismo de acoplamiento, que se opera manualmente, consiste en un pasador con resorte que ingresa al zócalo de otro módulo. El pasador se retrae primero, denotado por 1 en la Figura (1.4c), y los dos módulos de acoplamiento se unen alineando sus ejes de enganche, denotados por 2. El pasador se libera de manera que el mecanismo de resorte bloquee los dos ejes de compromiso entre sí, denotados por 3 en la misma figura. De este modo, se forma una bisagra que restringe el movimiento radial y axialmente de modo que solo es posible plegar alrededor del eje de acoplamiento cuando se conectan dos módulos.

Con respecto a su performance, es importante mencionar que cada módulo es autónomo y tiene tres sistemas de actuación separados. Las señales del motor para cada sistema de actuación se actualizan a una frecuencia de 800 Hz, lo que da como resultado una velocidad máxima del motor de 200 pasos por segundo (un paso es  $0.06^\circ$ ) o 2 rpm. El par motor efectivo en el eje de acoplamiento de un módulo es de alrededor de  $30 \text{ mN}\cdot\text{m}$ , lo que representa las relaciones de transmisión y la eficiencia de la transmisión. Por lo tanto, cuando se conectan dos módulos y su actuación está sincronizada, el par efectivo en la bisagra es de  $60 \text{ mN}\cdot\text{m}$ . Considerando un peso de 26 gramos, un brazo de momento de 23 mm, el torque requerido para levantar un módulo desde una posición horizontal es de  $5.9 \text{ mN}\cdot\text{m}$ .

Conectando dos módulos adicionales a los bordes restantes del módulo que se está levantando, el par requerido para levantarlos desde una posición horizontal aumentará a  $30 \text{ mN}\cdot\text{m}$ . Levantar un total de seis módulos conectados en un hexágono desde uno de sus bordes externos requeriría un torque total de  $106 \text{ mN}\cdot\text{m}$  por bisagra, lo que excede las capacidades del sistema actual [25].

Sin embargo, las estrategias de reconfiguración se pueden ajustar para minimizar el par máximo experimentado por cada junta en un momento dado, lo que aumenta la probabilidad de que se pueda lograr un objetivo. Por ejemplo, conectar tres módulos a uno central produce un triángulo equilátero del doble de la longitud lateral. Si los cuatro módulos están completamente ensamblados, el peso total de la configuración es de 104 g. El par correspondiente requerido para levantar el módulo central de una posición horizontal usando solo uno de sus módulos vecinos es 70 mN·m, excediendo la capacidad del sistema actual. Sin embargo, esto se puede superar mediante el uso inicial de múltiples módulos vecinos para levantar el centro y luego bajar las juntas restantes hasta alcanzar la posición deseada. Por lo tanto, la posibilidad de transformar una configuración bidimensional o tridimensional en otra forma 3D está sujeta a optimización.



**Figura 1.4** Robot origami Mori [10].

### 1.2.2. Robot Rising STAR

Su pequeño tamaño, bajo peso y alta navegabilidad permiten su despliegue en grandes cantidades para inspeccionar rápidamente un área grande. El diseño de mecanismos mínimamente accionados es imperativo en esta escala dada la dificultad inherente de implementar articulaciones de piernas activas controladas. Elementos mecánicos pasivos como el uso de patas elásticas y sistemas de amortiguación para lograr una alta velocidad mientras se mantiene la estabilidad como la de los insectos.

El objetivo principal del diseño de RSTAR es lograr un robot altamente maniobrable capaz de andar sobre diferentes terrenos y superar obstáculos. El robot también debe ser liviano y capaz de transportar las cargas útiles sustanciales que se requieren para realizar misiones de búsqueda y rescate, incluidas cámaras, equipos de comunicación y sensores. Uno de los requisitos clave era mantener el costo de transporte (COT) del robot lo más bajo posible. Estos objetivos se logran mediante la combinación del ángulo de expansión activa junto con el FBEM que permite

al robot transformar su cinemática y cambiar sustancialmente sus dimensiones para superar obstáculos.

RSTAR tiene un núcleo de cuerpo rígido que contiene los controladores, las baterías a bordo y los mecanismos de expansión y FBEM. Cada uno de estos mecanismos es accionado por un solo motor que se encuentra a bordo del cuerpo principal, y ambos lados del robot están en fase y se mueven simétricamente en relación con su centro. Cada conjunto de patas es accionado por un motor separado. En total, el robot tiene cuatro motores.

Primero, el mecanismo de expansión es el ángulo relativo entre las piernas y el cuerpo principal, como se presenta en la Figura.1.5, forma el ángulo de expansión  $\rho$ , que se define como  $\rho = 0$  cuando las piernas son coplanares con el suelo (el sentido positivo del ángulo de expansión es hacia abajo). Los ángulos de expansión en ambos lados se accionan simétricamente a través de un único motor y mecanismo para asegurar una expansión idéntica en ambos lados.

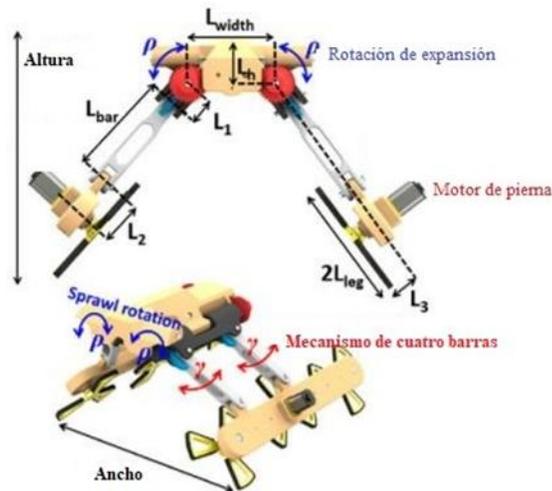
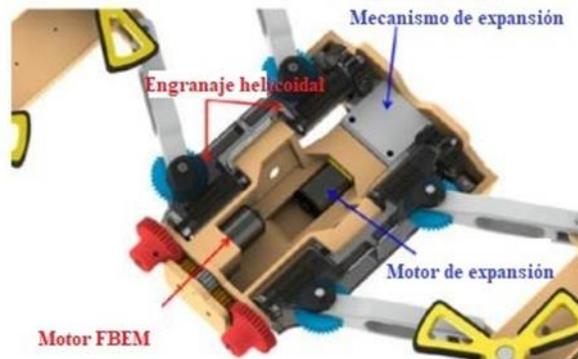


Figura 1.5 Robot RISING STAR [10].

En segundo lugar, el mecanismo de extensión de cuatro barras (FBEM) es el presentado en la Figura.1.6, está unido al mecanismo de expansión y gira junto con él. Las dos barras paralelas del FBEM que conectan el mecanismo de expansión al conjunto de las patas tienen una longitud idéntica ( $L_{bar}$ ) y están sincronizadas para girar a la misma velocidad usando los engranajes helicoidales concéntricos que están unidos al mismo eje. El ángulo de rotación del

mecanismo de cuatro barras se denota por  $\gamma$  y se puede variar de  $(+ 72^\circ$  a  $-72^\circ)$ . El ángulo de rotación  $\gamma$  es cero cuando las dos barras son perpendiculares al cuerpo y las patas.



**Figura 1.6** Robot RISING STAR2 [10].

RSTAR se acciona con 4 motores. Utilizamos motores estándar de 12 mm de diámetro (6–9 voltios fabricados por Pololulu que están disponibles con codificadores que se pueden comprar a diferentes relaciones de transmisión). Las cajas de cambios con diferentes relaciones de transmisión son del mismo tamaño, lo que simplifica su reemplazo sin tener que modificar ninguna otra parte. Cada conjunto de patas es impulsado por un solo motor (para velocidades más altas usamos la relación de transmisión más baja de 1: 100 y para escalar usamos una relación de transmisión de 1: 300 que proporciona un torque de 0.18 Nm y 0.5 N.m respectivamente). La alta relación asegura una salida de alto par y una velocidad constante. El robot se alimenta con dos baterías LiPo de 3.7 voltios y 800 mAh conectadas en serie.

Asimismo, analizamos la cinemática y la dinámica del robot; por esta razón, se presentan las diferentes configuraciones que el robot puede lograr y se evalúan los requisitos de torque de los motores en función de las fuerzas externas. Este análisis de fuerza y par se implementó durante el diseño del robot y la elección del motor (con un factor de seguridad de 3-4). En el siguiente análisis usamos los valores dados del robot real:  $m_{body} = 182$  gramos,  $m_{leg} = 57$  gramos,  $L_{bar} = 5$  cm,  $L_{leg} = 2.7$  cm,  $L_1 = 2$  cm y  $L_2 = 2$  cm.

Con respecto al análisis cinemático, la posición de los puntos de contacto de las patas del RSTAR con la superficie, en relación con su cuerpo, es una función del ángulo de expansión y la orientación FBEM. El volumen de trabajo de las patas constituye una carcasa bidimensional

como se ilustra en la Figura.1.7. Denotando el término  $L_1 + L_2 + L_{leg} + L_{bar} \cdot \cos \gamma$  por  $L_t$ , el ancho del punto de contacto de las ruedas o ruedas de radios de las piernas se define como:  $ancho = L_w - L_3 \cdot \sin \rho + 2L_t \cdot \cos \rho$ ; debido a que el robot puede mover la orientación del mecanismo FBEM de  $72^\circ$  negativo a  $72^\circ$  positivo, las patas pueden moverse en la dirección de proa a popa en relación con el cuerpo.



**Figura 1.7** a) Una vista frontal que muestra el volumen de trabajo del ángulo de expansión. b) Una vista superior que muestra el volumen de trabajo de la FBEM [17].

### 1.3. Patrones de locomoción

En este punto recae la importancia de cada sistema de locomoción de un robot para analizar, posteriormente, su cinemática. Conocer qué movimientos realizará durante el instante en el que ejecuta su tarea y si lo hace con eficiencia. En síntesis, la ventaja de utilizar patrones de diseño es aprovechar soluciones bien aprobadas, es decir, que sean capaces de atender problemas recurrentes que durante su funcionamiento puedan presentarse.

Los patrones de diseño se presentan de tres formas diferentes: Contexto (lugar en donde se desarrollará el robot), problema (cuál es la situación a mejorar) y la solución (alternativa para dar respuesta al problema) [18]. Por ejemplo, como alternativa de solución, al observar la figura 1.8 vemos  $\omega_d$  y  $\omega_i$  las velocidades angulares de las ruedas tanto derecha como izquierda, definiéndose la velocidad lineal del robot como:

$$V = \frac{\omega_d + \omega_i}{2} \cdot r \quad (1.1)$$

Donde  $r$  es el radio de la rueda y  $V$  es la velocidad lineal.

Asimismo, para conocer la velocidad de rotación se plantea la siguiente ecuación:

$$\theta_r = \frac{\omega_d - \omega_i}{L} \cdot r \quad (1.2)$$

Donde  $L$  es la distancia que existe entre el centro de cada rueda.

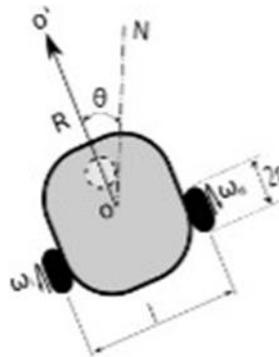


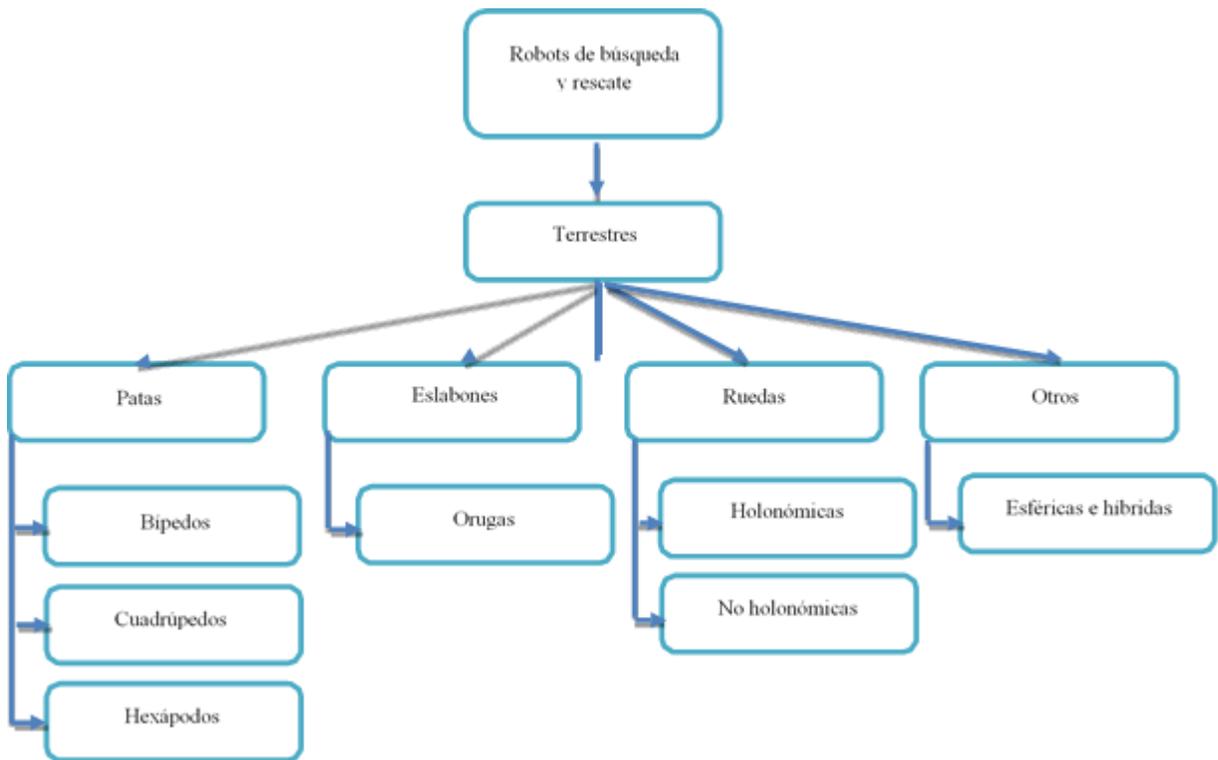
Figura 1.8 Robot diferencial con locomoción de tipo ruedas [20].

De lo anterior, se deduce que, si las velocidades angulares son iguales, el robot seguirá una trayectoria rectilínea y de existir una diferencia se sabrá para qué lado se moverá [19].

Como se ha mostrado, se plantea una solución matemática a un problema propuesto y a partir de ahí se define el diseño que tendrá el robot.

### 1.3.1. Sistemas de locomoción actuales

Para los robots terrestres, los sistemas de locomoción más comunes son los que se describen a continuación:

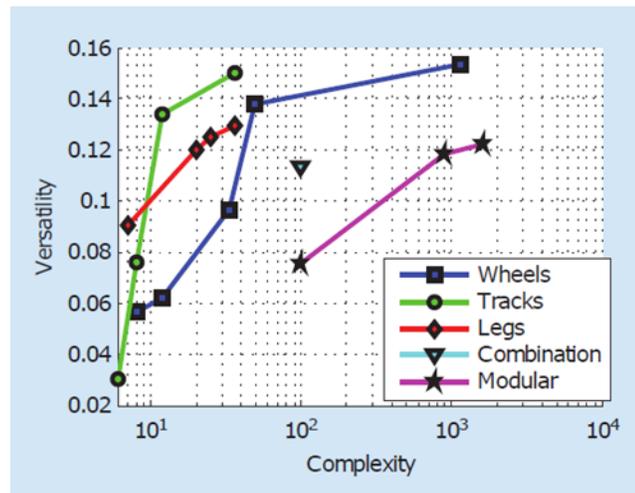


**Figura.1.9** Tipos de locomoción en robots de rescate de tipo terrestre.

Muchos estudios se han realizado para conocer cómo se van a aplicar los diversos sistemas de locomoción, en este caso, para conocer la versatilidad que tendrá el robot desarrollado en este trabajo de tesis. La dificultad en el diseño mecánico reconfigurable se centrará, básicamente en escoger qué tipo de locomoción es el que se usará, el número de actuadores, estudios cinemáticos y estudios dinámicos.

Luego, en la figura 1.10, se pueden observar los límites superiores que presenta cada tipo de locomoción. Esta imagen muestra que un sistema hecho con ruedas presenta una complejidad alta, pero a su vez una versatilidad alta, esto quiere decir que es muy apto ante cualquier tipo de dificultad que le presente el terreno. Posteriormente, tenemos el sistema de tipo oruga que, posee una complejidad baja, pero versatilidad alta. Así mismo, el sistema de tipo patas posee una complejidad no tan elevada pero una versatilidad ante cualquier tipo de terreno que hace que sea mucho más útil a comparación que el de ruedas. Ante esto, surge un nuevo tipo de sistema de locomoción y ¿con qué fin? El de mejorar los movimientos de los robots de rescate, para esto se plantea la unión de dos sistemas combinándolos de distintas formas que se detallarán a continuación [17]:

1. **Ruedas y patas:** En este punto, las ruedas son las que tocan el piso y van adheridas a patas que permiten que el robot atraviese distintos tipos de dificultades sin problema alguno.
2. **Orugas con funcionamiento tipo patas:** Son en total cuatro orugas de las cuales las dos delanteras funcionan como patas y le permiten subir escaleras.
3. **Ruedas y orugas:** El robot tiene 4 ruedas y 4 orugas que juntas permiten que el robot se pueda mover en distintas direcciones.



**Figura.1.10** Diseño y Simulación del Sistema de Locomoción de un Robot para Tareas de Búsqueda y Rescate.

### 1.3.2. Descripción de las características de los sistemas de locomoción

A continuación, se detallan características de los diferentes sistemas de locomoción. Es importante señalar que se describirá, posteriormente, cada característica:

Sistema de locomoción	<b>Ruedas (R)</b>	<b>Orugas (O)</b>	<b>Patas (P)</b>	<b>Híbrido (R y P)</b>	<b>Híbrido (O y P)</b>	<b>Híbrido (R y O)</b>
Características						
<b>Velocidad máxima</b>	Alta	Mediana/ Alta	Baja/ Mediana	Mediana/ Alta	Mediana	Mediana/ Alta
<b>Cruce de obstáculos</b>	Baja	Mediana/ Alta	Alta	Mediana/ Alta	Alta	Mediana
<b>Subir escaleras</b>	Baja	Mediana	Alta	Alta	Alta	Mediana
<b>Escalar pendientes</b>	Baja/ Mediana	Alta	Mediana/ Alta	Mediana/ Alta	Alta	Mediana/ Alta
<b>Operación en terrenos blandos</b>	Baja	Alta	Baja/ Mediana	Baja/ Mediana	Mediana/ Alta	Alta
<b>Operación en terrenos irregulares</b>	Baja	Mediana/ Alta	Alta	Alta	Alta	Mediana/ Alta
<b>Eficiencia energética</b>	Alta	Mediana	Baja/ Mediana	Mediana/ Alta	Mediana	Mediana/ Alta
<b>Complejidad mecánica</b>	Baja	Baja	Alta	Mediana/ Alta	Mediana/ Alta	Baja/ Mediana
<b>Complejidad de control</b>	Baja	Baja	Alta	Mediana/ Alta	Mediana/ Alta	Mediana
<b>Disposición de tecnología</b>	Completa	Completa	Completa/ en progreso	Completa	Completa	Completa

**Tabla 1.1** Características de los sistemas de locomoción.

Como observamos en la tabla 1.1 se tienen distintas características para cada sistema de locomoción; sin embargo, el sistema híbrido de tipo orugas, que funcionan como patas, tienen el mejor funcionamiento a comparación del resto. Las características descritas en la tabla tienen el siguiente significado:

- Velocidad máxima: Velocidad máxima en superficies planas en ausencia de obstáculos.
- Cruce de obstáculos: Capacidad de cruzar obstáculos con formas aleatorias en entornos no estructurados.
- Subir escaleras: Capacidad de subir peldaños de escaleras en entornos estructurados.
- Escalar pendientes: Capacidad de escalar pendientes con un coeficiente de fricción mayor a 0.5.
- Operación en terrenos blandos: Capacidad de operar en terrenos de arena.
- Operación en terrenos irregulares: Capacidad de operar en terrenos irregulares como rocosos, piso mojado, barro, etc.
- Eficiencia energética: En condiciones normales de operación, terrenos planos y compactos.
- Complejidad mecánica: Nivel de complejidad de la arquitectura mecánica.
- Complejidad de control: Complejidad del sistema de control (hardware y software).
- Disposición de tecnología: Nivel de madurez en las tecnologías empleadas para la realización del sistema [20].

De las características mencionadas con anterioridad, es importante mencionar que las primeras siete describen cómo será el rendimiento del robot cuando este se mueva, así mismo las últimas tres describen qué tan complejo será el sistema. Los criterios propuestos para evaluar las primeras siete características se muestran en la tabla 1.2. con lo ya establecido en la tabla 1.1.

Característica	Criterios de evaluación	Rangos		
		Bajo	Medio	Alto
<b>Velocidad máxima</b>	Relación entre la velocidad máxima y la longitud total del robot.	<0.5 m/s	0.5-3 m/s	>3 m/s
<b>Cruce de obstáculos</b>	Relación entre la altura máxima de un obstáculo con un perfil lateral semicircular que se puede cruzar y la altura del robot.	<0.25	0.25-0.5	>0.5
<b>Subir escaleras</b>	Relación ente la altura máxima del escalón cuadrado que se puede cruzar y la altura del robot.	<0.15	0.15-0.35	>0.35
<b>Escalar pendientes</b>	Pendiente máxima que se puede escalar (superficie compacta, coeficiente de fricción >0.5).	<15°	15-30°	>30°
<b>Operación en terrenos blandos</b>	Capacidad de caminar sobre:	Suelo compacto	Suelo medio a blando	Arena suave
<b>Operación en terrenos irregulares</b>	Relación entre la rugosidad máxima del terreno que se puede cruzar (terreno rocoso) y la altura del robot.	<0.1	0.1-0.2	>0.2
<b>Eficiencia energética</b>	Relación entre la energía potencial gravitacional final adquirida al subir una pendiente a baja velocidad y la energía suministrada a los actuadores.	<0.1	0.1-0.35	>0.35

**Tabla 1.2** Criterios de evaluación de las características.

En la capacidad que debe tener el robot para cruzar obstáculos sobre terrenos no estructurados, se selecciona aquel en donde el terreno es de forma semi circular. Sin duda, para este tipo de terrenos y en donde se necesite escalar peldaños de escalera la combinación de ruedas y patas sería la ideal. Sin embargo, si la tarea se realiza sobre terrenos blandos y flexibles, es preferible mejorar la movilidad del robot agregando orugas en lugar de patas, esto debido a que las orugas presentan una superficie de contacto más grande, mientras que las patas son más eficientes para obstáculos rígidos con formas complejas.

Los criterios fundamentales de elección del diseño son la complejidad mecánica y la complejidad del control. En particular, la complejidad mecánica tiene una influencia significativa en la fiabilidad operativa del robot, tanto en términos del tiempo medio entre fallas como del tiempo medio de reparación. En este sentido, los robots con orugas y ruedas son evidentemente simples y robustos.

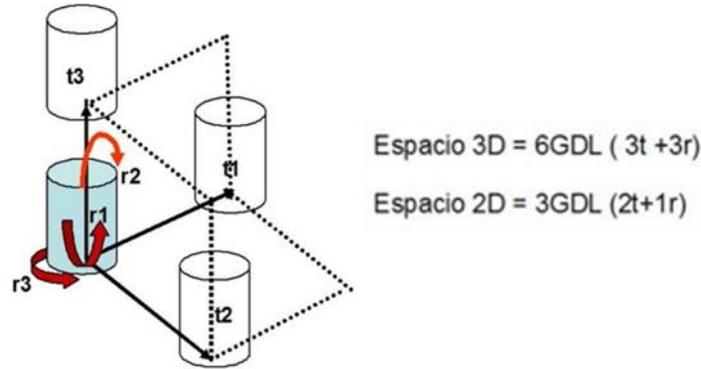
De acuerdo a la complejidad del control, esto es evidentemente mayor para las soluciones que involucran patas debido a los requisitos de planificación de la marcha. Sin embargo, solo estas arquitecturas, especialmente si están controladas por algoritmos dinámicos basados en modelos, pueden proporcionar el mejor rendimiento en el cruce de obstáculos y la escalada en entornos no estructurados.

A partir de estas consideraciones generales, la combinación adecuada de sistemas de locomoción para soluciones híbridas se puede seleccionar en función de los requisitos específicos de la tarea [20].

#### **1.4. Grados de libertad de un robot y espacio de trabajo**

Mecánicamente, un robot se encuentra conformado por un conjunto de eslabones, como se mencionó con anterioridad. Estos eslabones unidos permiten el movimiento relativo entre dos o más articulaciones de manera consecutiva. En síntesis, es cada uno de los movimientos de desplazamiento y rotación que puede realizar el robot [21]. Por ejemplo:

- Un cuerpo que se mueve en dos dimensiones tiene 3 grados de libertad (una rotación y 2 traslaciones).
- Un cuerpo que se mueve en tres dimensiones tiene 6 grados de libertad (3 rotaciones y 3 traslaciones).



**Figura 1.11** Definición gráfica de GdL [21].

Cuando se tiene un espacio geométrico en donde un robot pueda definirse tanto en posición como orientación, se dice que hacen falta  $N_p$  grados de libertad para definir su posición y también  $N_0$  que definan su orientación. De esta manera, para posicionar y orientar el extremo de un robot adecuadamente en un espacio de dimensión  $M$ , se necesitará de un número mínimo  $N$  de GdL dados por la ecuación 1.3 (Bernal, Flowers-Cano et al. 2009).

Por ejemplo, probemos con un espacio geométrico tridimensional en donde “ $m$ ” toma el valor de 3. En este caso y según la ecuación mostrada en 1.3, se necesitaría 6 GdL para que el robot pueda posicionarse y orientarse en dicho espacio.

$$N = N_p + N_0 = m + \frac{m \cdot (m - 1)}{2} = m \cdot \frac{(m + 1)}{2} \quad (1.3)$$

Entonces, si nos ponemos en posición a la ecuación mencionada existen tres posturas: La primera es cuando decimos que un manipulador no es redundante. Aquí es cuando  $N < m$ , es decir, cuando tiene una cierta cantidad de grados de libertad menor que el tipo de espacio geométrico que lo rodea. La principal desventaja es que, en este caso, el manipulador no podrá desenvolverse de la mejor manera en su espacio de trabajo. Caso contrario es con la segunda postura ( $N = m$ ). En este caso el manipulador sí podrá desenvolverse de la mejor manera en su espacio de trabajo. Por último, tenemos  $N > m$  en donde el manipulador tiene mayores grados de libertad que los que necesita, por lo que se dice que tiene redundancia cinemática [22].

Sin embargo, también se tienen los manipuladores hiper redundantes que son los que tienen la mayor capacidad cinemática que existe, siendo su principal característica el poder envolver un objeto con su propio cuerpo o locomociones según sea el caso (Figura 1.12.c). Como

se observa en (Figura.1. 12.a) un robot tipo  $N < m$ , no podrá envolver a ningún objeto utilizando su estructura. Un robot no redundante de tipo  $m = n$ , atendiendo también a (Figura 1.12.b), tiene el mínimo número de GdL para posicionar y orientar su extremo adecuadamente, y teóricamente será capaz de alcanzar su base con su extremo pudiendo agarrar un objeto, pero entonces su manipulabilidad se verá reducida. A medida que aumente el número de GdL, el robot será redundante y podrá encerrar un objeto con una mayor manipulabilidad, aunque todavía siendo incapaz de posicionar y orientar dicho objeto adecuadamente (Figura 1.12.c).

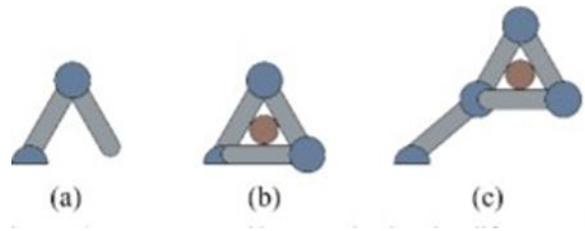


Figura 1.12 (a) Robot no redundante del tipo  $N < m$ . (b) Robot no redundante de tipo  $N = m$ . (c) Robot redundante de tipo  $n > m$ .

### 1.5. Modelado cinemático de un robot

Si bien es cierto, tenemos en la industria una variedad de robots que son capaces de realizar todo tipo de actividades que ayuden al hombre a cumplir su trabajo de una manera más eficiente. Sin embargo, un aspecto importante es que muchos de ellos tratan de copiar el movimiento que realiza el brazo humano, aunque con un solo grado de libertad de tipo rotacional o prismático [23].

Es importante señalar que, existe una relación entre la cinemática y dinámica al instante de diseñar un robot. Esto último es importante debido a que se debe saber qué tanta potencia debe ejercer los actuadores al tipo de locomoción que se quiera utilizar. Asimismo, el peso del robot tampoco puede verse afectado, esta característica debe ser controlada al instante de diseñar porque si no la destreza del robot será limitada como por ejemplo su velocidad de trabajo.

Si vemos el diseño de los robots industriales, en su cinemática es importante conocer las dimensiones que tendrá cada articulación para estimar el valor de peso que este tendrá. Para culminar, se sabe que la cinemática para robots se divide en dos aspectos: Cinemática directa e inversa. En los próximos puntos se explicarán, a detalle, cada una de las dos cinemáticas [24].

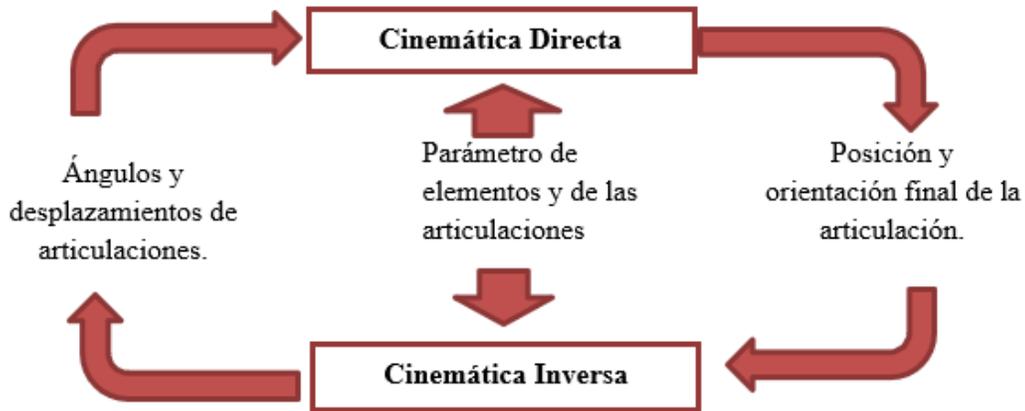


Figura 1.13 Problema cinemático

### 1.5.1. Cinemática directa de un robot

Cabe mencionar que lo que se desarrollará a continuación tiene como premisa conocer cómo es el movimiento del robot con respecto al tiempo sin considerar la dinámica. En síntesis, luego de definir la geometría de un robot, los ángulos (sabiendo que la articulación solo se moverá rotacionalmente) y desplazamientos (movimiento traslacional), se obtiene como resultado la posición y orientación final del robot en un espacio tridimensional [23].

El cálculo para la cinemática directa se da por medio de la representación Denavit-Hartenberg que es la más usada para el diseño de robots. Aquí, cada transformación homogénea “ $A_i$ ” es representada como el producto de cuatro transformaciones básicas:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (1.4)$$

De donde:

$$Rot_{z,\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$Trans_{x,a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\text{sen}\alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Entonces:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i\cos\alpha_i & \text{sen}\theta_i\text{sen}\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\text{sen}\alpha_i & a_i\text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Las cuatro representaciones  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$  son parámetros asociados con el eslabón  $i$  y la articulación  $i$ . Dado que la matriz  $A_i$  está representada por una única variable. Cada uno de los 4 parámetros representados por la matriz  $A_i$  están dados por sistemas de coordenadas de las articulaciones con respecto al sistema de coordenadas del elemento previo y de esta forma, utilizando transformaciones secuenciales, se llega a saber las coordenadas del efector final [21].

### 1.5.2. Cinemática inversa de un robot

Luego de saber la posición y orientación final del robot, se halla el conjunto de ángulos y/o desplazamientos articulares y geometría de eslabones que dan como resultado dicha posición y orientación final del robot [23]. En síntesis, la cinemática inversa se encarga de encontrar los valores de las coordenadas articulares del robot (valores de  $q$ ); conociendo la posición y orientación del extremo del efector [24]:

$$H = \begin{bmatrix} R & o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in SE(3) \quad (1.9)$$

Con  $R \in SE(3)$ , se debe encontrar todas las soluciones posibles para la siguiente ecuación:

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = H \quad (1.10)$$

Donde:

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = A_1(q_1), \dots, A_n(q_n) \quad (1.11)$$

En la cinemática inversa, el objetivo es encontrar las coordenadas nodales necesarias para alcanzar una posición y orientación determinadas del elemento terminal. Estos requisitos se integran en la matriz de transformación homogénea total  $T_n^0$ , que incorpora la orientación (3 primeras columnas) y la posición (columna 4) del elemento terminal como se presenta en la ecuación 1.11.

De la ecuación anterior,  $H$  representa la posición y orientación final que tendrá el efector final. Lo que se debe hallar son las variables “ $q$ ” de las articulaciones.

Es importante señalar que la cinemática inversa es la que se aplica con mayor frecuencia en el diseño de un robot. Esto debido a que en las diversas funciones que este debe cumplir, se necesita la posición final de su efector [24].

Además, existen un método que ayuda para aplicar la cinemática inversa. Este es el método geométrico. Este se usa para determinar las primeras variables en las articulaciones utilizando geometría y trigonometría. Lo adecuado sería que un robot no posea muchos grados de libertad para que el posicionar el efector final no se torne complicado. En síntesis, lo que se desea es encontrar relaciones geométricas de las coordenadas del efector final, coordenadas articulares y magnitudes del manipulador [21].

Esto permite encontrar variables cinemáticas (posición) o dinámicas (velocidad) a lo largo del camino tomando un punto inicial como referencia. Por eso, para generar trayectorias se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Establecer el punto inicial y final de la trayectoria del robot.
- Determinar las condiciones dinámicas iniciales.
- Luego de transformaciones inversas, cada punto se debe convertir en coordenadas articulares.
- Interpolar cada punto articular obtenido para generar trayectorias en función al tiempo.

## **1.6. Modelado estático de un robot**

- **Utilizando software ANSYS:**

El uso de este software ayudará a realizar distintos cálculos y dimensionamientos necesarios para asegurar la funcionalidad de cada pieza; sin embargo, en este caso nos centraremos en un análisis estático de los componentes que soportarán la mayor carga, este es el aspa y el plato que soporta los servos motores. El primero porque sostendrá el peso total del robot con menor área de contacto y el segundo por los pesos del piñón, servo motor y cremallera.

La utilización del software para el diseño y construcción de dispositivos en ingeniería hoy en día se encuentra en crecimiento. El uso también se debe al hecho de poder utilizar la simulación con el fin de pronosticar parámetros de procesamiento de nuevos materiales poliméricos [61] para la aplicación en la robótica.

- **Análisis de esfuerzos:**

Es un conjunto de fuerzas internas a las que está sometido un cuerpo como consecuencia de la aplicación de demandas o acciones que actúan sobre él. Para facilitar el análisis se separará cada pieza que compone el robot, como se mencionó en la sección anterior, en tres sólidos. El sólido uno es el cuerpo central del robot, el sólido dos es la rueda derecha y la izquierda, viene a ser el sólido 3. Las fuerzas internadas mencionadas en el párrafo anterior, son el resultado de la interacción de unas partículas del cuerpo sobre otras, llamadas también como hilos con características semejantes que son parte del material. A estas partículas llega el resultado de la acción que intenta deshacer el equilibrio que existía antes de que existiera dicha fuerza [61].

Las partículas que intentan mantener el equilibrio reaccionarán con un conjunto de otras fuerzas internas que intentarán mantener unido al cuerpo. Estas fuerzas internas y que no se observan a simple vista, son los llamados esfuerzo o tensiones. Partiendo de la premisa de optimizar y facilitar el proceso constructivo del robot, se debe seleccionar un determinado material, que posea una resistencia mecánica adecuada para las condiciones de trabajo del autómatas, sencilla maquinabilidad, una densidad menor que reduzca el peso, además de que sea auto lubricante para obtener un bajo coeficiente de tracción. Así podemos casi anular cualquier carga que ocasione esfuerzos en los actuadores.

Dependiendo de cómo sean las fuerzas de acción, y de las características del propio elemento se tendrá varios tipos: esfuerzos de tracción, compresión, flexión, torsión, cizalla y pandeo. Los elementos de las estructuras están pensados para resistir adecuadamente estos esfuerzos. Así, los principales esfuerzos mecánicos que tendremos en cuenta para el diseño del robot son los siguientes:

- Tracción: Esfuerzo que se origina aplicando dos fuerzas en sentido contrario. Frecuentemente se encuentran ubicadas en los extremos del cuerpo a analizar. Puede originar que este se estire hasta que una parte de su área o sección disminuya.
- Compresión: Esfuerzo que se origina aplicando dos fuerzas en sentido contrario; sin embargo, ambas apuntan al centro de la sección. Puede originar que aumente el área y disminuya la longitud.

En síntesis, el esfuerzo se obtiene cuando se divide la fuerza que se está aplicando al cuerpo entre el área o sección a la que está siendo aplicada (puede ser un área circular, por ejemplo). Sin embargo, es importante aclarar que tenemos dos tipos de fuerzas que se dividen en direcciones distintas: Las primeras que son normales al área y las segundas que son paralelas al área. Sin embargo, cuando la fuerza aplicada no es normal ni paralela, se debe descomponer de manera vectorial (se resuelve con suma simple de vectores). Como mencionamos en el párrafo anterior, cuando la fuerza es de tracción se define como  $\sigma_N = P/A$ , y significa que apuntan hacia afuera de la sección, tratando de elongar el material en cuestión. Caso contrario es cuando el esfuerzo y la fuerza es de compresión ya que apunta hacia la sección central, tratando de oprimir el material a analizar.

También se utiliza el análisis por elementos finitos, donde se determina el estado de esfuerzos existentes en el robot durante las condiciones normales de funcionamiento que este tendrá. Aquí se aplica la Teoría de Mohr Modificada, definiendo la estructura como anisotrópica. Además, este análisis permite determinar tres esfuerzos normales en cada uno de los eslabones que constituyen el diseño mecánico del robot desarrollado ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ ). Para determinar el factor de seguridad del dispositivo, se debe examinar el estado dinámico de la sección más esforzada, es decir, mediante la simulación en ANSYS se observan distintos colores entre azul, verde, naranja y rojo. Siendo este último el que muestra el área de la parte analizada del robot, como la más crítica. A partir de este estado de esfuerzos, se calculan los esfuerzos principales  $\sigma_i$  y el esfuerzo cortante máximo  $\tau_i$  según las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \tau_{m\acute{a}x} \quad (1.13)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (1.14)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \tau_{m\acute{a}x} \quad (1.15)$$

Para aplicar la teoría mencionada, se deben utilizar fórmulas para calcular el esfuerzo efectivo, el cual permite comparar los esfuerzos  $C_i$  aplicados respecto a los esfuerzos normales,

donde  $S_{Ut} > 0$  es la resistencia a la rotura a tracción y  $S_{Uc} < 0$  es la resistencia a la rotura a compresión. los primeros se obtienen a partir de las expresiones siguientes:

$$C_1 = \frac{1}{2} \left( |\sigma_1 - \sigma_2| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_1 + \sigma_2) \right) \quad (1.16)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left( |\sigma_2 - \sigma_3| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_2 + \sigma_3) \right) \quad (1.17)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} \left( |\sigma_3 - \sigma_1| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_1 + \sigma_3) \right) \quad (1.18)$$

- **Factor de seguridad:**

Para demostrar que el diseño realizado cuenta con una resistencia mecánica óptima, segura y estable, al estar sometida a cargas por encima de las necesarias, tomando en cuenta el desgaste al cual también puede estar sometida la misma, se toma en cuenta el factor de seguridad. El factor de seguridad es un índice que se introduce, incrementando los pesos y los costos de los productos en el diseño, para considerar el grado de incertidumbre en relación a las propiedades del material, los modelos utilizados para evaluar las cargas o las condiciones de trabajo. El cálculo del mismo está dado por la siguiente expresión:

$$F \cdot S_n = \frac{\text{Resistencia del material}}{\text{Esfuerzo de carga}} \quad (1.19)$$

Como se mencionó con anterioridad, para determinar el factor de seguridad del dispositivo, se examina el estado dinámico de la sección más esforzado.

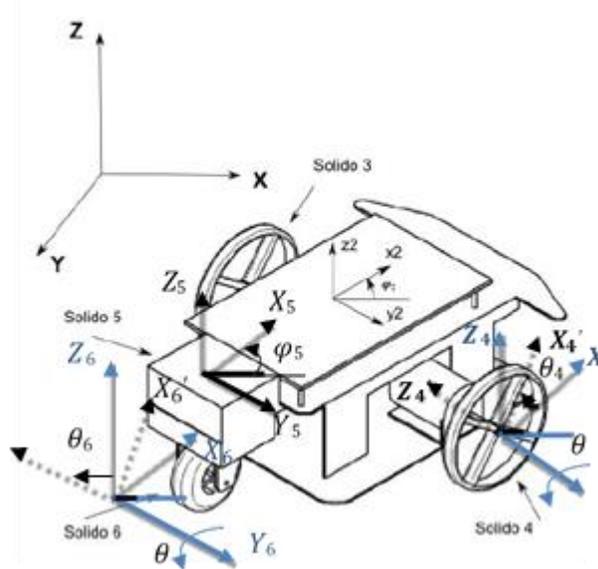
### 1.7. Modelado cinemático de un robot

Para que la explicación sea didáctica pondremos como ejemplo un caso, cinemática de un robot con locomoción de tipo ruedas. Ante esto, sabemos que los movimientos del robot se ven afectados o limitados debido a la rigidez que presente el eje que une las ruedas, como lo que sucede en los movimientos de traslación en dirección longitudinal y los de rotación; sin embargo, al juntar ambos movimientos, es posible que el vehículo pueda rotar alrededor de un punto establecido sobre el eje que une a las ruedas llamándolo Centro de Rotación Instantáneo (IRC).

El conjunto de las coordenadas definidas en 1.20 muestra tanto la posición como la orientación de los sólidos del robot, modelado en el sistema de referencia global. Estas coordenadas se denominan generalizadas, y llevan asociadas una determinada inercia en su movimiento. Las coordenadas mencionadas en 1.20 que se utilizan para definir la posición y velocidad de todos los sólidos del Robot se detallan a continuación:

- Las coordenadas  $x_2$  e  $y_2$  que marcan la posición del centro de gravedad del sólido 2 o chasis. En este trabajo se supone que el robot avanza por un terreno plano y con inclinación.
- El ángulo de giro  $\varphi_2$  ayuda a definir la posición del sólido.
- Los ángulos  $\theta_3$  (rueda derecha) y  $\theta_4$  (rueda izquierda) son los ángulos de rodadura de ambas ruedas.
- El ángulo  $\varphi_5$  representa el ángulo en el que se encuentra el sólido 5.
- Y por último, el ángulo  $\theta_6$  que refiere al ángulo de rodadura de dicha rueda.

$$q = [x_2 y_2 \varphi_1 \theta_3 \theta_4 \varphi_5 \theta_6]^T \tag{1.20}$$



**Figura 1.14** Robot referencial de cálculo [31].

### **Transformación de coordenadas.**

Este punto es importante porque se utiliza la orientación y velocidades angulares para convertir los sistemas de coordenadas locales en un único sistema de referencia global, aquí se hace uso de matrices de giro. Para 1.21 se debe entender que es la matriz de giro en el punto 3; sin embargo, está representada como el producto punto entre la matriz del centro de gravedad del sistema que se encuentra en el sólido 2 y la matriz de rotación del sólido 3 con respecto al sólido 2. Para que se entienda de mejor forma cómo se obtiene la matriz  $A_{2,3}$  y posteriores, se muestra el subíndice Matriz de rotación. Asimismo, cada sistema de coordenadas no global, matrices de giro, vendrán dadas por los siguientes productos de matrices:

$$A^3 = A^2 \cdot A^{2,3} \quad (1.21)$$

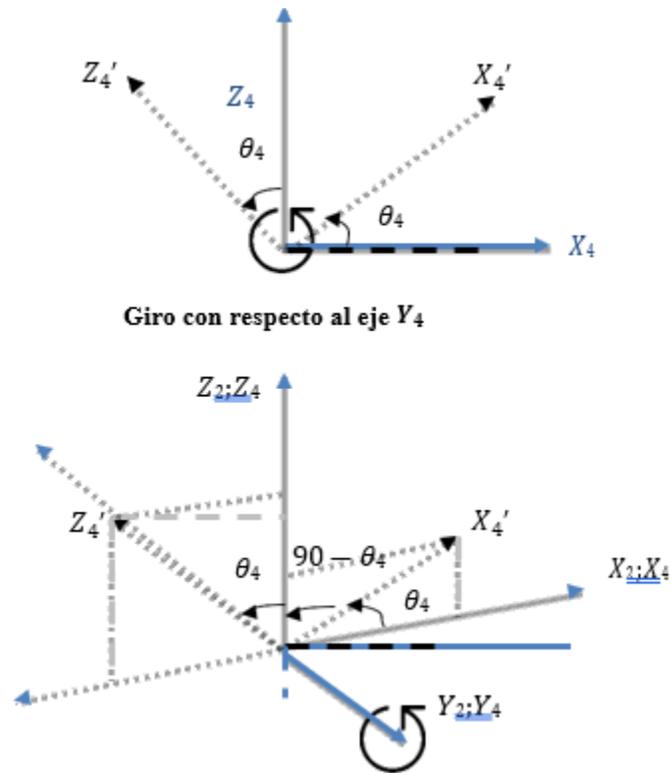
$$A^4 = A^3 \cdot A^{3,4} \quad (1.22)$$

$$A^5 = A^4 \cdot A^{4,5} \quad (1.23)$$

$$A^6 = A^5 \cdot A^{5,6} \quad (1.24)$$

- **Matriz de rotación  $A^{2,4}$**

Los siguientes gráficos ayudarán a explicar cómo se formó esta matriz de transformación. En primer lugar, se observa el centro de gravedad de la rueda y/o sólido 4, que es el centro de la misma. Luego se unen las coordenadas en el punto 4 y en el punto 2 vistos desde el eje Y, suponiendo que la rueda se encuentra en movimiento o rotación, se dibuja un ángulo  $\theta_4$  en sentido anti horario, es por eso que se manifiesta un conjunto de ejes inercial de color azul ( $X_2, Y_2, Z_2$ ) y un eje de rotación de color negro ( $X'_4, Y'_4, Z'_4$ )



**Figura 1.15** Análisis tridimensional de rotación.

Para explicar cómo se forma la matriz en cuestión, se tiene 1.15, que muestra cómo se observa en 2D y 3D los sólidos 2 y 4. A continuación, se muestra el paso a paso de cómo se obtiene la matriz de rotación  $A^{2,4}$  y del centro de gravedad del sistema,  $A^2$ . La primera fila describe la rotación con respecto al eje X, la segunda fila de la matriz describe el movimiento

con respecto al eje Y, por último, el movimiento con respecto al eje Z. De manera análoga, las demás ecuaciones se obtienen de la misma forma que ha sido descrita con anterioridad.

$$A^{2,4} = \begin{bmatrix} X'_4 \text{ con respecto a } X_2 & Y'_4 \text{ con respecto a } X_2 & Z'_4 \text{ con respecto a } X_2 \\ X'_4 \text{ con respecto a } Y_2 & Y'_4 \text{ con respecto a } Y_2 & Z'_4 \text{ con respecto a } Y_2 \\ X'_4 \text{ con respecto a } Z_2 & Y'_4 \text{ con respecto a } Z_2 & Z'_4 \text{ con respecto a } Z_2 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

$$A^2 = \begin{bmatrix} \text{Cos}\varphi_2 & -\text{Sen}\varphi_2 & 0 \\ \text{Sen}\varphi_2 & \text{Cos}\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

$$A^{2,3} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_3 & 0 & \text{Sen}\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\theta_3 & 0 & \text{Cos}\theta_3 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$A^{2,4} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_4 & 0 & \text{Sen}\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\theta_4 & 0 & \text{Cos}\theta_4 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$A^{2,5} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\varphi_5 & -\text{Sen}\varphi_5 & 0 \\ \text{Sen}\varphi_5 & \text{Cos}\varphi_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

$$A^{5,6} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_6 & 0 & \text{Sen}\theta_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\theta_6 & 0 & \text{Cos}\theta_6 \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Los índices que vemos en las matrices indican la superposición de las coordenadas de manera tridimensional de rotación de ejes. A continuación, determinaremos las velocidades angulares de todos los sólidos en función de las coordenadas  $\mathbf{q}$  (posición) y de sus derivadas con respecto al tiempo  $\dot{q}$  (velocidad):

$$\omega^i = G^i q * \dot{q} \quad (1.31)$$

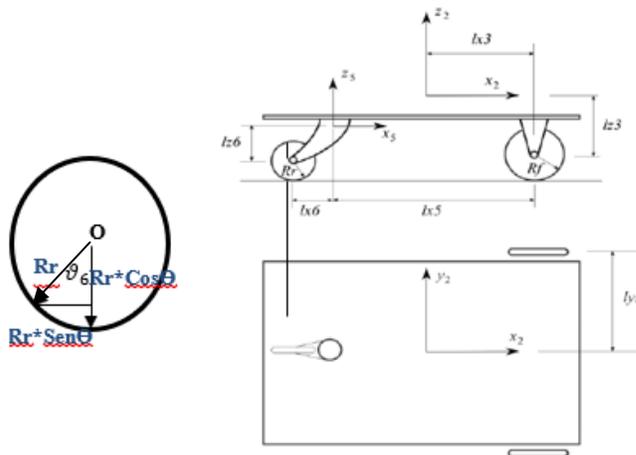
$$G^i = \text{Jacobiano} \quad (1.32)$$

La velocidad angular de cualquier sólido del sistema  $\omega^i$ , se puede calcular a partir de una matriz de transformación (jacobiano) que multiplica a un vector de velocidades angulares. En síntesis, la velocidad angular de cada sólido parte del robot es lineal.

El jacobiano es la variación de los sólidos en el eje Z con respecto al eje de coordenadas inercial.

- **Posición y velocidad de traslación de los sólidos [52, 53, 54, 55, 56].**

En este punto es importante obtener las matrices  $H_i$  que representarán las velocidades del centro de masa de cada sólido que forma parte del robot. Además, la energía cinética del sistema será expresada en términos del sistema de referencia absoluto. Lo primero que se debe realizar es definir el centro de gravedad de cada uno de los sólidos mencionados haciendo uso las distancias que se muestran en 1.16. La siguiente figura, nos muestra el punto de contacto de la rueda un instante “t” después del movimiento. Aquí también se toma en consideración el centro de masa del sistema que se ubica en el sólido 2.



**Figura 1.16** Esquema simplificado con distancias [31].

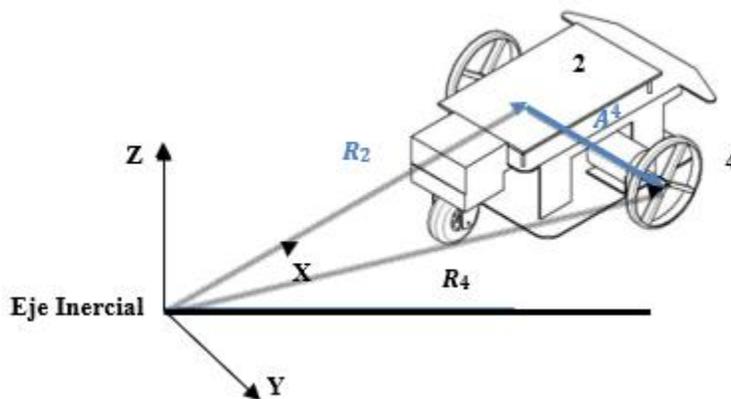
De lo anterior se tiene que todas las distancias se miden con respecto al centro de gravedad del robot, que en este caso se encuentra en el sólido 2 (chasis).

- ✓  $lx_3$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 3 (eje x) al sólido 2.
- ✓  $lx_5$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 5 al (eje x) sólido 2.

- ✓  $lz_3$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 3 (eje z) al sólido 2.
- ✓  $lz_6$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 6 (eje z) al sólido 2.
- ✓  $lx_6$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 6 (eje x) al sólido 2.
- ✓  $ly_3$ : Distancia del centro de gravedad del sólido 3 (eje y) al sólido 2.

A continuación, se detallan las coordenadas de los centros de gravedad de cada sólido partiendo desde el 3 ya que el 2 fue descrito con anterioridad. Como se observa en 1.35, las coordenadas del centro de gravedad de la rueda 3 se encuentran en el centro de la rueda, lo mismo sucede con el sólido 4 y 6. Mientras que el sólido 5, se encuentra a una distancia que es la resta de dos sumas: Primero la adición del centro de gravedad del sólido 3 más su radio y segundo, la suma de la distancia del centro de gravedad del eje de la rueda delantera más su radio. La resta me brinda su coordenada con respecto al eje z.

Por ese motivo, tanto en las ecuaciones 1.34, 1.36, 1.38 y 1.40 son ecuaciones que describen vectores. Por ejemplo, el sólido 4 tiene a la ecuación representativa 1.36 y la figura 1.17. Esta figura muestra cómo se ve el sólido 4 con respecto al eje inercial y para esto se utiliza el producto punto de  $A_2$  y  $A^{2,4}$ , esta última toma el valor de  $U_4$  para expresar de manera general como se ve el sólido 4 con respecto al sólido 2 obteniendo como resultado  $A^4$ . Por ende, aplicando suma de vectores se obtiene la ecuación descrita en 1.36. Las demás ecuaciones se obtienen de manera similar a lo descrito.



**Figura 1.17** Representación en 3D del vector en movimiento [31].

$$R_2 = [x_G ; y_G ; R_f + l_z ]^T \quad (1.33)$$

$$R_3 = R_2 + A_2 \cdot U_3 \quad (1.34)$$

$$U_3 = [lx_3 ; ly_3 ; -lz_3]^T \quad (1.35)$$

$$R_4 = R_2 + A_2 \cdot U_4 \quad (1.36)$$

$$U_4 = [lx_3 ; -ly_3 ; -lz_3]^T \quad (1.37)$$

$$R_5 = R_2 + A_2 \cdot U_5 \quad (1.38)$$

$$U_5 = [ -lx_3 - lx_5 ; 0 ; R_f + lz_3 - (R_r + lz_6) ]^T \quad (1.39)$$

$$R_6 = R_5 + A_5 \cdot U_6 \quad (1.40)$$

$$U_6 = [ -lx_{56} ; 0 ; -lz_6 ]^T \quad (1.41)$$

$$U_{cd} = [R_f \cdot \sin\vartheta_3 \quad 0 \quad -R_f \cdot \cos\vartheta_3]^T \quad (1.42)$$

$$U_{ci} = [R_f \cdot \sin\vartheta_4 \quad 0 \quad -R_f \cdot \cos\vartheta_4]^T \quad (1.43)$$

$$U_d = [R_r \cdot \sin\vartheta_6 \quad 0 \quad -R_r \cdot \cos\vartheta_6]^T \quad (1.44)$$

De la misma forma, las ecuaciones 1.33, 1.35, 1.37, 1.39 y 1.41 son las coordenadas con respecto al centro del eje inercial de cada uno de los sólidos que componen el robot. Estas se encuentran representadas como una matriz traspuesta para fines matemáticos. Asimismo, las tres últimas ecuaciones (1.42, 1.43, 1.44) refieren al vector de los puntos de contacto de las tres ruedas con el suelo un instante después de su movimiento como se mencionó con anterioridad. A su vez, derivando con respecto al tiempo estas expresiones se obtienen las velocidades de traslación. Que se pueden recoger en la expresión:

$$v_G = H^i(q) \cdot q \quad (1.45)$$

Y especificando para los distintos sólidos se obtiene:

$$V_2 = H_2 \cdot q \quad (1.46)$$

$$V_3 = H_3 \cdot \dot{q} \quad (1.47)$$

$$V_4 = H_4 \cdot \dot{q} \quad (1.48)$$

$$V_5 = H_5 \cdot \dot{q} \quad (1.49)$$

$$V_6 = H_6 \cdot \dot{q} \quad (1.50)$$

# CAPÍTULO II

## METODOLOGÍA

En este capítulo es importante tener en cuenta las necesidades del cliente y cómo se llevará a cabo el diseño. Asimismo, se tiene el siguiente diagrama de flujo (norma VDI2221):

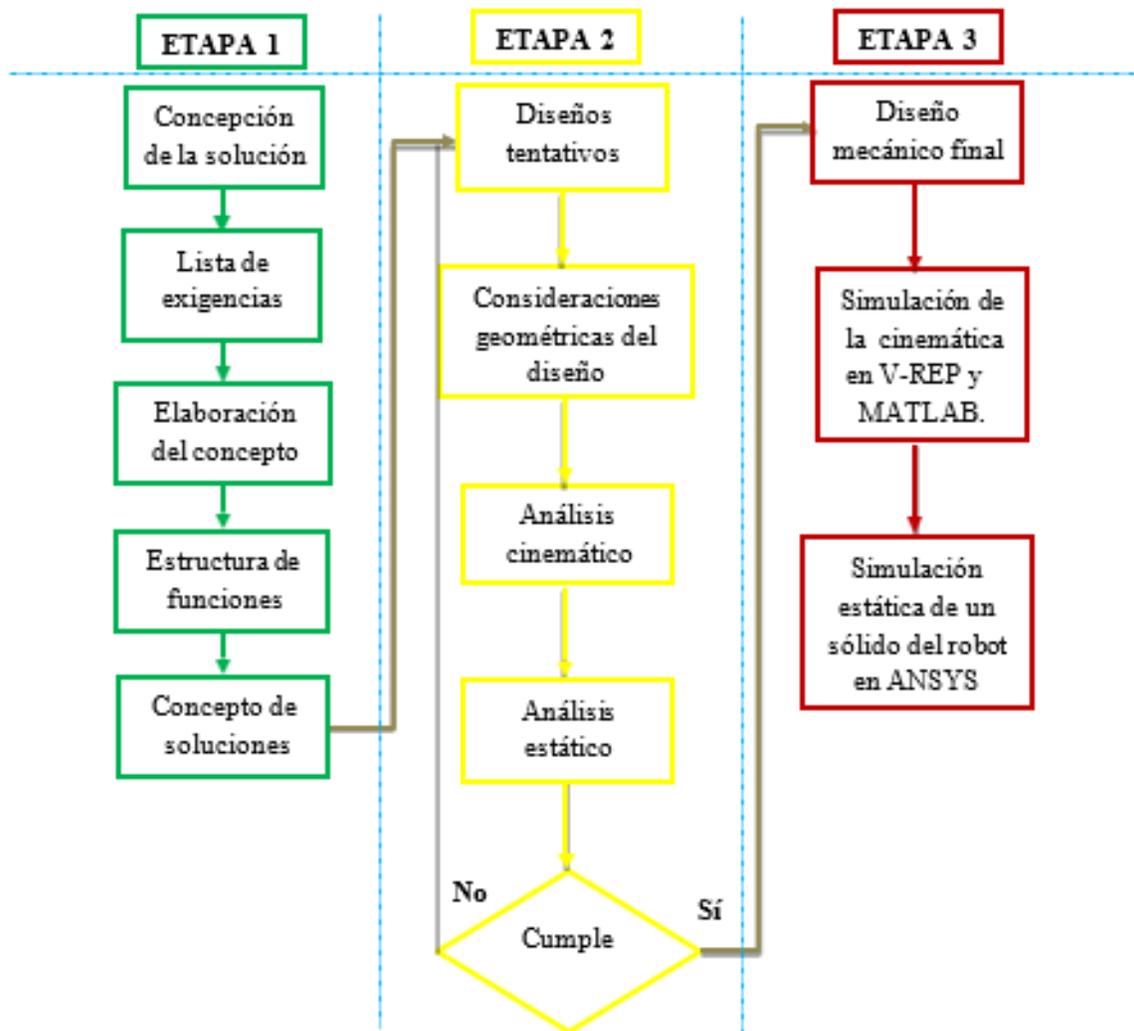


Figura 2.1 Diagrama de flujo para el diseño mecánico del robot.

## **2.1. Concepción de la solución**

En esta etapa es muy importante comprender cuál es la lista de exigencias que debe cumplir el robot reconfigurable, para esto se debe indagar de manera específica estudios anteriores que puedan proveer información sobre por qué es necesario que se implemente un robot en un acto de alto riesgo como lo es el rescate de humanos que se encuentran bajo escombros.

### **2.1.1. Lista de exigencias**

Como ya se observó, en el punto anterior, es importante conocer cada función que debe cumplir el robot mientras se encuentre en uso y para esto, en primer lugar, se debe distinguir e indicar las características de las exigencias que este debe cumplir. Estas ya fueron descritas en el punto 1.3.2; sin embargo, aquí se desarrollará una tabla que denotará dos letras, la letra E para Exigencia y D para Deseo que debería cumplir el diseño del robot.

- Exigencia. - Lo que debe ser imprescindible en el diseño, debe cumplirse sin importar la circunstancia. Si alguna de las exigencias descritas no es cumplida, el diseño no es aceptable.
- Deseo. - Solo son aspiraciones en el diseño sin llegar a contradecir los objetivos planteados.

Asimismo, el diseño debe cumplir con una serie de requerimientos, descritos formalmente en Anexo 1.

<b>Proyecto</b>	<b>ROBOT CON CAPACIDAD DE MOVILIZARSE SOBRE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS</b>	Pág. 1 de 2
		Fecha: 06/04/2020
<b>Institución</b>	<b>UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA</b>	Autor: R.A.
<b>Prioridad</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	<b>E</b>	Función Principal: El robot reconfigurable será capaz de reemplazar el trabajo que realizan rescatistas y/o bomberos en labores de alto riesgo.
<b>2</b>	<b>E</b>	Versatilidad: El diseño final que se tome en cuenta debe ser capaz de sobrepasar terrenos no estructurados como escaleras, escombros, rocas y pendientes.
<b>3</b>	<b>E</b>	Seguridad: Identificar cuáles pueden ser los posibles peligros cuando se realiza la operación del robot.
<b>4</b>	<b>E</b>	Ergonomía: El diseño debe permitir que sea de fácil manejo, forma y/o construcción.
<b>5</b>	<b>E</b>	Fabricación: Es importante que el diseño vaya acorde con el material y con la fabricación.
<b>6</b>	<b>E</b>	Control de calidad: Aquí se debe establecer las acciones y herramientas necesarias para detectar futuros errores en el robot.
<b>7</b>	<b>E</b>	Montaje: La idea principal es que el diseño sea de fácil montaje.
<b>8</b>	<b>E</b>	Control del proceso: Esto va a permitir medir, comparar y corregir las actividades o acciones que va a cumplir el robot dentro de su área de trabajo.

**Tabla 2.1** Tabla de requerimientos 1.

<b>Proyecto</b>		<b>ROBOT CON CAPACIDAD DE MOVILIZARSE SOBRE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS</b>	Pág. 2 de 2
			Fecha: 06/04/2020
<b>Institución</b>		<b>UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA</b>	Autor: R.A.
<b>Prioridad</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	
<b>9</b>	<b>E</b>	Uso: Todas las piezas podrán ser ensambladas de manera sencilla.	
<b>10</b>	<b>D</b>	Transporte: No será complicado debido a que sus medidas son pequeñas.	
<b>11</b>	<b>D</b>	Reciclaje: No será de material reciclable.	
<b>12</b>	<b>E</b>	Mantenimiento: Cada vez que requiera un cambio de pieza, esto se podrá realizar sin dificultades y a bajo costo.	
<b>13</b>	<b>D</b>	Costo: No será muy elevado a comparación de algunos que se encuentran en el mercado.	

**Tabla 2.2** Tabla de requerimientos 2.

## 2.2. Elaboración del concepto

### 2.2.1. Abstracción o representación de nivel

Cada función se verá representada gracias a la utilización de la caja negra, la cual está dividida en 3 magnitudes como se muestra a continuación:

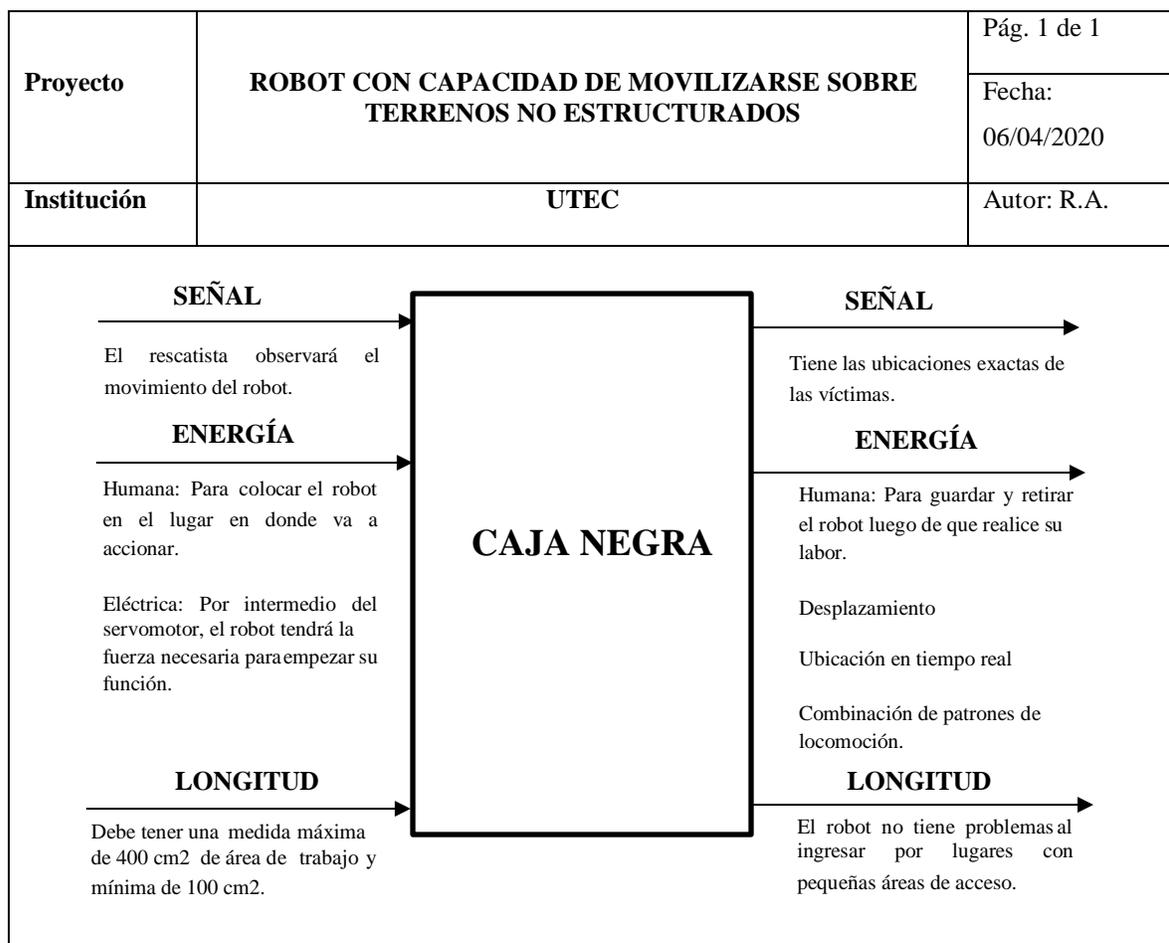


Figura 2.2 Caja Negra.

### 2.2.2. Estructura de funciones

En esta etapa es importante definir las funciones que el robot debe realizar durante el tiempo en el que ejecuta su trabajo. Estas se encuentran en Anexo A

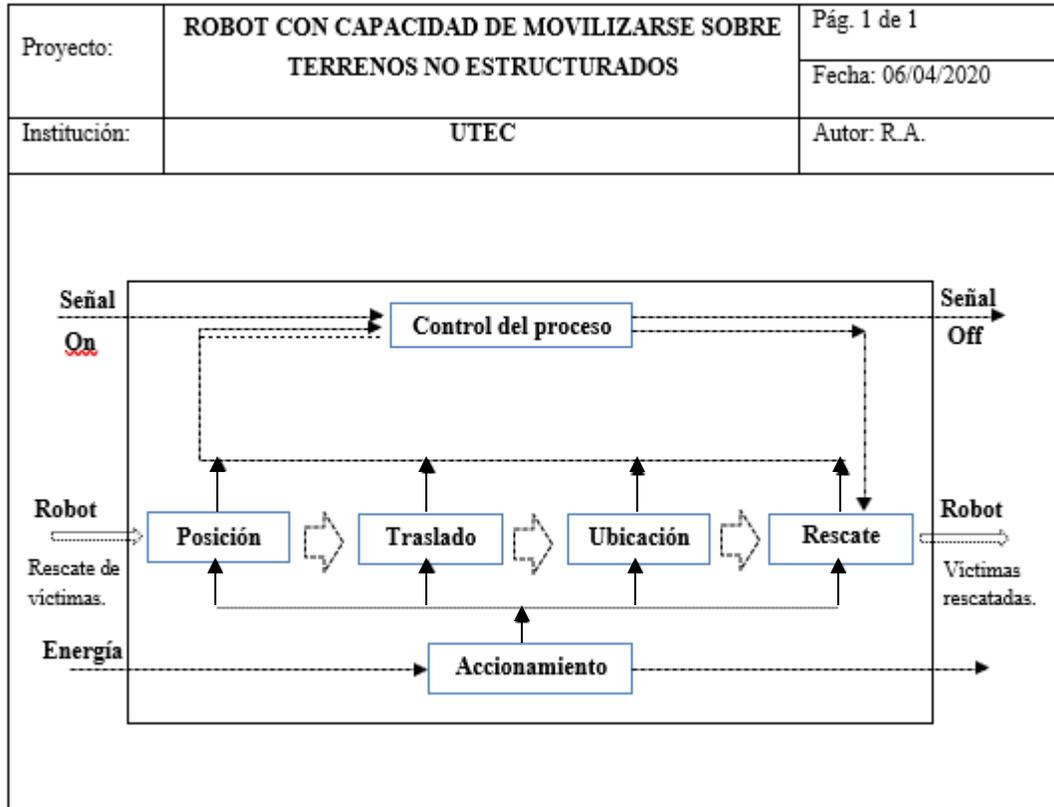


Figura 2.3 Caja Blanca.

### 2.2.3. Concepto de solución

Cada función parcial está mencionada y descrita en Anexo A.

INSTITUCIÓN:	UTEC			Autor: R.A.
FUNCIONES PARCIALES	PORTADORES DE FUNCIONES			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	
1 Posicionar	<b>Brazo Robótico</b> 	<b>Manual</b> 		
2 Señal	<b>Pulsador On-Off</b> 	<b>Joystick</b> 		
3 Procesar	<b>Microordenador</b> 	<b>Microcontrolador</b> 	<b>FPGA</b> 	
4 Traslación	<b>Oruga y patas</b> 	<b>Patas con base de ruedas</b> 	<b>Ruedas y patas</b> 	
5 Accionamiento	<b>Servomotor</b> 	<b>Motor a pila</b> 	<b>Motor paso a paso</b> 	
6 Sensor	<b>Sensor de proximidad y ultrasónico</b> 	<b>Cámara termográfica y sensor térmico</b> 	<b>Sensor a distancia infrarrojo</b> 	
7 Emitir	<b>Buzzor</b> 	<b>Parlante</b> 	<b>Video</b> 	

Tabla 2.3 Matriz Morfológica.

#### 2.2.4. Disposición básica

Luego de observar las tres posibles alternativas para poder cumplir las funciones parciales propuestas, se establecen tres propuestas de solución integral cualitativa en un mapa conceptual. La descripción detallada de cada una se encuentra en Anexo A.

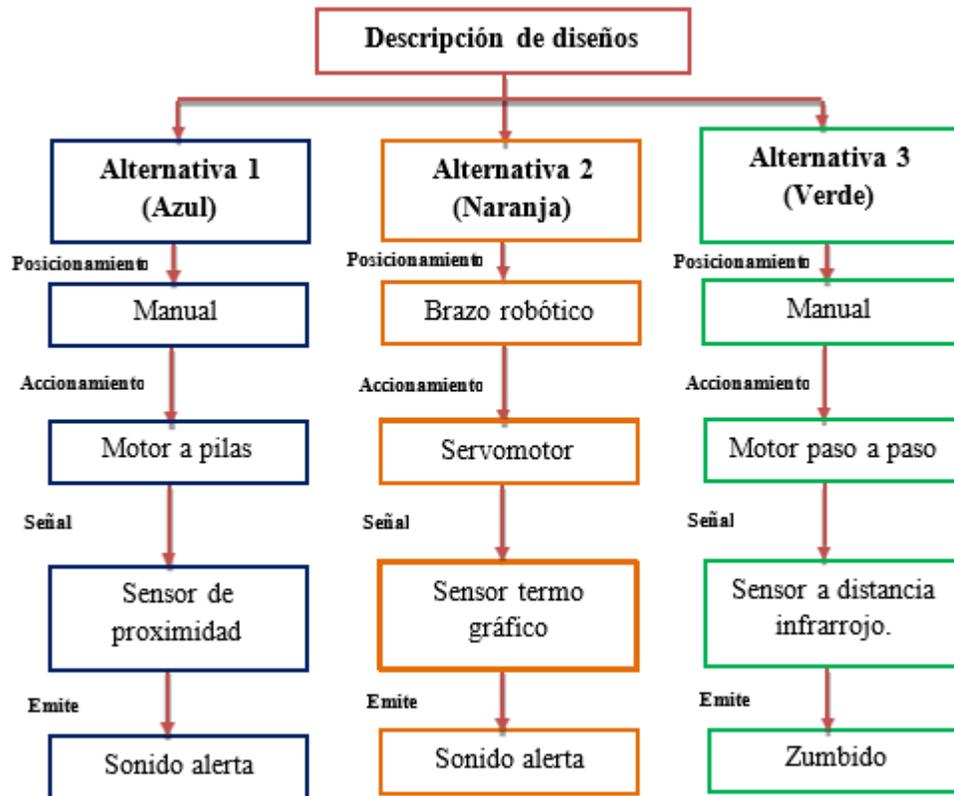


Figura 2.4 Mapa de alternativas.

### 2.2.5. Evaluación del concepto solución

Para poder validar los diseños presentados en el punto anterior es necesario realizar un análisis técnico económico.

“ROBOT CON CAPACIDAD DE MOVILIZARSE SOBRE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS”										
<p><b>p:</b> Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2221)</p> <p>0 = No satisface, 1 = aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien</p> <p><b>g:</b> El peso ponderado está en función de los criterios de evaluación.</p>										
Criterios de evaluación para proyectos										
Variantes de conceptos/proyectos			Solución 1 ( $S_1$ )		Solución 2 ( $S_2$ )		Solución 3 ( $S_3$ )		Solución ideal ( $S_{ideal}$ )	
Nº	Criterios de Evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Confiabilidad	3	3	9	3	12	3	9	4	12
2	Seguridad	4	3	12	3	12	3	12	4	16
3	Manufactura sencilla	2	2	4	2	4	3	6	4	8
4	Fácil Operación	3	3	9	3	9	3	9	4	12
5	Mantenimiento simple	2	3	6	2	6	2	4	4	8
6	Ergonómico	3	3	9	3	9	3	9	4	12
7	Diseño	2	3	6	3	6	2	4	4	8
8	Lista de exigencias	3	2	6	3	9	2	6	4	12
9	Señales (Información)	3	2	6	3	9	3	9	4	12
10	Transporte	2	3	8	2	4	1	2	4	8
Puntaje máximo $\sum p$ o $\sum gp$			27	75	27	80	25	70	40	108
Valor Técnico $X_i$			0.69		0.74		0.65		1	

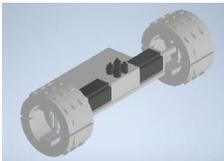
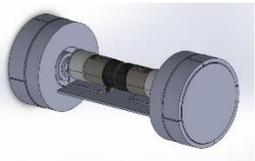
**Tabla 2.4** Evaluación Técnica de Proyectos ( $X_i$ ).

<b>“ROBOT CON CAPACIDAD DE MOVILIZARSE SOBRE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS”</b>										
<p><b>p:</b> Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2221)</p> <p>0 = No satisface, 1 = aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien</p> <p><b>g:</b> El peso ponderado está en función de los criterios de evaluación.</p>										
<b>Criterios de evaluación para proyectos</b>										
Variantes de conceptos/proyectos			Solución 1 ( $S_1$ )		Solución 2 ( $S_2$ )		Solución 3 ( $S_3$ )		Solución ideal ( $S_{ideal}$ )	
Nº	Criterios de Evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Costo de tecnología	2	3	6	4	8	3	6	4	8
2	Número de piezas	3	3	9	4	12	3	9	4	12
3	Adquisición de materiales	3	3	9	2	6	3	9	4	12
4	Poco espacio requerido	4	4	16	3	12	3	12	4	16
5	Fácil ensamble	3	1	3	2	6	3	9	4	12
6	Vida útil del equipo	3	3	9	3	9	3	9	4	12
Puntaje máximo $\sum p$ o $\sum gp$			17	52	18	53	18	54	24	72
Valor Técnico $X_i$			0.57		0.58		0.75		1	

**Tabla 2.5** Evaluación Económica de Proyectos ( $Y_i$ ).

### 2.3. Propuestas de conceptos para el robot

Luego de saber las dimensiones que debe tomar el robot para poder ingresar por espacios pequeños, también es importante qué tipo de locomoción va a usar en una primera instancia. Por esta razón se muestra lo siguiente:

Propuestas	Gerión Robot	One Robot	Muna Robot
<b>Imagen</b>			
<b>Locomoción</b>	Primero tipo patas y al separarse solo ruedas.	Dos ruedas por cada lado.	Dos ruedas por cada lado.
<b>Sistema Reconfigurable</b>	El chasis consta de tres cuerpos distintos. Dos extremos con patas y uno central con ruedas.	Cada rueda consta de un vástago de doble efecto que permite que se separen en dos.	Cada rueda se expande y se contrae según sea el caso
<b>Breve descripción</b>	Empieza su trayecto con dos patas traseras y delanteras y cuando hay un área de acceso más pequeña, los dos extremos se desprenden y funciona con solo dos ruedas.	Empieza su trayecto con una rueda convencional, luego que se presente un obstáculo como una piedra, las ruedas se separan en dos haciendo la función de un gancho.	Empieza el trayecto con la rueda expandida (tipo aspa) esto le permite escalar diversos tipos de obstáculos y cuando el área de acceso es pequeña, cambia a ruedas lo cual le suma agilidad.
<b>Condiciones de servicio</b>	No, por estas razones: - Largo del robot. - Seis motores de implementación. - Maniobrar dos robots.	No, por estas razones: - Golpe brusco en el movimiento luego de la separación de la rueda. - Costos en reparación.	Sí, por estas razones: - Dimensiones del robot. - Maniobrabilidad. - Costo de implementación.

**Tabla 2.6** Descripción de los diseños previos

### 2.3.1. Consideraciones geométricas del diseño [31, 32]:

Por ejemplo, para un primer diseño tentativo, se tiene pensado realizar el robot reconfigurable con un sistema de ruedas distintas. Una inspiración sería una variación de las ruedas convencionales, es decir, que sea de geometría variable. Entonces, este tipo de locomoción a diseñar tendría las siguientes características:

- La apertura de las aspas se da de manera independiente. ¿Cómo es esto posible? Bueno, consta de un servomotor que hace girar las ruedas, como cualquier otra lo haría, y otro servomotor que ayudaría a extender y flexionar las aspas de manera controlada. De esta forma lo que se logra es poder controlar los niveles en el que las patas se extienden y ayude, de alguna u otra forma, a atravesar terrenos no estructurados.
- Los puntos que tienen contacto con la superficie lo hacen en un plano ortogonal al eje de rotación de la rueda. Esto hace posible que cuando el terreno sea no estructurado, no se obtenga problemas al instante en el que las patas se extiendan de la rueda.
- Los motores que permitan accionar dichas ruedas, deben encontrarse en el cuerpo estructural del robot para poder disminuir la inercia y el tamaño del mismo. Lo mencionado con anterioridad, también sirve para que sea más factible cambiar el mecanismo de accionamiento si es que se requiere.
- Es permisible poder aplicar este tipo de locomoción con una rueda o más, simplemente replicando la geometría y la cinemática.

Al culminar con los pasos requeridos se debe establecer el volumen de diseño del robot que será de  $160.000 \text{ cm}^3$  en un caso máximo para que pueda ingresar por lugares con un área de acceso de  $400 \text{ cm}^2$ .

- En síntesis, el robot debe poder superar los siguientes obstáculos:

<b>Obstáculos</b>	<b>Tamaño</b>
Escalera (contrahuella)	12 cm
Escombros amontonados	8 – 11 cm
Área de acceso	20 cm x 20 cm
Pendiente	60°
Rocas (cm)	8-11 cm
Maderas con sección rectangular	8 cm x 8 cm – 11cm x 11 cm

**Tabla 2.7** Criterios de diseño.

- Por último, para tener en cuenta la geometría, debe realizarse una explicación de la cinemática de este tipo de locomoción.

Investigando, se encuentra que para poder conseguir este tipo de locomoción debe revisarse la bibliografía sobre el tema de la rueda Helse. Lo que se desea conseguir es que la rueda pueda dividirse en tres partes iguales por intermedio de un motor. Para poder entender un poco de este principio se toma en cuenta la subfamilia S de la rueda tipo Helse. Sin embargo, cabe resaltar que la forma en la que será accionada la rueda que se presentará en este trabajo de tesis será distinto, el punto descrito a continuación servirá como referencia.

- **Subfamilia S:**

Ante de las subfamilias mencionadas en el párrafo anterior, se debe mencionar la subfamilia S de la rueda USR, en donde la geometría depende solo de una rueda con dos grados de libertad. Este mecanismo solo depende de un motor lineal capaz de abrir y cerrar las patas de las ruedas. Un grado de libertad se encarga del lado rotacional, en donde un motor hace girar dicha rueda.

Al ser solo una rueda, solo se cuenta con un eje móvil, un rin central y una serie de patas desplegadas. Aquí es importante señalar que la cinemática de una pata consiste de eslabones binarios unidos por la siguiente secuencia de pares cinemáticos: Universal, esférico y rotacional. Para lograr que cada eslabón de tracción se mueva en un plano ortogonal al eje de rotación de la rueda, como se mencionó con anterioridad, es necesario que el eje de la articulación R sea paralelo al eje de la articulación  $R_r$ , la cual une al rin central con el chasis



Grados de libertad	$\lambda$	6
Nº de eslabones	$n$	5
Nº de pares cinemáticos	$j$	5
Nº de pares cinemáticos de 1 g.d.l.	$j_1$	3
Nº de pares cinemáticos de 2 g.d.l.	$j_2$	1
Nº de pares cinemáticos de 3 g.d.l.	$j_3$	1
Sumatoria de los grados de libertad de las articulaciones.	$\sum_i f_i$	8
Grados de libertad del mecanismo	$F$	2

**Tabla 2.8** Parámetros de criterio para ruedas espirales.

Lo que se encuentra de color azul en 2.5 es el esquema geométrico considerado en el análisis. Como se muestra en (2.8), la cadena está formada por 5 eslabones que son el chasis, el rin central, el eslabón de tracción, la biela y el eje móvil. Luego, de la misma tabla, se observan 3 pares cinemáticos de un grado de libertad que vienen a ser  $R_r$ ,  $P_r$  y  $R$ . Luego tenemos un par cinemático de 2 grados de libertad ( $U$ ) y uno de tres grados de libertad ( $S$ ).

Ahora, si seguimos lo indicado en (2.8) como resultado tenemos que el mecanismo tiene dos grados de libertad. Al tener dos grados de libertad, significa que la locomoción necesita dos accionadores, es decir dos motores, para que realice dos movimientos de entrada. En pocas palabras, si se desea que, en el diseño preliminar, el robot posea dos, cuatro o seis ruedas de tipo espiral, cada una de ellas debe tener dos motores que las accionen. Ahora, en 2.5 también se observan dos articulaciones  $P_l$  y  $R_l$ , en estas dos se pueden colocar los dos motores y así se evita que vayan en el rin central y no afectaría, como se dijo en un principio, a la inercia del robot.



### 2.3.2. Análisis cinemático

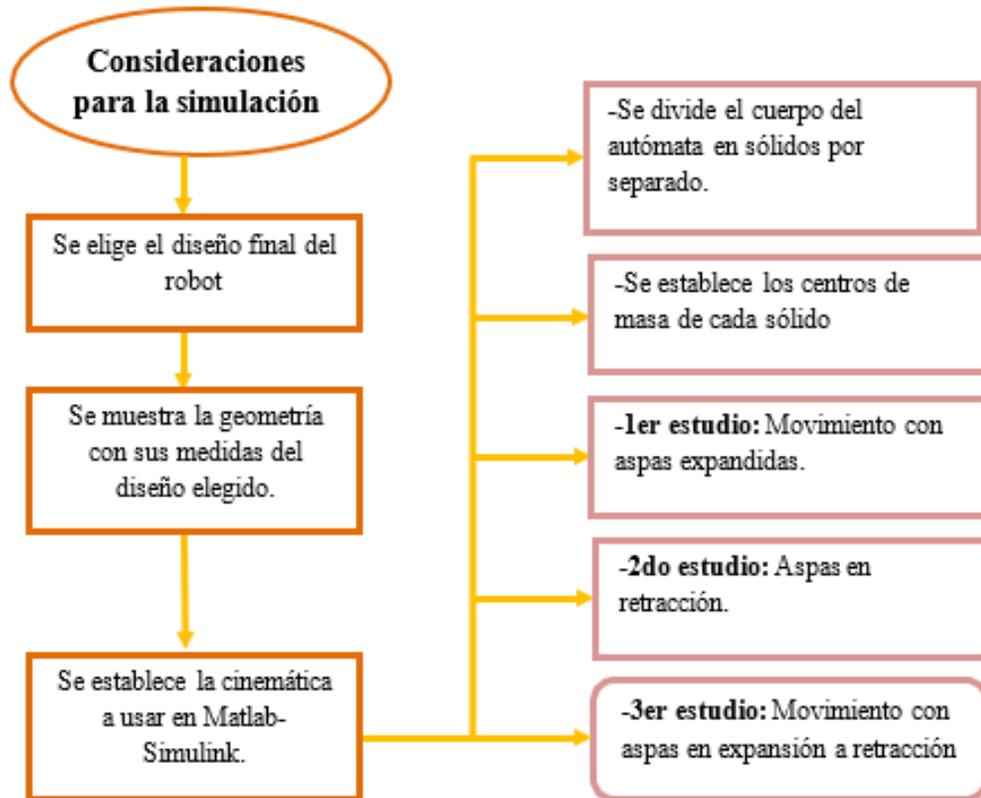


Figura 2.7 Flujograma de análisis cinemático

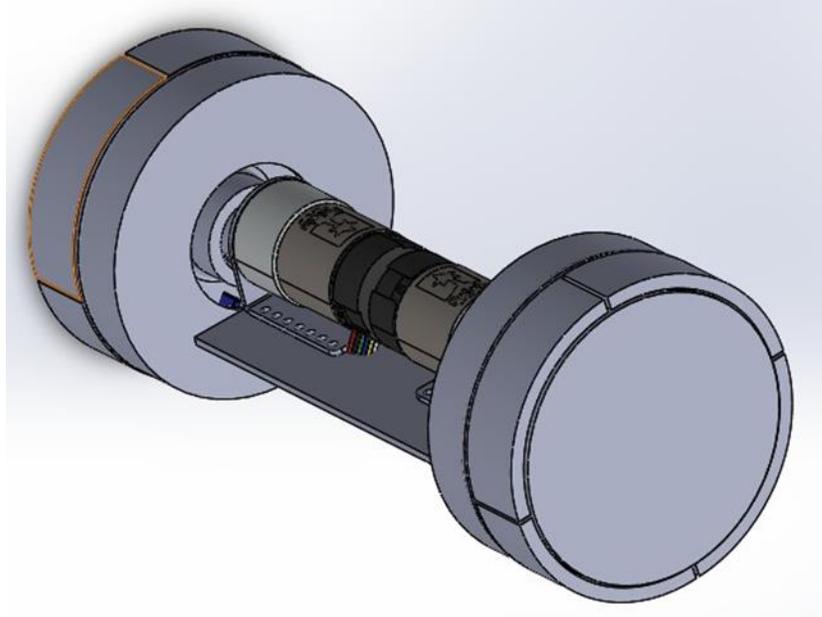
- **Diseño final del robot**

En primer lugar, se tiene que definir el diseño que se va a utilizar como estudio cinemático posteriormente. Para esto se plasma los mecanismos a usar, tanto mecánicos como eléctricos. Luego, se reafirma si las medidas usadas son las que corresponden de acuerdo a los objetivos planteados en este trabajo de tesis (área de acceso de 20 cm de ancho y 20 cm de alto). Cabe indicar que el diseño debe presentar algunas partes que sean de fabricación y otras que deben ser posibles comprarlas ya que son estandarizadas. Con esto se minimiza el costo por repuesto en caso se desee prototipar en un futuro. Este diseño puede estar representado de dos formas:

- Representación por medio de un plano de diseño final.

- Representación por componentes de diseño.

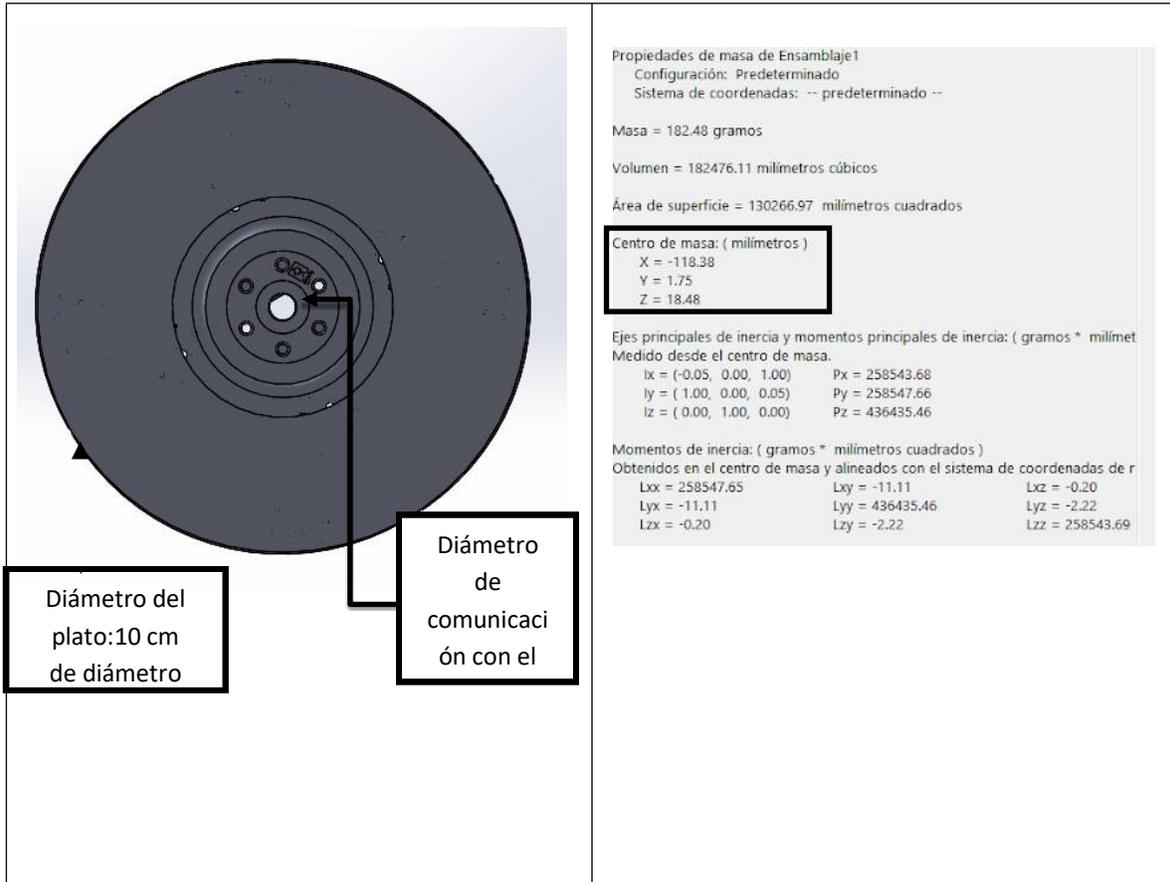
En este caso, se utilizará las dos formas porque la representación por plano de diseño irá adjunta en el anexo de este trabajo de tesis para que se pueda apreciar con mayor detenimiento la forma que adoptará el robot y la segunda se utilizará para poder explicar, de manera más específica, las medidas de cada componente del robot y cómo serán accionadas.



**Figura 2.8** Esquema del robot.

- **Geometría del diseño:**

Siguiendo con lo mencionado en el punto anterior, luego de mostrar el diseño final del robot, se procederá a nombrar uno por uno los componentes que forman parte del mismo. No se tocará precios ya que no es parte de esta tesis. Sin embargo, sí se mostrarán las medidas tales como el largo del robot, repuestos a fabricar, batería a utilizar, servomotores, etc. Además, se brindará una breve descripción de la función de cada componente y la ubicación de los mismos. Esto último porque cuando se realice la cinemática del robot, se tiene que saber con exactitud las posiciones de los centros de masa de cada sólido que compone el robot como gracias al software Solidworks, como se muestra en 2.9 y 2.10.



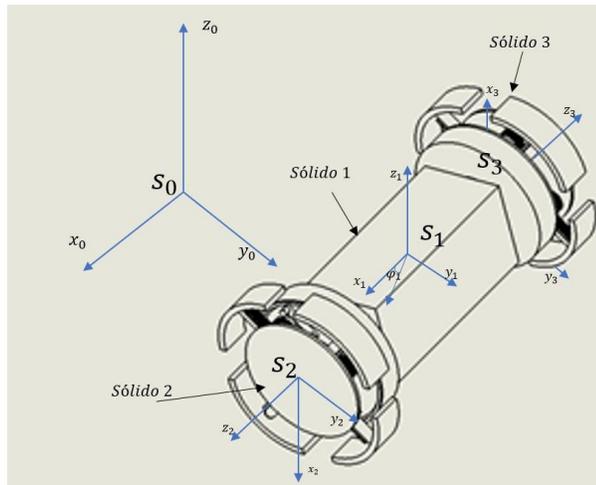
- **Implementación de la cinemática en Matlab – Simulink**

De la misma forma, luego de establecer los valores de los centros de masa de cada componente del robot, se tiene un resumen del momento de inercia de tres sólidos con respecto a su centro de gravedad que, finalmente, nos ayudarán a describir cuándo es mejor usar el robot con una locomoción de tipo aspas y cuándo es mejor una locomoción de tipo ruedas. Posteriormente, pasamos a describir cada uno de los procesos que se encuentran en el flujograma 2.7 de acuerdo a las ecuaciones planteadas en el marco teórico. Cabe resaltar que los resultados que obtendremos serán de acuerdo a la distribución de los sólidos.

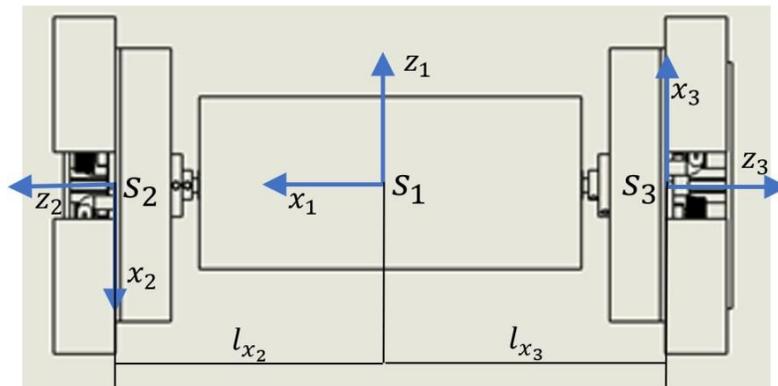
- ✓ **Proceso 1, 2 y 3**

Para estos procesos se considerarán los radios de cada una de las ruedas ya que cuando se encuentra en modo aspas expandidas tiene una forma no convencional, así como se toma solo cuando la rueda se está contrayendo y cuando se encuentra totalmente contraída las aspas y el robot anda con una locomoción tipo ruedas. Cabe desatacar que, en el segundo caso, solo se presenta velocidad de traslación de las aspas mas no velocidad de rotación ya que solo realizan un movimiento y estando el robot estático.

Por estos motivos, se inicia definiendo la matriz de coordenadas 1.20 traspuesta que permite conocer la posición inicial del sólido, el ángulo de yaw y sus ángulos de rotación de los tres sólidos: rueda tipo aspa izquierda (S2) y rueda tipo aspa derecha (S3) y cuerpo principal (S1). Esto se ve reflejado en 2.11 en donde el centro de masa total del sistema se ubica en S1 que es el centro de masa de todo el robot. De la misma forma, los centros de masa de cada rueda se encuentran ubicados en el centro del eje de cada una de las mismas. Asimismo, es importante conocer los valores de las distancias desde el centro de masa del robot con respecto a los centros de masa de cada rueda con las aspas expandidas como se muestra en 2.12.

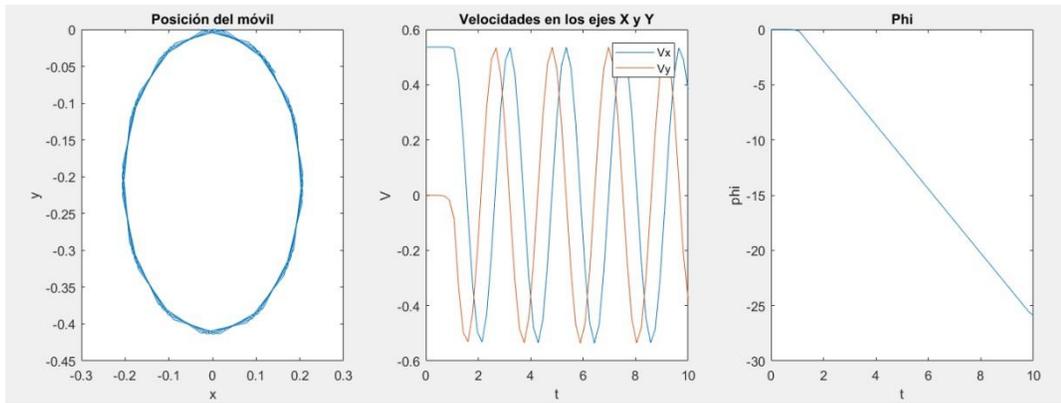


**Figura 2.11** Coordenadas del robot (aspa) con respecto al centro de coordenadas inercial.

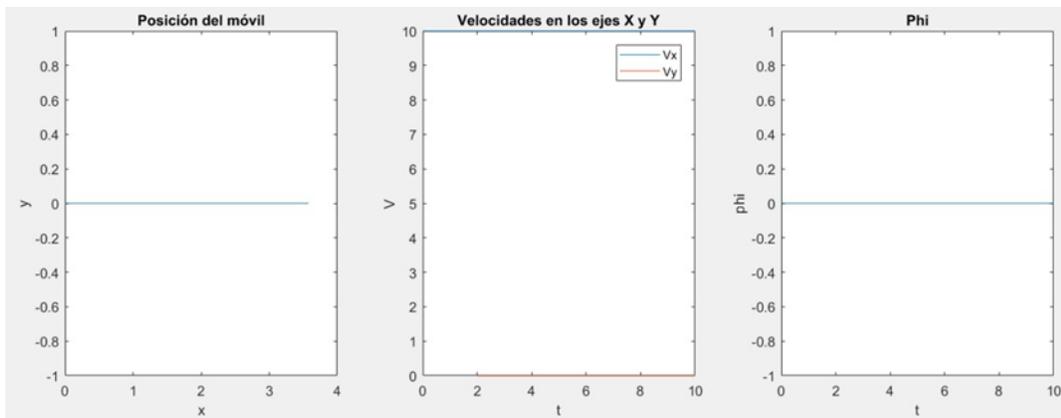


**Figura 2.12** Coordenadas en dos dimensiones, eje X y Z (aspa).

Luego se deben obtener tres matrices de transformación que muestren la posición y rotación de cada uno de los sólidos según la ecuación 1.25. Posteriormente, se debe conocer las velocidades angulares de todos los sólidos, así como las velocidades de traslación de los mismos. Además, se debe saber cuál es el comportamiento del robot cuando se le asigna una velocidad angular de acuerdo a lo hallado con la ecuación 1.31 para cada caso, de esta forma se muestra 2.13 en donde se puede apreciar el comportamiento del robot en uno de los casos cuando la velocidad de una rueda es mayor que la otra o cuando ambas velocidades angulares son las mismas (2.14):



**Figura 2.13** Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido anti horario).



**Figura 2.14** Simulación del movimiento en línea recta del robot.

### 2.3.3. Análisis estático

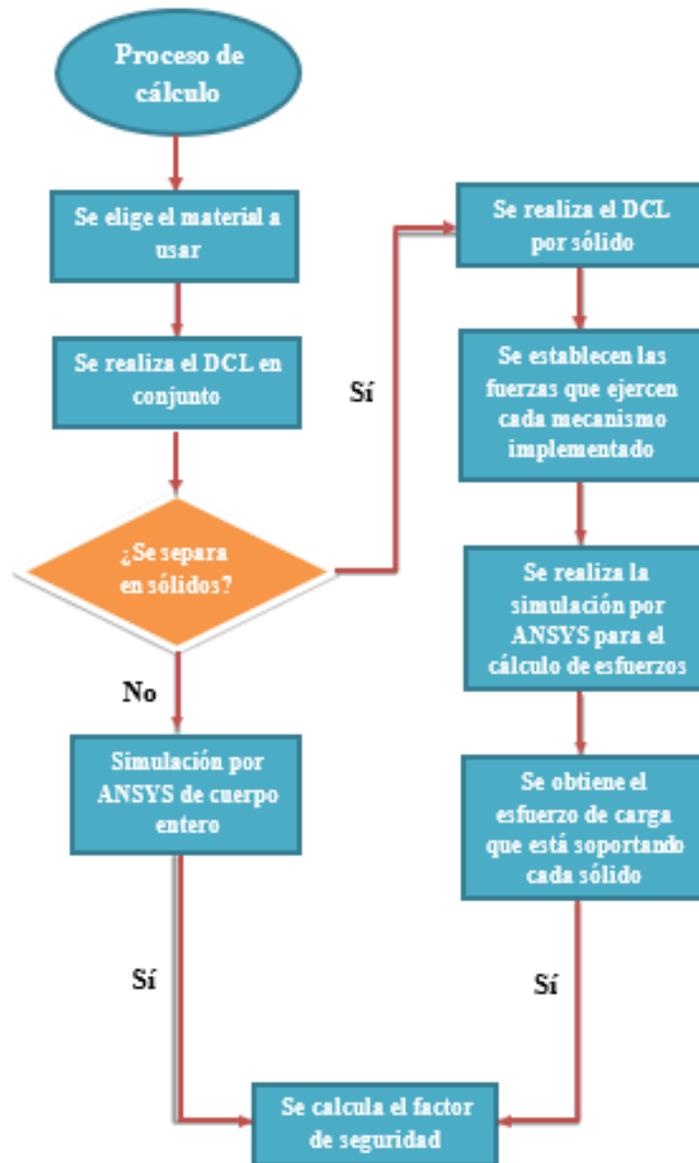
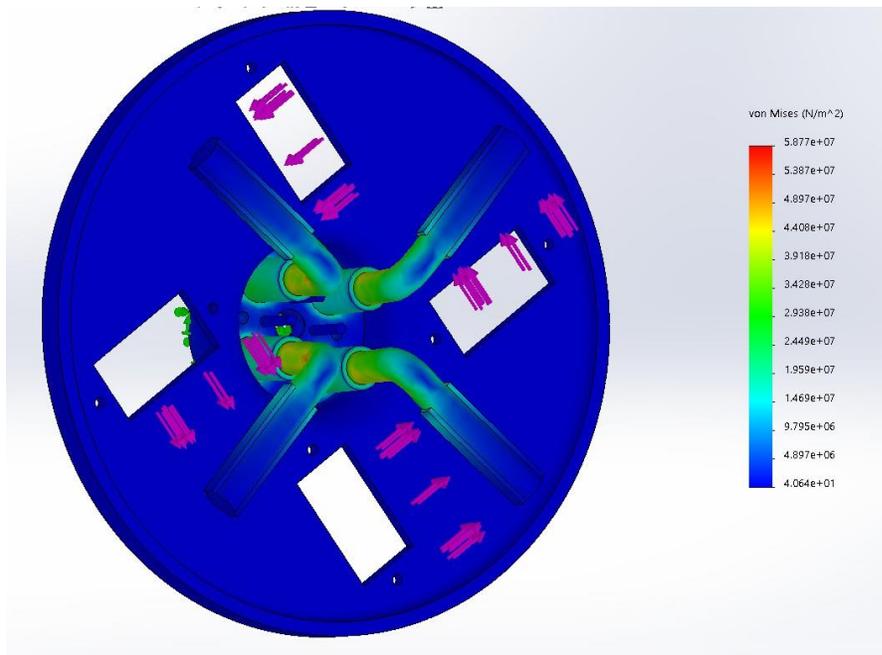


Figura 2.15 Flujograma de análisis estático

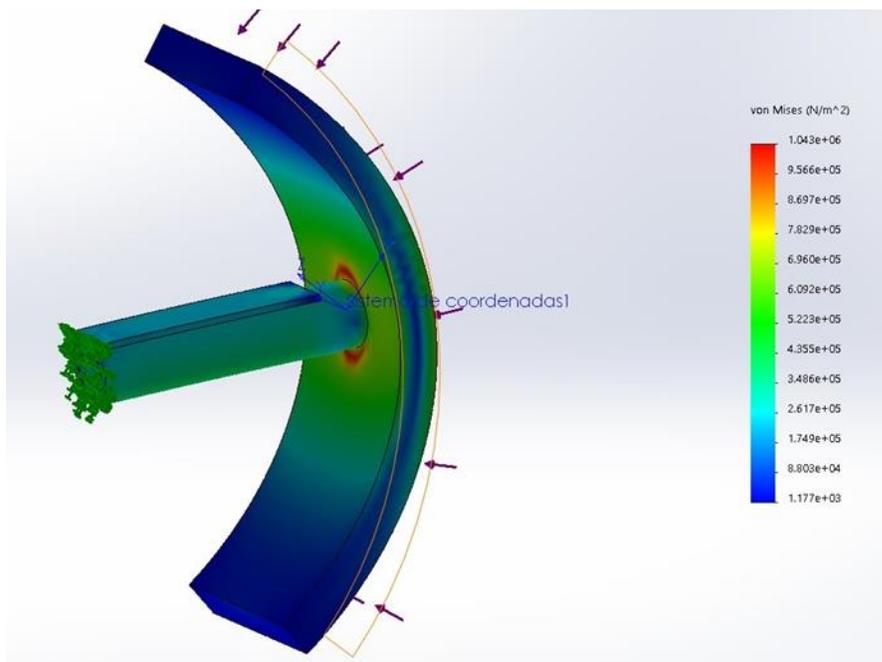
En primer lugar, se debe definir los tipos de materiales con los que se van a realizar las simulaciones de análisis estático, en este caso serán 3: ABS, PLA y fibra de carbono. Sin embargo, también se insertará el uso del aluminio para verificar si existe una mejora sustancial en las características del robot. Por ejemplo, el primero tiene propiedades importantes, como, por ejemplo: Buena resistencia mecánica y puede ser procesado con facilidad. Además, la resistencia mecánica de los plásticos ABS incrementa al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno, pero a la vez disminuyen sus propiedades de resistencia a la tensión y la temperatura de deformación debido al calor. El amplio rango de propiedades que tiene el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes [64]. Cabe mencionar que de todos los mencionados solo se elegirá a uno.

En segundo lugar, se debe realizar un diagrama de cuerpo libre para saber cómo se encuentran distribuidas las fuerzas de acción y reacción del robot. En este caso, se realizará el cálculo utilizando la herramienta Ansys. De la misma forma que el punto 2.3.2, se dividirá el robot en sólidos, específicamente en 3, que permitirán realizar el cálculo de esfuerzos siguiendo lo mencionado en las ecuaciones 1.12-1.15, en 2.16 se muestra una estimación de cómo deberían ser los resultados obtenidos según fuerzas ejercidas por el peso que ejerce los servomotores a cada una de las aspas de manera indistinta (es decir, si se encuentra en expansión o compresión). En este caso, el esfuerzo Von Mises que obtendremos nos ayudará en el cálculo del factor de seguridad de cada uno de los sólidos que componen el autómatas.

Posteriormente, se simulará el robot con el software V-REP que permitirá observar qué sólido que compone el autómatas está siendo sometido a una pequeña deformación al instante en el que está cumpliendo con su función. Aquí entra a tallar el tercer punto, en donde se tiene el cálculo de la ecuación 1.19 que es el factor de seguridad que se obtendrá de la simulación en el software Ansys y que no debe sobrepasar el valor del material designado para el análisis, solo de esta forma nos aseguraremos que el robot no fallará según esfuerzos que hayan sido tomados en cuenta para su diseño.



**Figura 2.16** Esfuerzo de Von Mises obtenido en software similar al ANSYS.



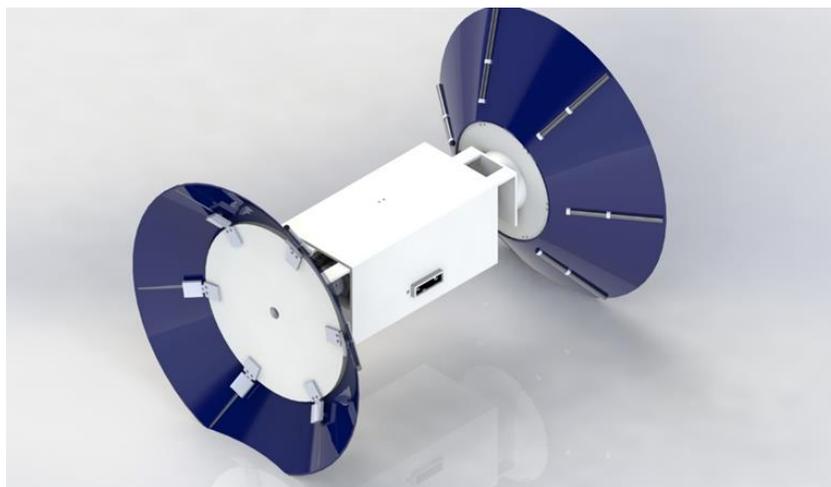
**Figura 2.17** Análisis estático del robot, Aspa

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS

En el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos al instante de diseñar el robot y modelarlo. Aquí se muestran qué exactamente, se obtiene con respecto a nuestro diseño mecánico para que de esta forma podamos calcular la cinemática del mismo. De la misma forma, se mostrará qué implementos serán utilizados y si estos existen y pueden ser comprados, asimismo qué partes del robot deben ser construidos con la ayuda de una impresora 3D en caso, como trabajo a futuro, se desee prototipar; sin embargo, esto último no es parte de los objetivos planteados en este trabajo de tesis.

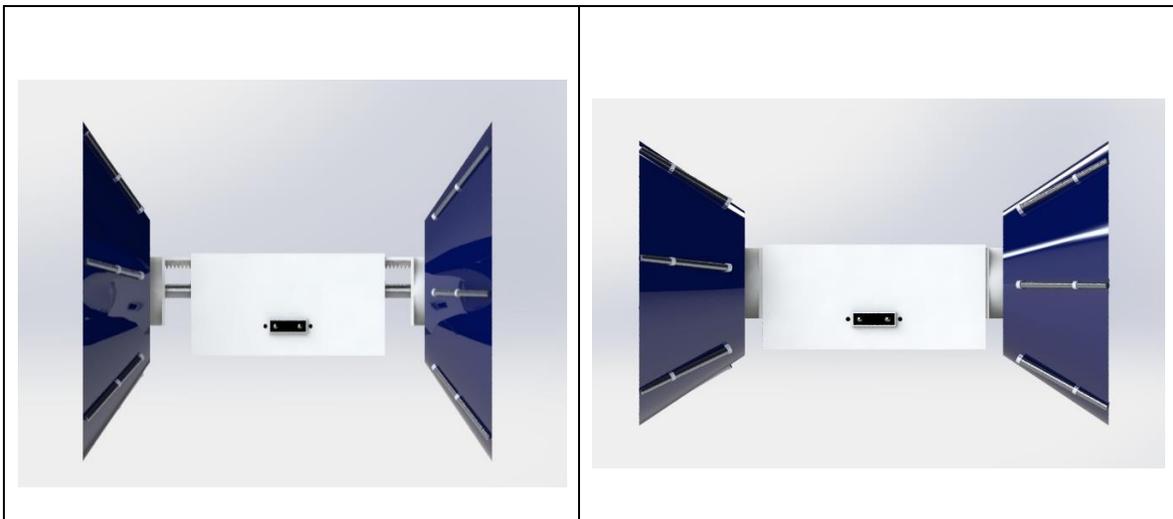
Retomando el punto de la cinemática, esta se mostrará mediante ecuaciones y simulaciones en Matlab-Simulink. Posteriormente, se realizará un análisis estático por componente o sólido que conforman el robot. Finalmente, se mostrará cómo es el comportamiento del robot en el software V-REP bajo circunstancias reales, esto se logrará recreando un posible escenario en dicho software sobre qué condiciones futuras se podría enfrentar el robot cuando se encuentre realizando sus labores. Es importante volver a recordar que no se simularán comportamientos de la electrónica del robot en este trabajo de tesis.



**Figura 3.1** Diseño final del robot.

### 3.1. Diseño final del robot

En primer lugar, se menciona que el robot será movilizado de dos formas, primero con un diámetro expandido de locomoción de 25.8 cm y luego con un diámetro comprimido de 20 cm. Cabe mencionar que el cambio de diámetro puede darse no solo cuando el robot pare, sino también mientras este se encuentre en movimiento, esto último se verá más adelante. Si bien es cierto, este trabajo no está basado en el funcionamiento electrónico, sí es importante mencionar que la única forma en la que se realizará el cambio de diámetro es cuando se detecte espacios pequeños con áreas de acceso de 20 cm de alto y 20 cm de ancho. Asimismo, se tomó la decisión que el robot sea de dos ruedas, comunicadas por un eje rectangular, debido a que si es de cuatro ruedas el robot se hace más grande y se le puede dificultar que ingrese por áreas del tamaño ya mencionado.



**Figura 3.2** Robot con aspas expandidas y contraídas

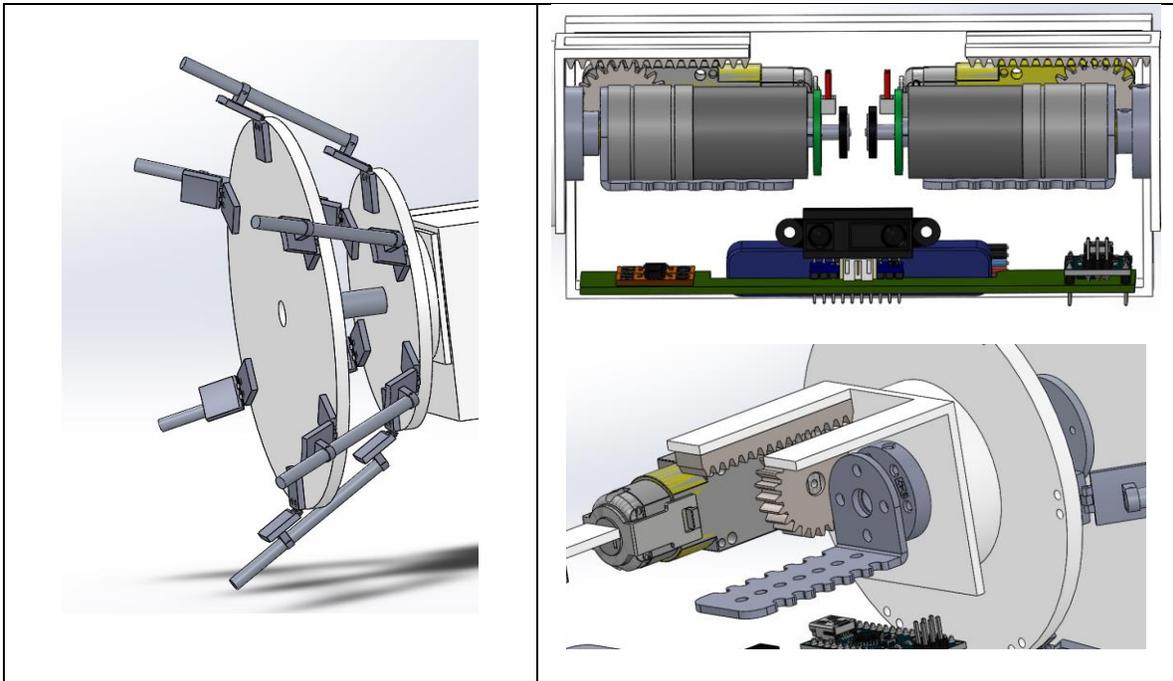
En 3.3, se muestran los accionamientos y materiales que se utilizan para la realización del diseño y para que el robot cumpla su función.

### **3.1.1. Mecanismos utilizados para el diseño del robot**

Todas las piezas que se utilizan al instante en el que se realiza el ensamble del robot son detalladas en la tabla 3.1. Mientras tanto a continuación se explica cada pieza con su funcionamiento:

- ✓ Piñón: Son 2 por aspas. Su función es en conjunto con la cremallera, ya que permitirá que se expanda o contraiga poco más de 5 cm durante su funcionamiento.
- ✓ Cremallera: Son 2 por aspas. Funciona en conjunto con el piñón y como se mencionó con anterioridad, permite que se extienda o contraiga cada una de las aspas.
- ✓ Motor DC: Son 2 motores que permiten el giro de la locomoción cuando las aspas se encuentran retraídas. Mientras que los otros dos, funcionan a la par con el piñón y la cremallera, porque permiten que se expandan las aspas.
- ✓ Batería de Lipo: Alimenta a cada uno de los motores y acompaña al robot durante su funcionamiento.
- ✓ Plato de giro y expansión-contracción: Es un componente que debe ser de fabricación en impresora 3D. Este permite que cuando los motores DC, en complicidad del piñón y cremallera, se encuentren en funcionamiento, puedan permitir la expansión y contracción de las aspas. Diámetro de 15 cm y otro de 10 cm.
- ✓ Tubos fijos: De la misma forma que el anterior, debe ser realizado en una impresora 3D. Van unidos a una bisagra fija con ángulo de separación entre caras de 120° y al plato de giro y expansión-contracción. Justamente, facilita la función de este último.
- ✓ Soporte de cremallera: Va fija a la cremallera para que pueda realizar el movimiento de expansión y contracción de la locomoción.

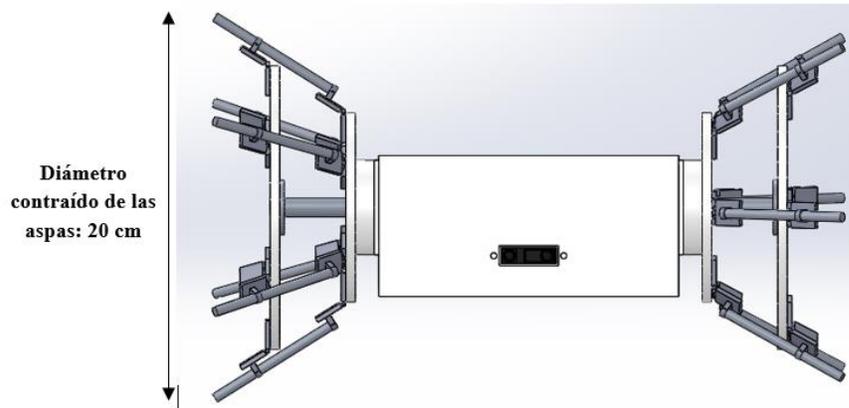
- ✓ Brida: Conecta al eje del motor DC con el plato que permite el giro de la locomoción. Su función es mantener fija todos los componentes mencionados.



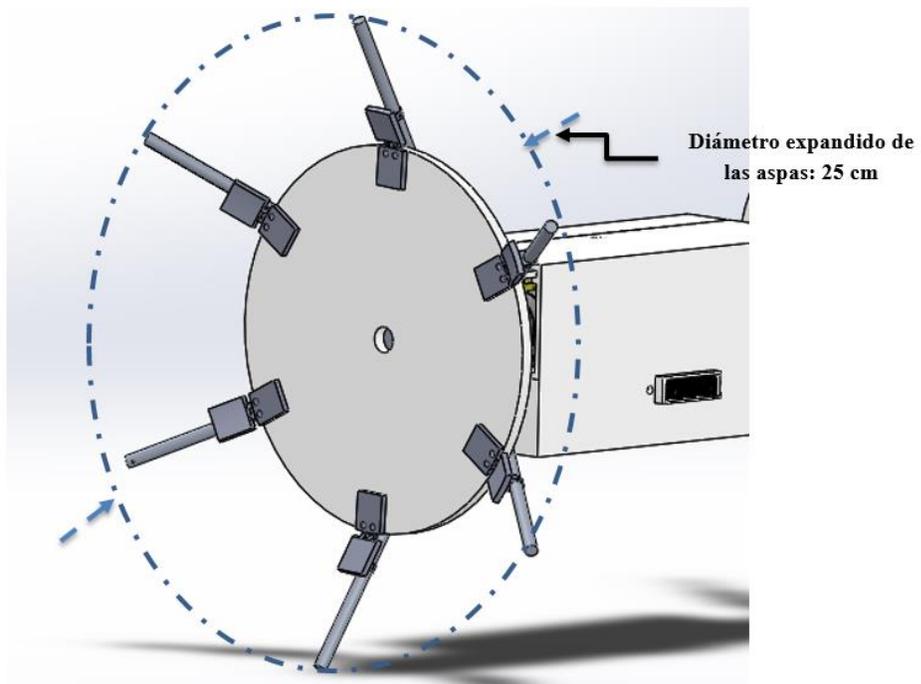
**Figura 3.3** Mecanismos colocados en el cuerpo del robot

### 3.1.2. Medidas geométricas del diseño

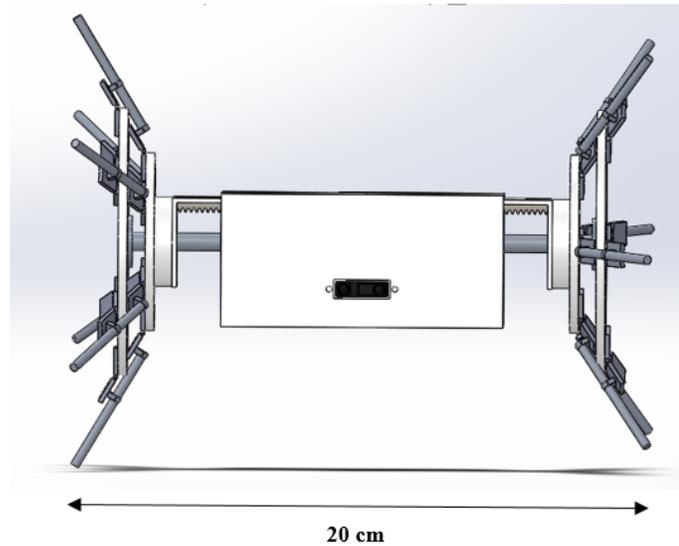
En este punto, se mostrará las medidas utilizadas en el diseño tanto en los diámetros establecidos para las aspas contraída y como, posteriormente, cuando se expande. En 3.4 se muestra el diámetro cuando las aspas se encuentran contraída y en 3.5 cuando se encuentran expandidas. Por último, en 3.6, se muestra la longitud total del robot en lo que respecto a su ancho y a su alto que es lo que principalmente nos interesa para que pueda ingresar por un área de  $400 \text{ cm}^2$ .



**Figura 3.4** Medida del diámetro en contracción



**Figura 3.5** Medida del diámetro en expansión



**Figura 3.6** Longitud del robot

### **3.2. Cinemática del robot**

En síntesis, es de suma importancia mencionar que se realizarán tres cinemáticas directas para la simulación del robot en Matlab-Simulink. A continuación, se mencionarán cómo serán medidos o calculados los movimientos:

- ✓ En primera instancia, el movimiento del robot será con las aspas expandidas.
- ✓ En segunda instancia, se considerará el cambio cuando el robot se encuentre en movimiento. Esto último se refiere a que cuando el robot detecte un área de acceso menor al tamaño en el que se encuentra con las aspas en expansión, el autómata podrá empezar a realizar el cambio de sus dimensiones en la locomoción.
- ✓ En tercera instancia, el movimiento del robot se dará con las aspas retraídas.

Sin embargo, antes de calcular la cinemática del robot, se debe conocer los centros de gravedad de cada sólido. Para este caso en particular, el software SOLIDWORKS nos muestra el centro de gravedad del robot con respecto a su eje de coordenadas inercial, es por esa razón que en 3.7 se muestra las coordenadas brindadas por el software y en 3.8 donde se encuentra ubicado tal centro de gravedad en el robot.

Propiedades de masa de Ensamblaje1  
 Configuración: Predeterminado  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

\* Incluye las propiedades físicas de uno o más componentes/sólidos ocultos

Masa = 943.11 gramos  
 Volumen = 873805.34 milímetros cúbicos  
 Área de superficie = 786799.49 milímetros cuadrados

**Centro de masa: ( milímetros )**  
 X = 9.81  
 Y = -78.29  
 Z = 204.52

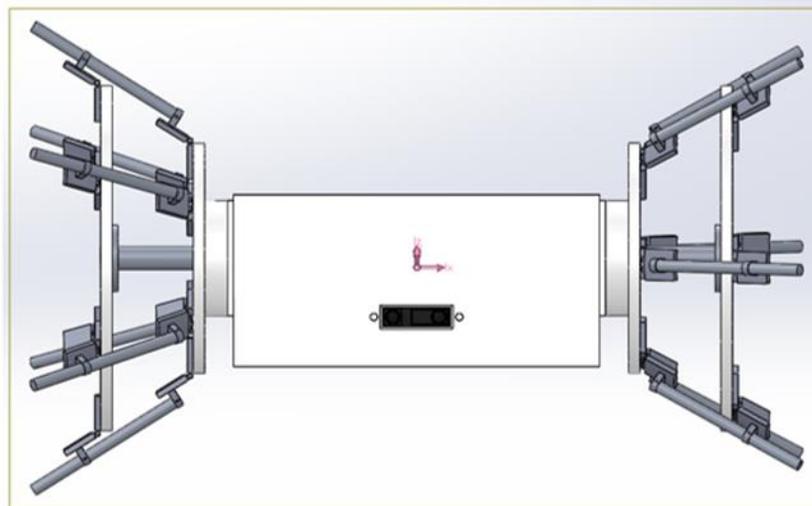
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el centro de masa.

lx = ( 0.00, 0.00, 1.00)	Px = 2945350.41
ly = ( 0.79, 0.61, 0.00)	Py = 11613822.99
lz = (-0.61, 0.79, 0.00)	Pz = 11629053.38

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas

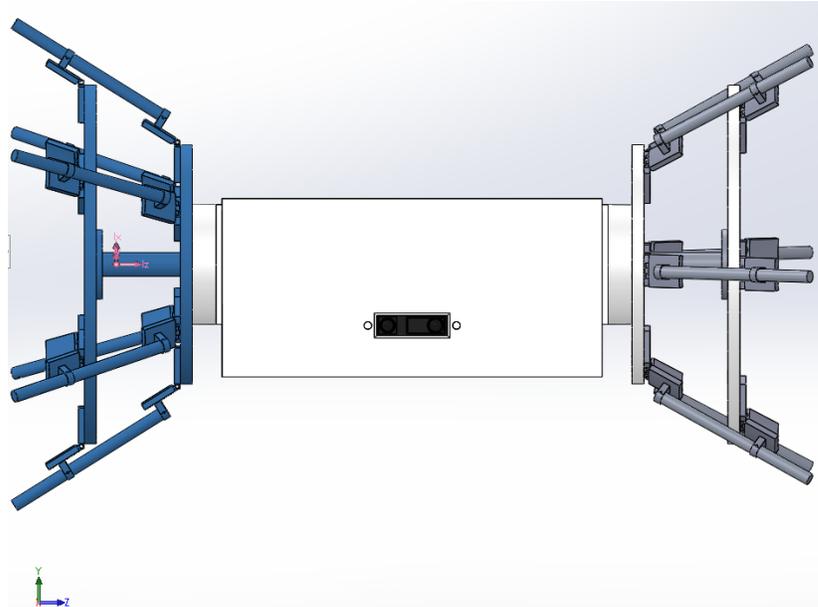
Lxx = 11619463.42	Lxy = 7355.40	Lxz = -1386.35
Lyx = 7355.40	Lyy = 11623410.84	Lyz = -4048.61
Lzx = -1386.35	Lzy = -4048.61	Lzz = 2945352.52

**Figura 3.7** Coordenadas del centro de gravedad del sistema marcado en negro.

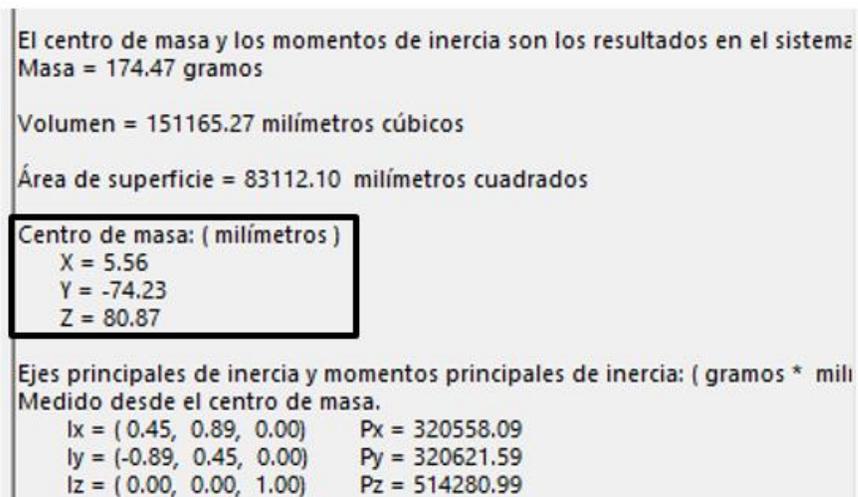


**Figura 3.8** Representación gráfica del centro de gravedad del robot

Posteriormente, se describirá el centro de gravedad de la locomoción en modo aspas como muestra 3.9 y 3.10. De la misma forma, como se mencionó con anterioridad, se tomará este tipo de locomoción como un sólido a parte y esto tiene sentido ya que el robot toma una forma diferente y su centro de gravedad en todo el sistema se ve afectado con respecto al eje Z.

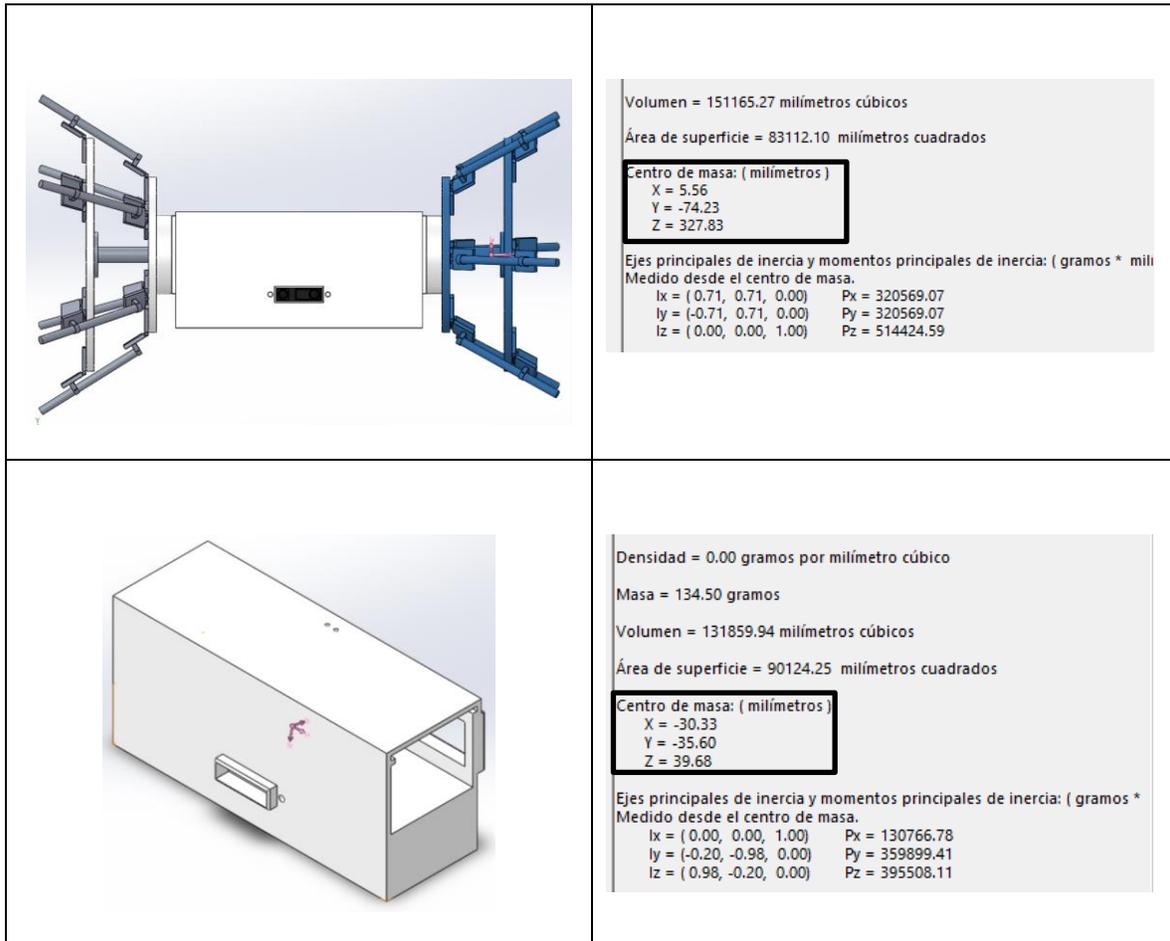


**Figura 3.9** Representación gráfica del centro de gravedad de la locomoción.



**Figura 3.10** Coordenadas del centro de gravedad del sistema marcado en negro.

Lo mismo que se planteó en el punto anterior, se realizará con las aspas ubicadas en el lado derecho del robot. En 3.11 observa la ubicación en el espacio del centro de gravedad del robot, las coordenadas de su centro. De la misma forma, verá las coordenadas y punto de ubicación de la parte central (donde van fijados los mecanismos) del robot.



**Figura 3.11** Coordenadas del centro de gravedad del aspa derecha y cuerpo central

En resumen, se obtuvieron los siguientes valores de centros de masas y de momento de inercia proporcionado por el software CAD-SOLIDWORKS.

<b>Sólido</b>	<b>Centros de Masa (mm)</b>
<b>Cuerpo Entero del Robot</b>	X: 9.81
	Y: -78.29
	Z: 204.52
<b>Aspas izquierdas</b>	X: 5.56
	Y: -74.23
	Z: 80.87
<b>Aspas derechas</b>	X: 5.56
	Y: -74.23
	Z: 327.83
<b>Cuerpo central</b>	X: -30.33
	Y: -35.6
	Z: 39.68

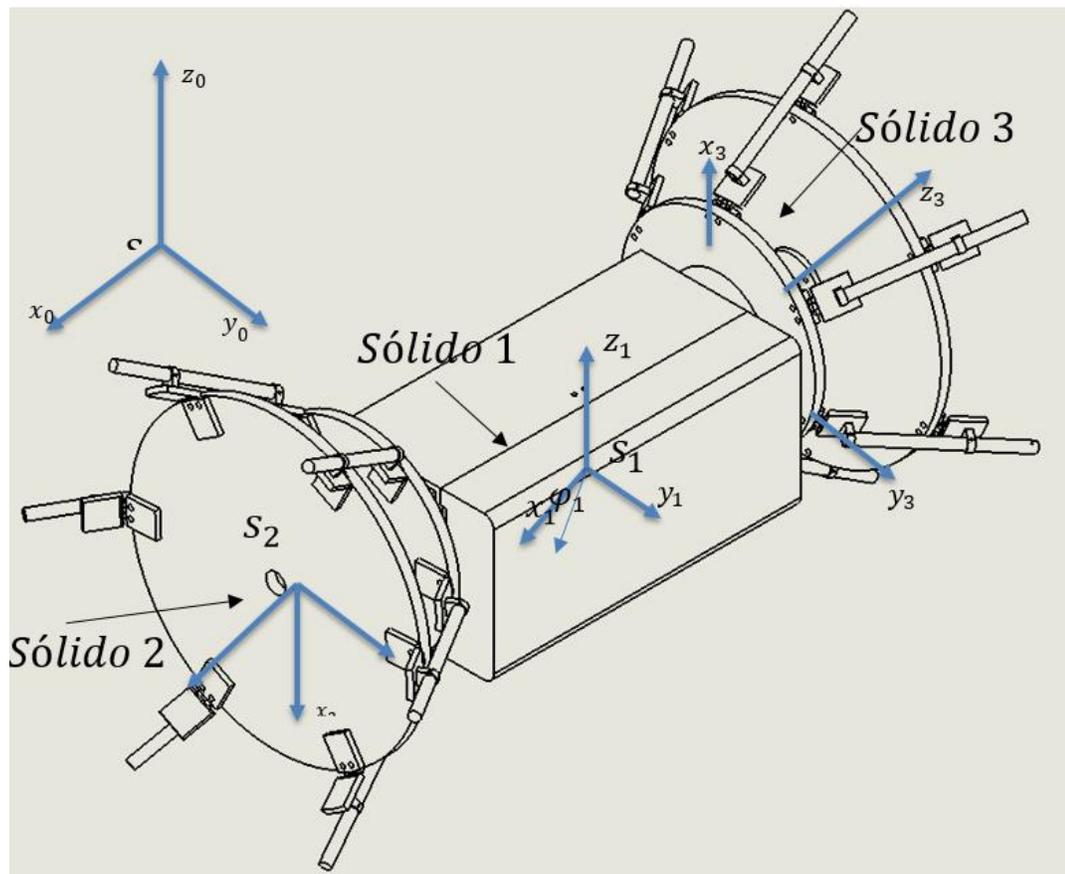
**Tabla 3.1** Centros de masa de los componentes del robot.

- **Proceso 1:** Se empieza con la separación por sólidos de los componentes que conforman el robot. El proceso 1 comprende con aspas en contracción.

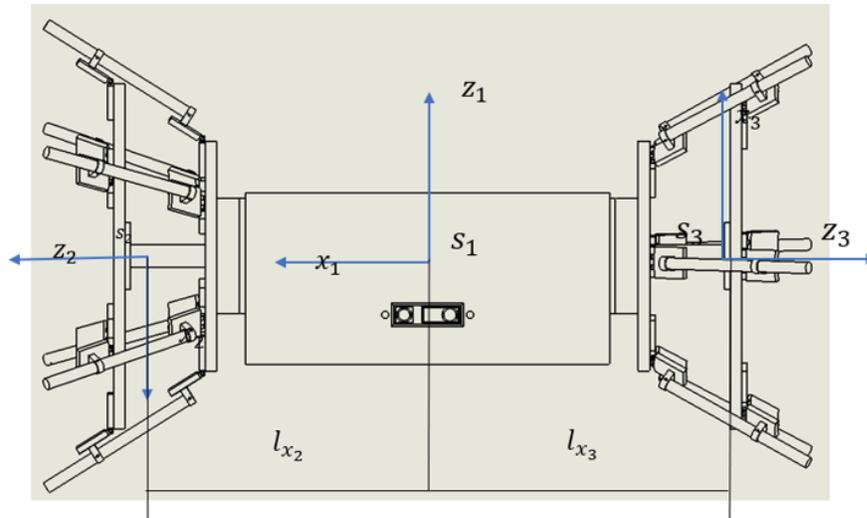
$$q = [x_1 \ y_1 \ \varphi_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$$

✓ **Donde:**

- $\varphi_1$ : Ángulo de yaw del robot.
- $\theta_2 ; \theta_3$ : Ángulo de rotación de los sólidos 2 y 3 (aspas).



**Figura 3.12** Coordenadas del robot (aspas contraídas) con respecto al centro de coordenadas inercial.



**Figura 3.13** Coordenadas en dos dimensiones, eje X y Z (aspas contraídas).

Sus ecuaciones de orientación y velocidades angulares están representadas con las siguientes ya descritas en el capítulo 2. A continuación, se muestra los resultados de las ecuaciones con el valor de los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$ .

$$A^2 = A^1 * A^{1,2}$$

$$A^3 = A^1 * A^{1,3}$$

$$A^1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A^{1,2} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{pmatrix},$$

$$A^{1,3} = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{pmatrix}$$

➤ **Velocidades angulares de todos los sólidos**

$$\mathbf{w}^i = \mathbf{G}^i(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}}$$

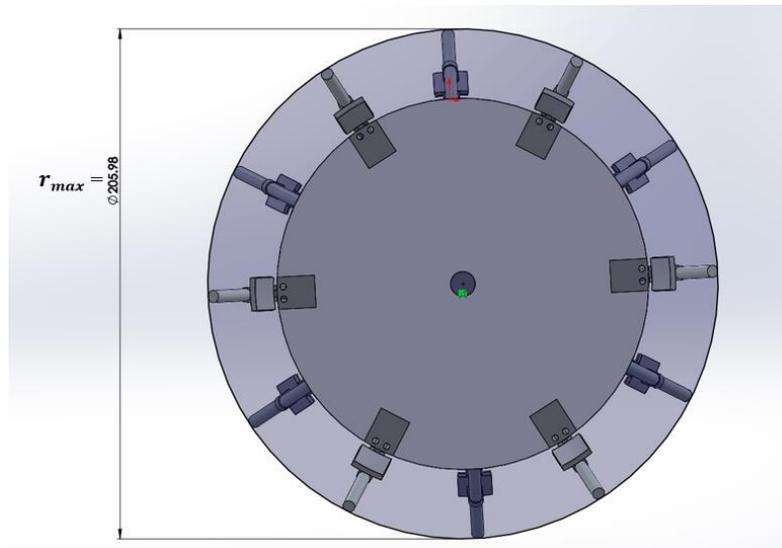
Especificando:

$$w_1 = G^1(q) * \dot{q}$$

$$w_2 = G^2(q) * \dot{q}$$

$$w_3 = G^3(q) * \dot{q}$$

➤ **Posición y velocidad de traslación de los sólidos**



**Figura 3.14** Punto tangente de radio exterior e interior.

$$R_{eq} = \frac{d_f}{2}$$

✓ **Donde:**

- $R_{eq}$ : Radio equivalente.
- $r_{max}$ : Radio de la circunferencia exterior tangente a las aspas.

Teniendo eso en consideración, se puede decir que para este proceso estará a una altura constante. Para simplicidad de diseño, se asumirá que ambas locomociones aumentan y disminuyen sus diámetros a la misma vez.

➤ **Posición de los sólidos**

$$R_1 = [x_{G_1}; y_{G_1}; R_{eq}]^T$$

$$R_2 = R_1 + A^2 * \overline{U}_2; \overline{U}_2 = [l_{x_2}; 0; 0]^T$$

$$R_3 = R_1 + A^3 * \overline{U}_3; \overline{U}_3 = [-l_{x_3}; 0; 0]^T$$

➤ **Vector de los puntos de contacto de las 2 ruedas con el suelo**

$$\overline{U}_P = [R_{eq} * \sin \theta_2 \quad 0 \quad -R_{eq} * \cos \theta_2]^T$$

$$\overline{U}_Q = [R_{eq} * \sin \theta_3 \quad 0 \quad -R_{eq} * \cos \theta_3]^T$$

➤ **Hallando las velocidades de traslación de los sólidos**

$$v_{G_i} = H^i(q) * \dot{q}$$

Especificando:

$$v_1 = H^1(q) * \dot{q}$$

$$v_2 = H^2(q) * \dot{q}$$

$$v_3 = H^3(q) * \dot{q}$$

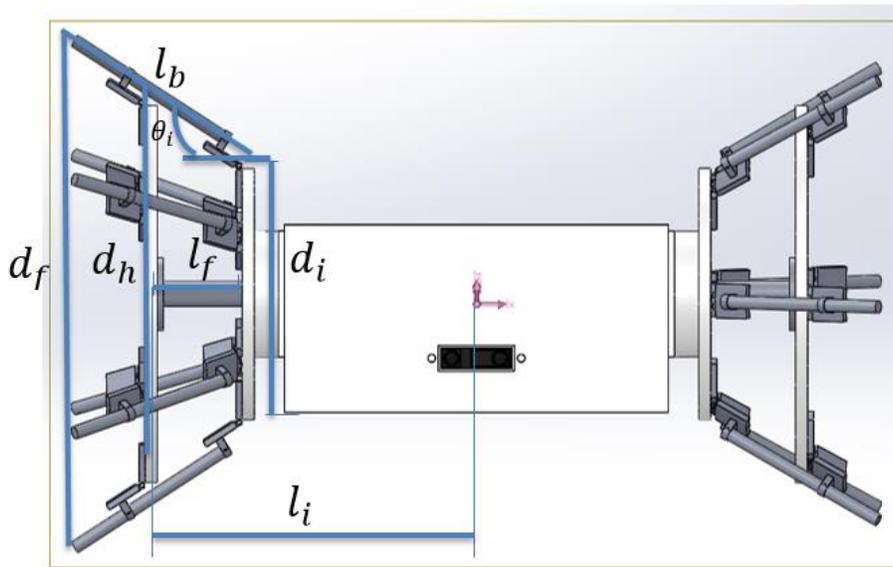
Por último, especificando las velocidades de los tres puntos de contacto de las ruedas con el suelo:

$$V_P = V_2 + A^2 * (\overline{w}_2 \times \overline{U}_P)$$

$$V_Q = V_3 + A^3 * (\overline{w}_3 \times \overline{U}_Q)$$

➤ **Proceso 2:** Para este proceso se considerará estático del robot y se trabajará solo con el proceso de expansión a contracción.

- **Sólido 2.**



**Figura 3.15** Coordenadas del centro de gravedad del sólido 2.

$$l_f = v$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{(d_h - d_i)}{2 l_f}\right)$$

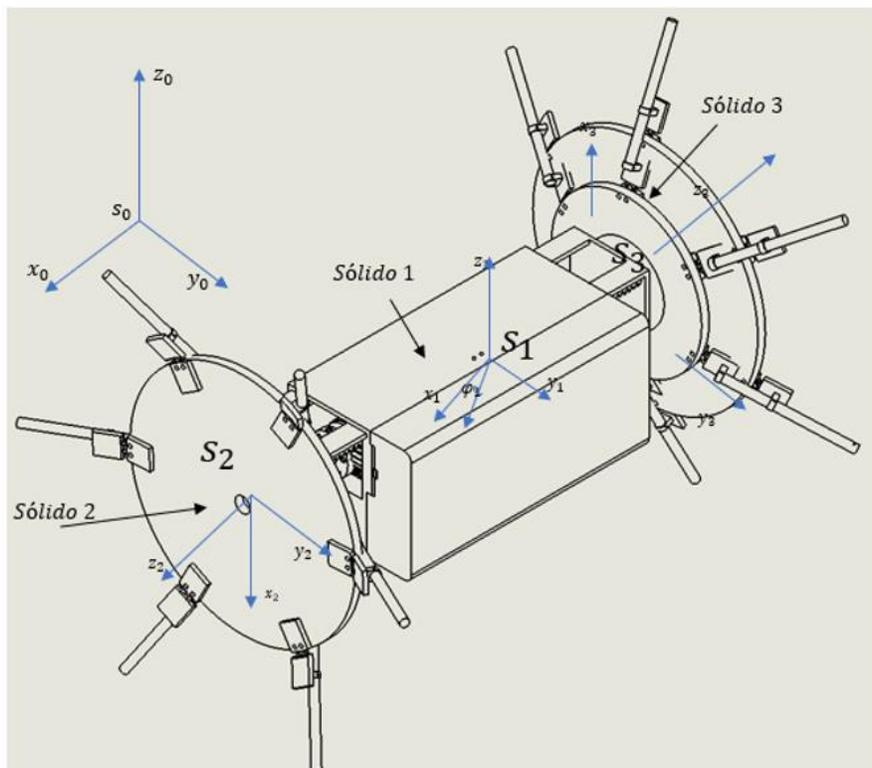
$$d_f = d_i + 2l_b * \sin(\theta_i)$$

- **Proceso 3:** Este proceso es similar al presentado en el primero, solo que no contiene la consideración del radio medio. Es el análisis con el diámetro en expansión.

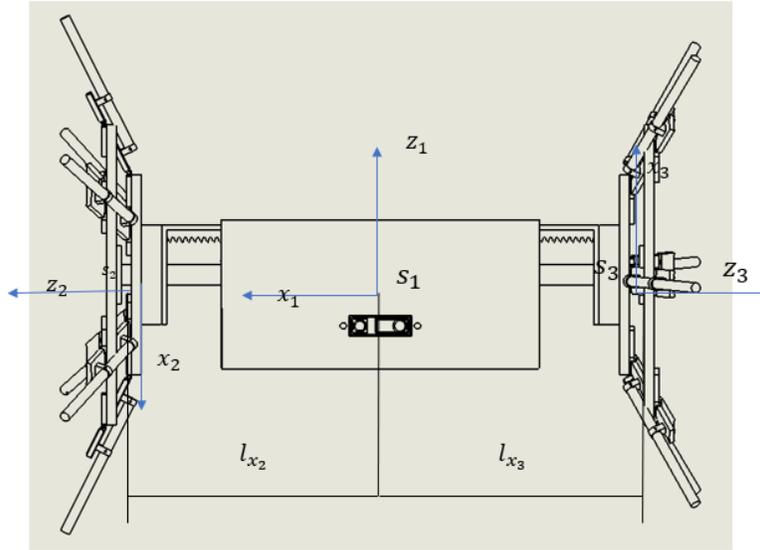
$$q = [x_1 \ y_1 \ \varphi_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$$

✓ **Donde:**

- $\varphi_1$ : Ángulo de yaw del robot.
- $\theta_2 \ \theta_3$ : Ángulos de rotación de los sólidos 2 y 3 (rueda).



**Figura 3.16** Coordenadas del robot (aspas expandidas) con respecto al centro de coordenadas inercial.



**Figura 3.17** Coordenadas en dos dimensiones, eje X y Z (aspas expandidas).  
Fuente: Propia

➤ **Orientación y velocidades angulares**

$$A^2 = A^1 * A^{1,2}$$

$$A^3 = A^1 * A^{1,3}$$

$$A^1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A^{1,2} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{pmatrix}$$

$$A^{1,3} = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{pmatrix}$$

➤ **Velocidades angulares de todos los sólidos**

$$\mathbf{w}^i = \mathbf{G}^i(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}}$$

Especificando:

$$w_1 = G^1(q) * \dot{q}$$

$$w_2 = G^2(q) * \dot{q}$$

$$w_3 = G^3(q) * \dot{q}$$

Calculamos la posición de los sólidos en donde R representa el radio de la rueda:

$$\mathbf{R}_1 = [x_{G_1}; y_{G_1}; R]^T$$

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1 + A^2 * \overline{\mathbf{U}}_2; \overline{\mathbf{U}}_2 = [l_{x_2}; \mathbf{0}; \mathbf{0}]^T$$

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_1 + A^3 * \overline{\mathbf{U}}_3; \overline{\mathbf{U}}_3 = [-l_{x_3}; \mathbf{0}; \mathbf{0}]^T$$

El vector de los puntos de contacto de las 2 ruedas con el suelo se presenta de la siguiente manera:

$$\overline{\mathbf{U}}_P = [R_{eq} * \sin \theta_2 \quad \mathbf{0} \quad -R_{eq} * \cos \theta_2]^T$$

$$\overline{\mathbf{U}}_Q = [R_{eq} * \sin \theta_3 \quad \mathbf{0} \quad -R_{eq} * \cos \theta_3]^T$$

Ahora, se hallan velocidades de traslación de los sólidos con la siguiente expresión:

$$\mathbf{v}_{G_i} = \mathbf{H}^i(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}}$$

Especificando:

$$v_1 = H^1(q) * \dot{q}$$

$$v_2 = H^2(q) * \dot{q}$$

$$v_3 = H^3(q) * \dot{q}$$

Por último, las velocidades de los dos puntos de contacto de las ruedas con el suelo:

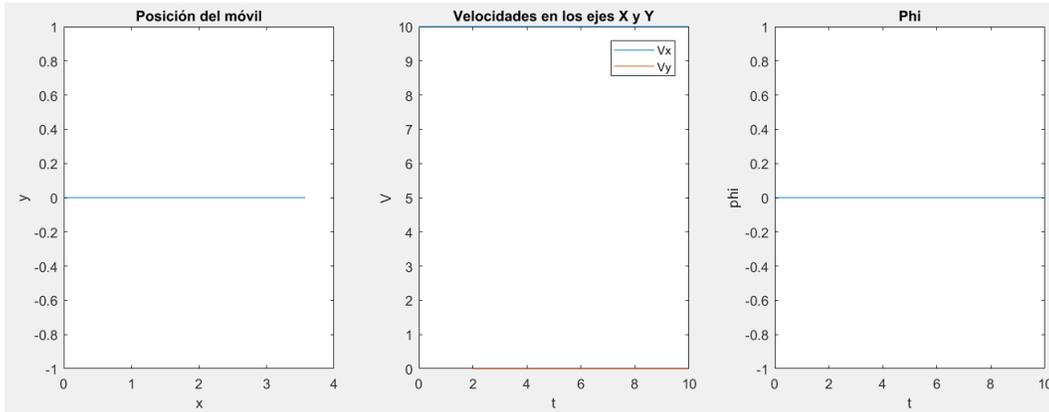
$$V_P = V_2 + A^2 * (\overline{w_2} \times \overline{U_P})$$

$$V_Q = V_3 + A^3 * (\overline{w_3} \times \overline{U_Q})$$

En este caso, se simulará en primer lugar el comportamiento del robot con respecto a una trayectoria en línea recta, es decir, cuando la velocidad angular de ambas locomociones en modo aspa son las mismas. Posteriormente, se observará el comportamiento del robot cuando la velocidad de una de las ruedas es superior a la otra (dibujando una trayectoria circular) y finalmente, se comparará en cuál de los dos modos de marcha, tanto aspa como rueda, el robot va a mayor velocidad.

➤ **Aspas Expandidas:**

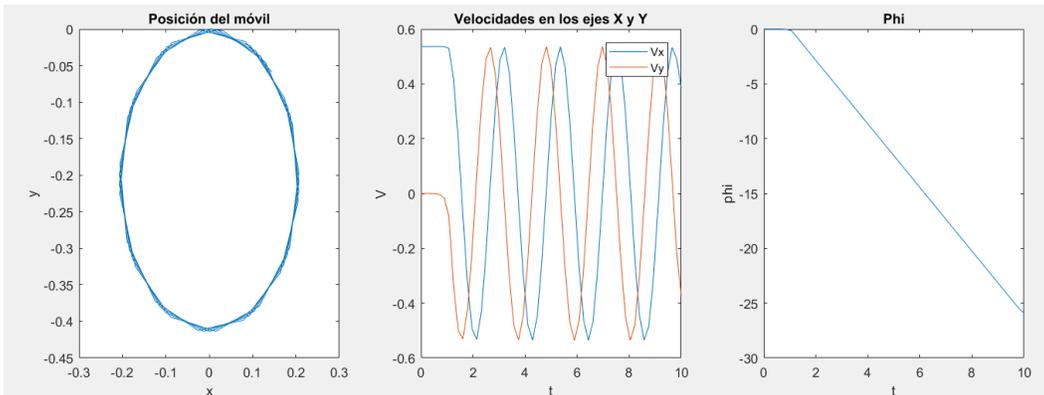
- **Primer caso:** La velocidad angular de ambas aspas son las mismas:  $\omega_d = 5 \text{ rad/s}$  ;  $\omega_i = 5 \text{ rad/s}$ .



**Figura 3.18** Simulación del movimiento en línea recta del robot.

En 3.18 se observa como primera simulación a ambas ruedas cuando se les da las mismas velocidades, pudiendo ver que el movimiento es en línea recta horizontal. Al ver la gráfica de velocidades se nota que, efectivamente, solo se mueve en un eje que es el X y con la gráfica de phi y de posición, se observa que no posee giros.

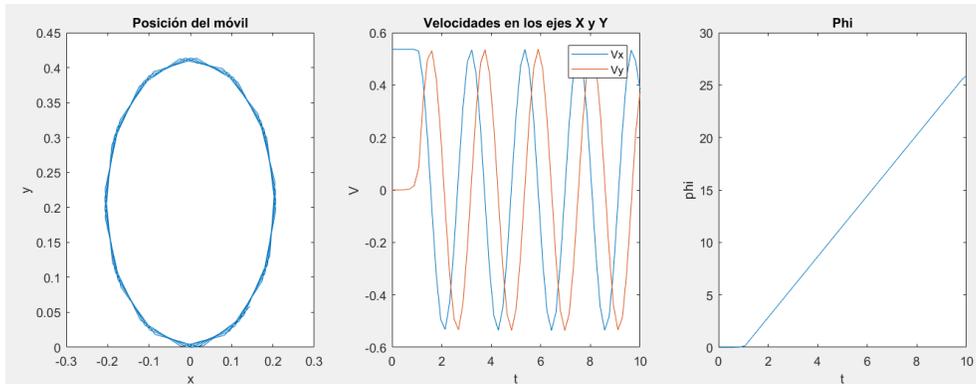
- **Segundo caso:** La velocidad angular de la rueda izquierda es mayor a la derecha:  $\omega_d = 5 \text{ rad/s}$  ;  $\omega_i = 10 \text{ rad/s}$ .



**Figura 3.19** Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido horario).

En 3.19 se muestra un ángulo phi con pendiente negativa, esto indica que realiza un giro horario lo cual concuerda con la gráfica de posición y de velocidades donde en conjunto se observa que empieza bajando y avanzando formando una circunferencia.

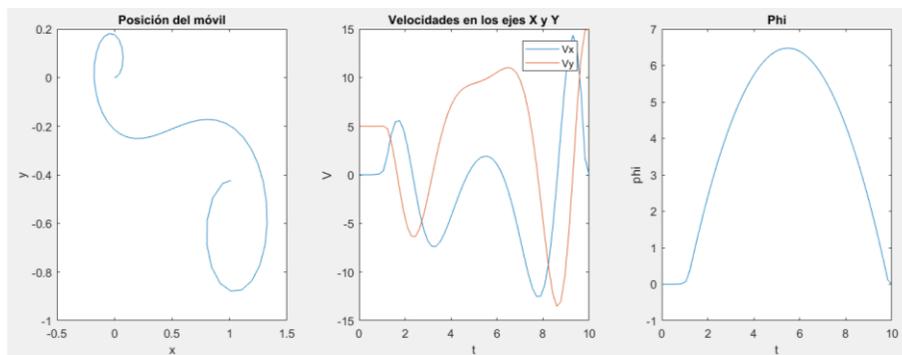
- **Tercer caso:** La velocidad angular de la rueda derecha es mayor a la de la rueda izquierda:  $\omega_d = 10 \text{ rad/s}$  ;  $\omega_i = 5 \text{ rad/s}$ .



**Figura 3.20** Movimiento del robot dibujando una circunferencia (sentido anti horario).

Como contraste, en 3.20, se invierten las velocidades entre las ruedas pudiendo observar en la gráfica del ángulo phi que tiene un giro anti horario, esto se confirma con la gráfica de velocidades donde se observa que efectivamente inicia subiendo y retrocediendo.

- **Cuarto caso:** Se da cuando se asigna una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  al aspa izquierda. En este caso se mantiene  $\omega_d = 5 \text{ rad/s}$ .

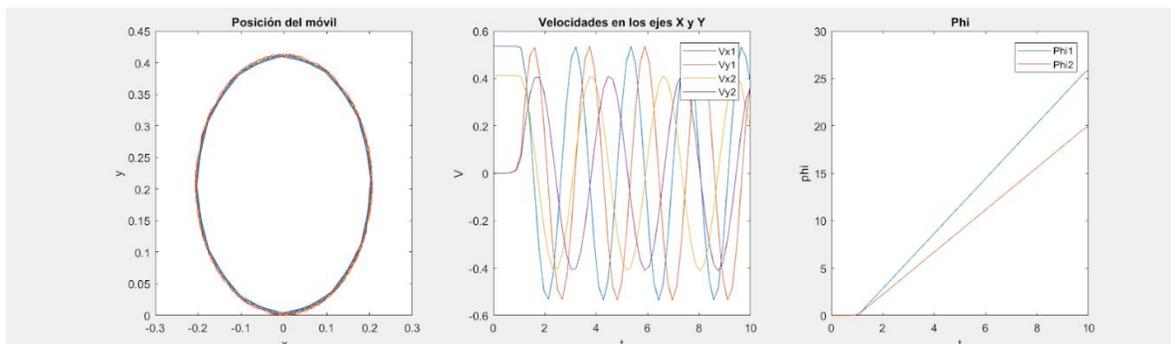


**Figura 3.21** Movimiento del robot asignando aceleración a un aspa.

En 3.21 se muestra que entre cero y 1.5 segundos el robot se encuentra sin realizar ningún giro; sin embargo, esto cambia en 1.6 segundos, en donde el robot realiza un movimiento en sentido anti horario hasta el segundo 6 aproximadamente. Esto último se muestra en la gráfica de posición en donde efectivamente se ve que en primera instancia el robot realiza un giro en el mismo sentido, mientras que luego de 7 segundos, el robot realiza un giro en sentido de las manecillas del reloj. La gráfica de velocidades, muestra el comportamiento de los mismos con respecto al eje X y eje Y.

➤ **Comparación entre aspas retraídas y expandidas:**

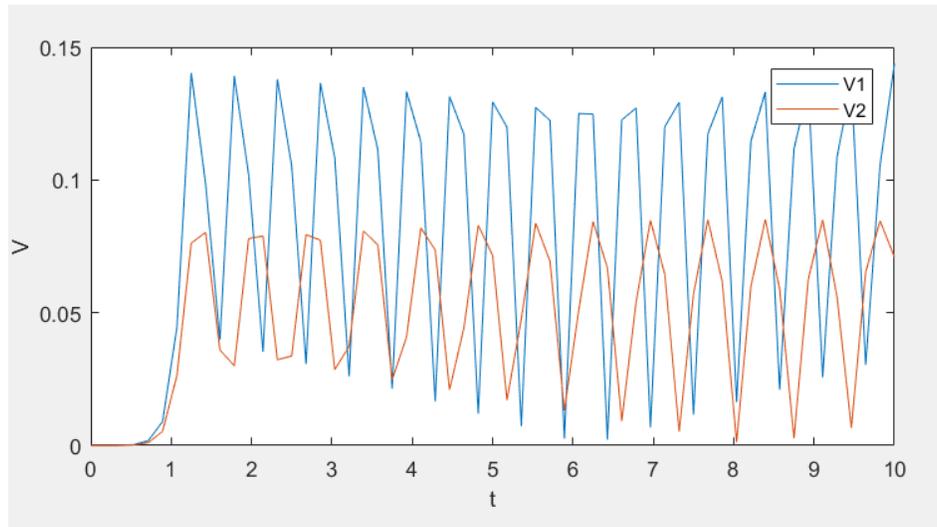
- **Primer caso:** Comparación entre aspas expandidas y retraídas cuando:  $\omega_d = 10 \text{ rad/s}$  ;  $\omega_i = 5 \text{ rad/s}$ . Cabe resaltar, que estos valores mencionados de velocidades angulares son con aspas retraídas.



**Figura 3.22** Comparación entre aspas expandidas y retraídas.

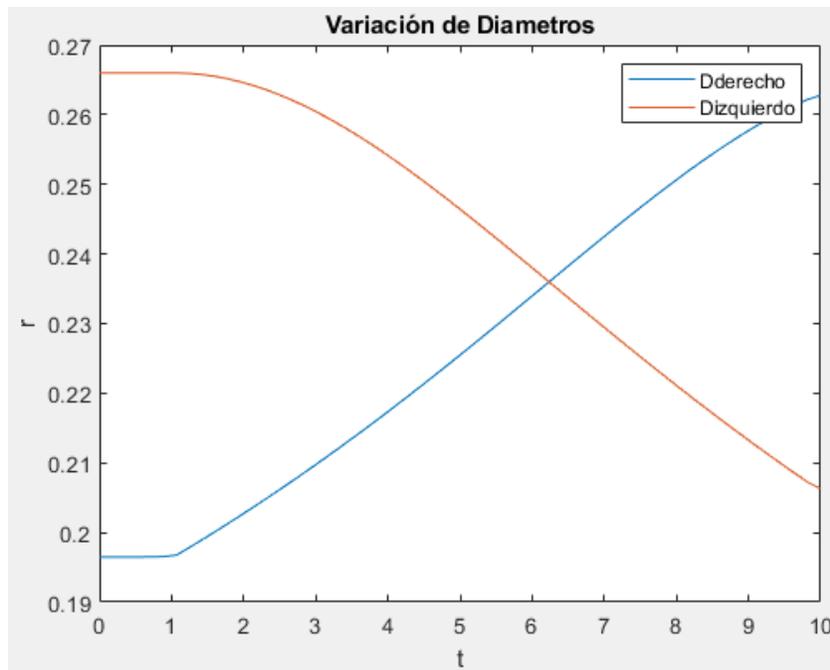
Se puede observar que la trayectoria es aproximadamente la misma. En lo que sí se pueden diferenciar es en la gráfica del ángulo phi y es que en aspas expandidas tiene mayor velocidad de giro y por el lado de la velocidad lineal se observa que efectivamente, las velocidades lineales del objeto con aspas retraídas son menores que las aspas expandidas. Lo que sucede es que con aspas expandidas la batería se consumirá más que con retraídas porque el motor DC se exigirá aún más.

Por último, se muestra 3.23 cuando se obtiene el módulo de velocidad del robot cuando las aspas se encuentran expandidas y retraídas.



**Figura 3.23** Módulo de velocidades entre aspas expandidas y retraídas.

Efectivamente,  $V1$  (velocidad en aspas expandidas) muestra ser más rápido que  $V2$  (velocidad con aspas retraídas).

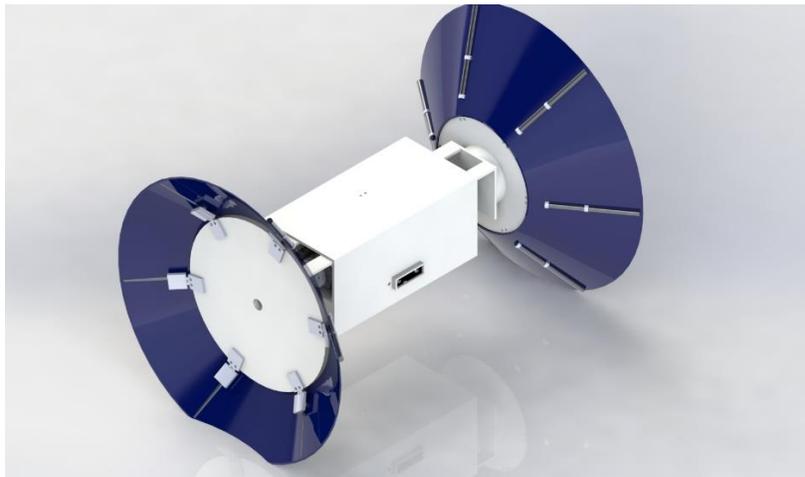


**Figura 3.24** Variación de diámetros cuando un aspa se expande y otro se contrae.

### 3.3. Análisis estático

Se realizó un análisis estático a cada una de las piezas por separado y así observar, de manera más detallada, la respuesta que estos puedan tener de acuerdo a los diferentes esfuerzos a los que serán sometidos. En primer lugar, se usó el V-REP como herramienta de simulación de comportamiento para observar posibles fallas mientras el robot se encuentra en movimiento. Por ese motivo, como se observa en 3.25, se observa que el aspa en donde reposa el móvil, puede sufrir deformaciones laterales, es por eso que en 3.26, se observa la deformación en metros que presenta cada aspa.

Es importante recalcar, que el material que se ha utilizado para esta simulación es el acrilonitrilo butadieno estireno o ABS. Este es un plástico muy resistente al impacto y es muy utilizado en automoción y otros usos como industriales o domésticos. Por último, también se recalca que la fuerza que va a soportar cada aspa es el peso del robot, es decir 2,034 Kg-Fuerza que representa aproximadamente 20 N



**Figura 3.25** Deformación lateral del punto en donde reposa el aspa.

En primera instancia y como se observa en 3.26, la deformación es mínima y se da en el extremo derecho de los tubos fijos con un valor de 0.0005 metros, es decir 0.5 mm. Las fuerzas aplicadas son solo laterales porque cuando el robot se encuentra subiendo una pendiente tiende a resbalar o inclinarse, por un lado, es ahí en donde se intensifica la deformación mostrada en la figura 3.26. Es por ese motivo que el tubo fijo muestra pequeños esfuerzos a los que es sometido el material, considerando al resto del sólido íntegro. El valor de Von Mises en la simulación en Ansys es de  $1.59 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  equivalente a 200 MPa. Al encontrarse constantemente en compresión, el valor del esfuerzo es de 86.2 MPa, lo que nos da un factor de seguridad de 2.32. Esto es viable para nuestros propósitos de diseño.

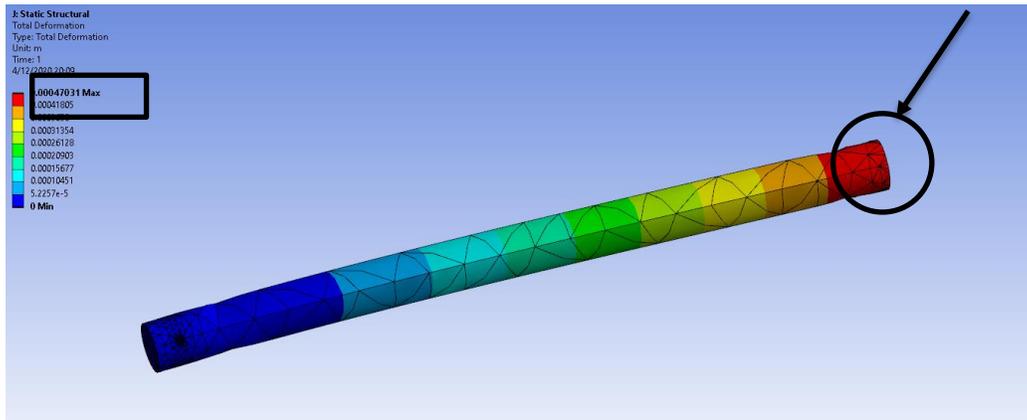


Figura 3.26 Punto de deformación y contacto.

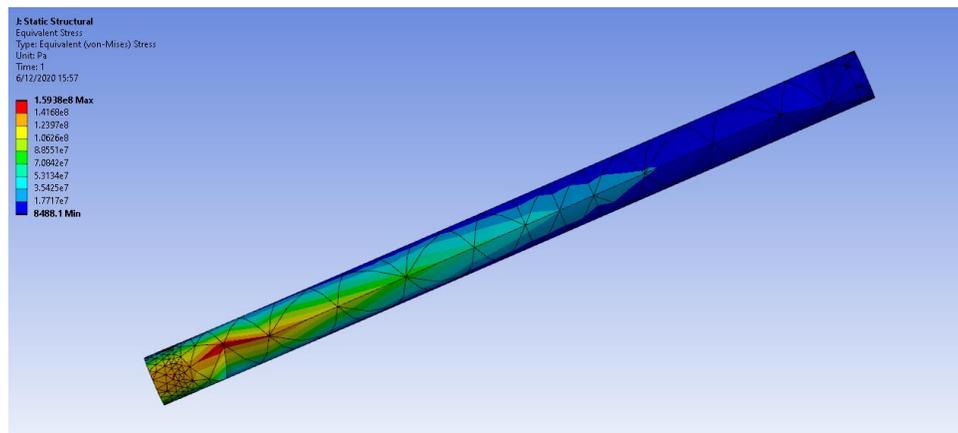
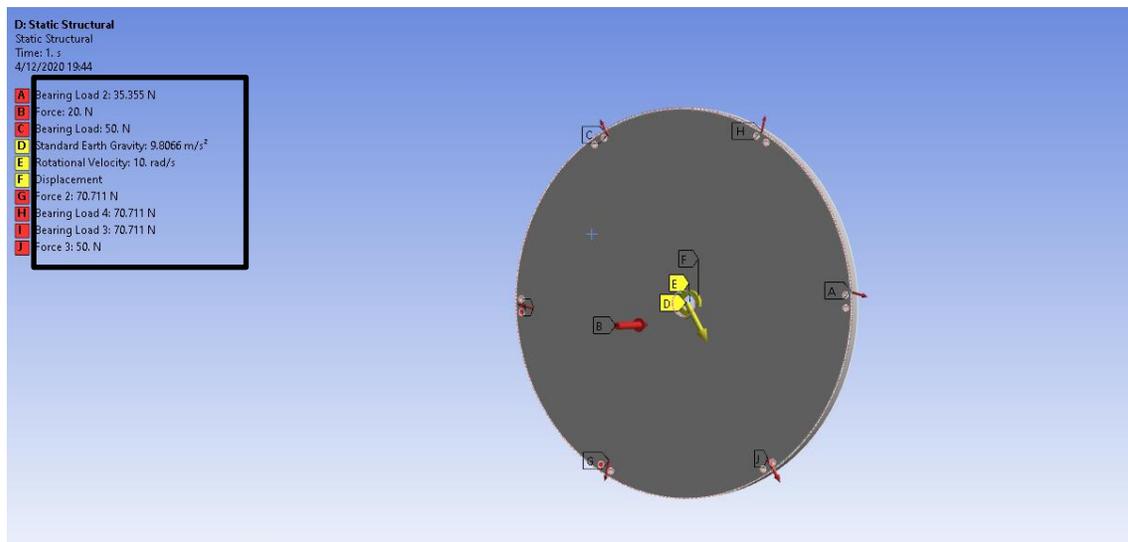


Figura 3.27 Esfuerzo de Von Mises del tubo fijo.

En segundo lugar, se aplica una carga de 35 N (por el peso de cada tubo fijo). De aquí, se observa en 3.28 las fuerzas que han sido colocadas de manera reactiva con respecto al peso de cada tubo fijo. En 3.29, se ve que la ubicación externa del plato (es decir, lo que se encuentra alrededor de su circunferencia) es la que más se deforma, esto tiene sentido ya que es la que soporta los tubos fijos y es la que está en constante movimiento de expansión y contracción. El valor de esta deformación es de 0.00272 mm. El momento generado en el punto E es de 100 N.m. Por otro lado, en 3.30, se muestra el esfuerzo más crítico que tiene un valor de 11.82 MPa, sabiendo que está parte del plato está siendo sometido a compresión con un valor de resistencia de 86.2 MPa. Esto nos da un factor de seguridad de 1.134, que indica que nuestro diseño no sufrirá alteraciones en su geometría.



**Figura 3.28** Fuerzas aplicadas en el plato externo (fuerzas superiores y de contacto).

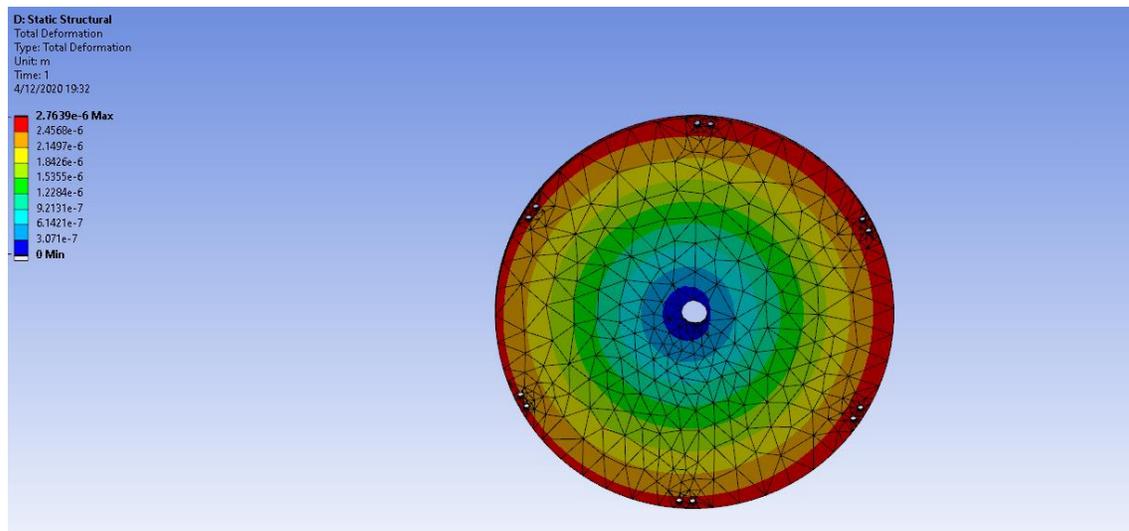


Figura 3.29 Análisis de deformación (fuerzas superiores y de contacto).

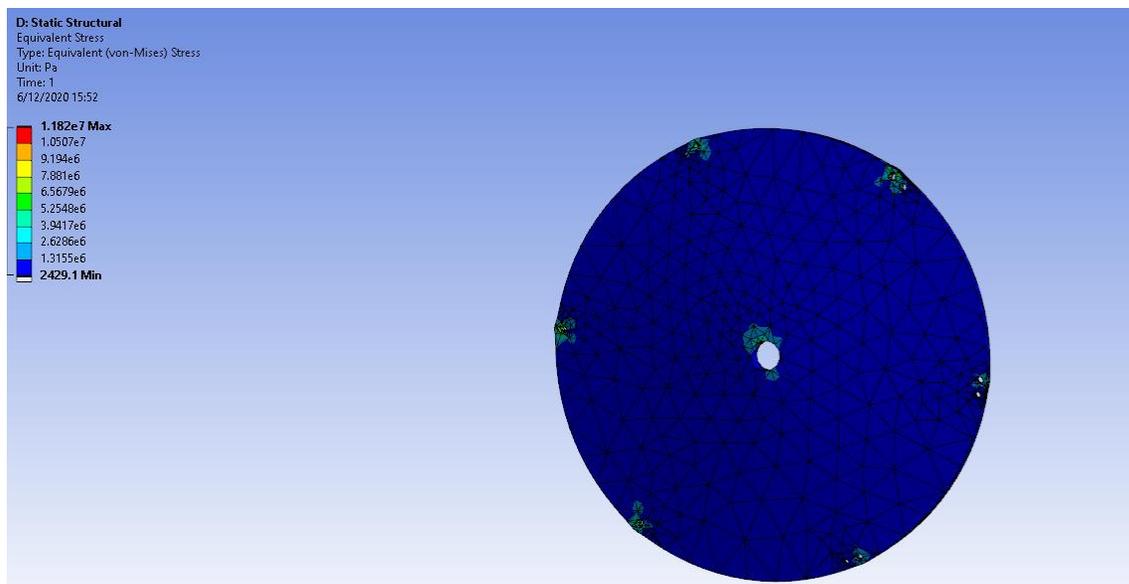
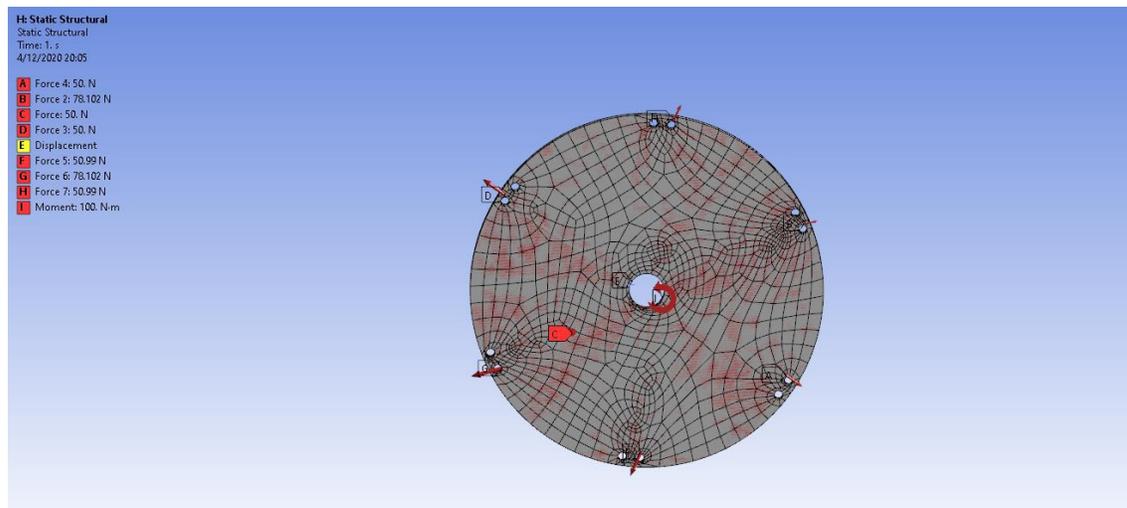
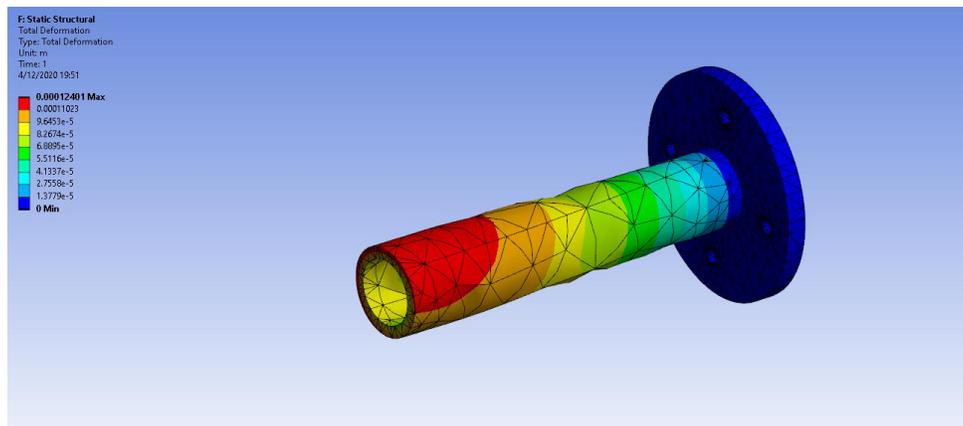


Figura 3.30 Valor del esfuerzo Von Misses de la parte central del plato.

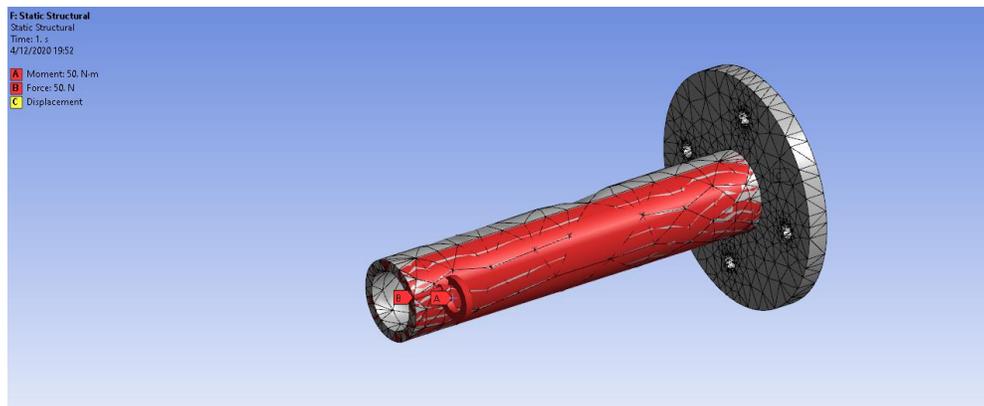


**Figura 3.31** Valor del momento generado en la parte central del plato.

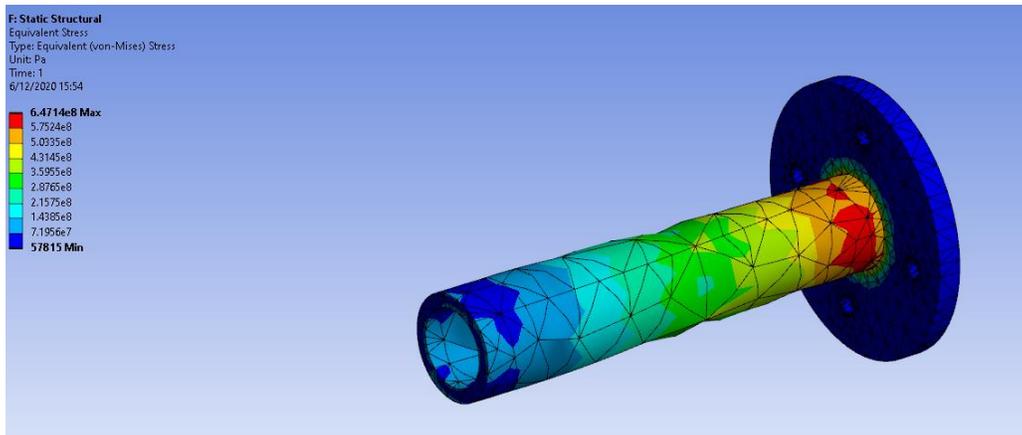
En tercer lugar, se muestra la unión entre el motor DC y el plato que permite la expansión-contracción de la locomoción del robot. En este caso, se observa en 3.32 que la parte que más sufre deformación es la unión con el eje del motor, esto tiene sentido ya que es la soporta, en parte, el peso del plato circular. De igual forma, el material solo se deforma 0.12 mm. Como va a estar en constante giro, se muestra 3.33, en donde el valor del momento es de 50 N.m. De la misma forma, en 3.34 se observa que el mecanismo estará en constante tracción, por lo que toma un valor de resistencia a la tracción de 55.2 MPa, mientras que, según nuestro cálculo, el valor del esfuerzo Von Misses es de 647 MPa. En conclusión, obtenemos un factor de seguridad de 8.513. Esto no es perjudicial para nuestro diseño.



**Figura 3.32** Conexión entre motor DC y plato de extensión-contracción.

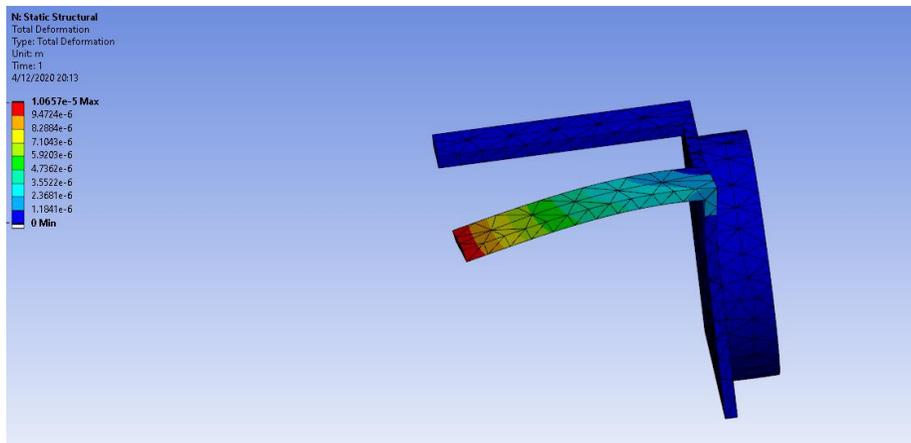


**Figura 3.33** Momento generado entre motor DC y plato de extensión-contracción.

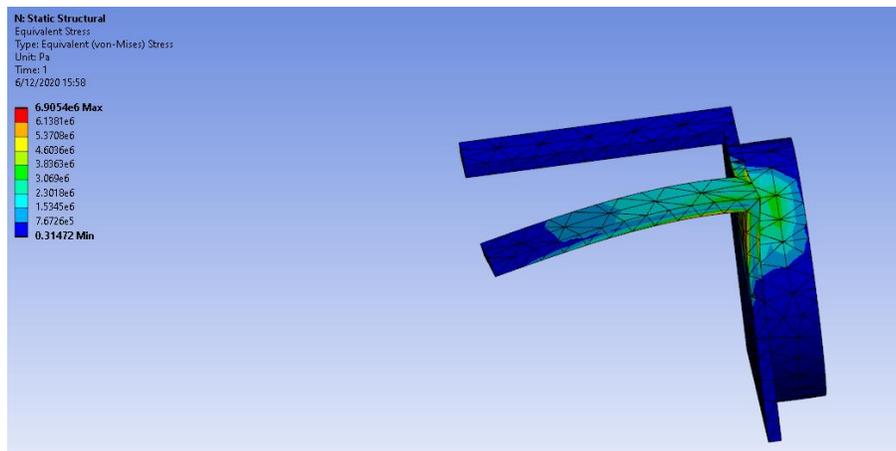


**Figura 3.34** Esfuerzo generado en la unión entre motor DC y plato de extensión-contracción.

Como se observa en 3.35, la parte que más sufre deformación es la que sostiene la cremallera ya que esta última va pegada a esta unión. De esta forma se asegura el funcionamiento de extensión y compresión. De la misma forma que los anteriores casos, la deformación máxima es de 0.0011 mm, muy pequeña. En 3.36 se muestra que el este mecanismo estará en constante compresión, por ese motivo se tiene un valor de resistencia a la compresión de 86.2 MPa; mientras que el valor del esfuerzo de Von Mises es de 6.9 MPa. Como consecuencia se obtiene un factor de seguridad de 1.134, esto nos indica que el material indicado y las dimensiones son las correctas para este diseño.



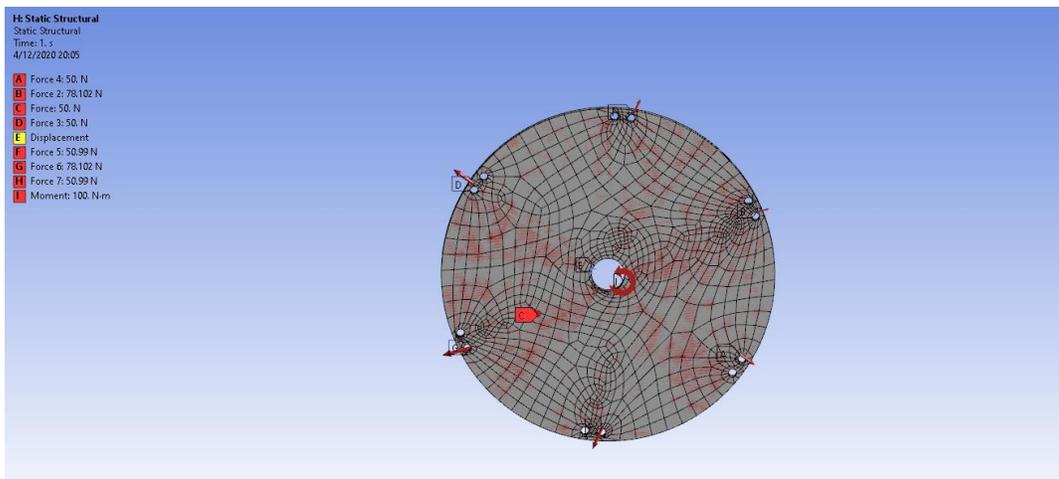
**Figura 3.35** Deformación entre unión de cremallera y soporte de plato de extensión.



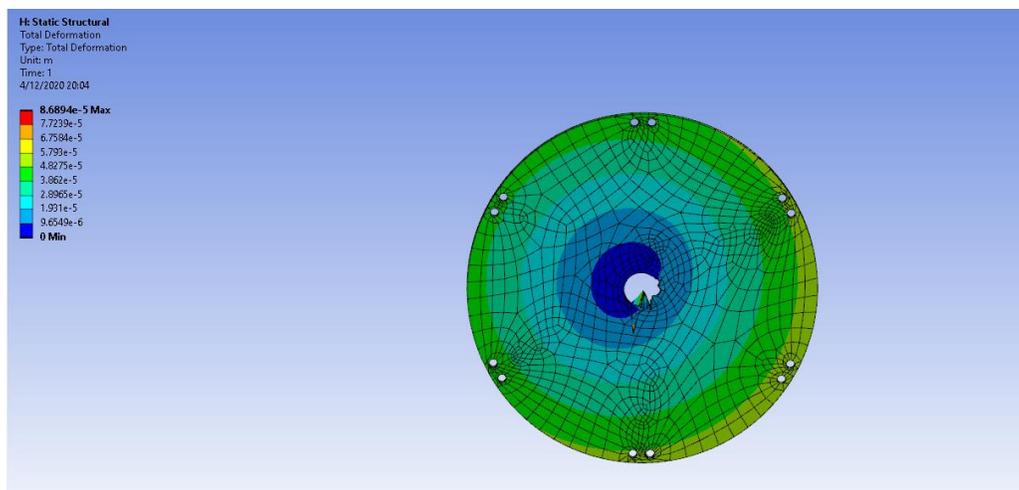
**Figura 3.36** Valor del esfuerzo Von Misses entre unión de cremallera y soporte de plato de extensión.

Lo anterior muestra que el mayor esfuerzo se da en la unión entre el plato de expansión-contracción y el motor DC. Esto tiene concordancia ya que va a tener que soportar el peso del plato giratorio y, además, va a ser el que se encuentre en constante movimiento ya que se encarga de la expansión y contracción de las aspas.

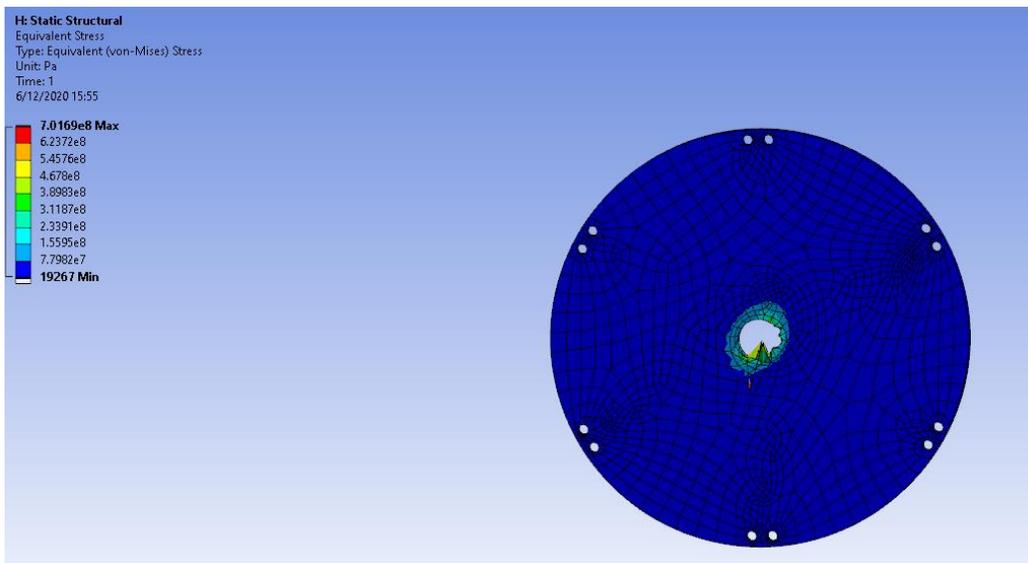
De 3.37 se puede observar que el segundo plato que se encuentra detrás del principal, solo posee un momento con valor de 100 N.m. De la misma forma, la deformación es muy pequeña ya que es de 0.08 mm, lo que indica que, por el momento, el diseño no pasará por alteraciones que comprometan su funcionamiento. Con respecto a si se encuentra en tracción y compresión, efectivamente el que predomina es este último. Por ende, se toma un valor de resistencia a la compresión de 86.2 MPa mientras que le Von Misses nos arroja un valor de 623 MPa. De la misma forma que los puntos anteriores, se obtiene un factor de seguridad de 8.197, lo que se encuentra dentro del rango máximo de 10; sin embargo, para prever futuras dificultades, es mejor cambiar el material por uno liviano y resistente.



**Figura 3.37** Fuerzas aplicadas en el segundo plato de extensión.



**Figura 3.38** Valor de la deformación máxima en el segundo plato de giro.



**Figura 3.39** Valor de Von Misses en el segundo plato de giro.

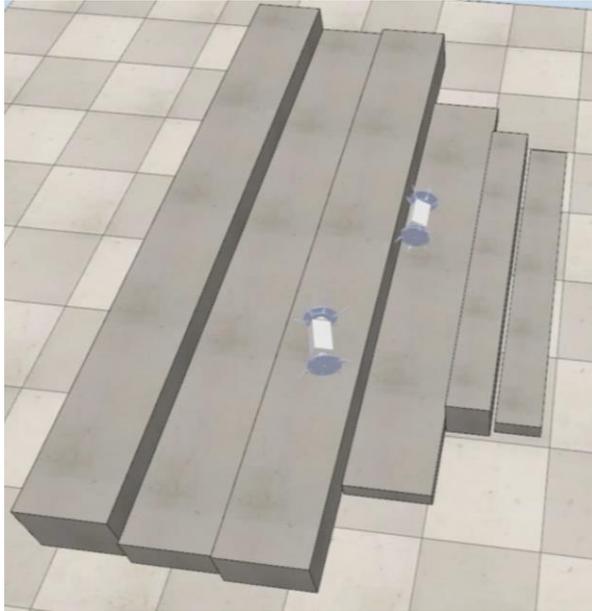
Las propiedades tomadas en cuenta para el material ABS se muestran en la tabla 3.2 de donde se desprende cada uno de los análisis y resultados obtenidos de los factores de seguridad.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo Elástico	$2 * 10^9$	$\frac{N}{m^2}$
Coeficiente de Poisson	0.394	$\frac{N}{D}$
Resistencia Mecánica a la compresión	$86.2 * 10^6$	$\frac{N}{m^2}$
Resistencia mecánica a la tensión	$55.2 * 10^6$	$\frac{N}{m^2}$
Resistencia mecánica a la flexión	$76 * 10^6$	$\frac{N}{m^2}$

**Tabla 3.2** Propiedades mecánicas del ABS. Fuente: SolidWorks.

### 3.4. Demostración de la utilidad de una rueda reconfigurable

El modelamiento del robot reconfigurable se realizó exportando el diseño de SolidWorks al software Matlab usando el Toolbox Simscape. De la misma forma, se consideró en la simulación la condición de rodadura sin deslizamiento.



**Figura 3.40** Funcionamiento del robot en software V-REP.

### 3.4.1. Simulación del robot en superficie plana e inclinada

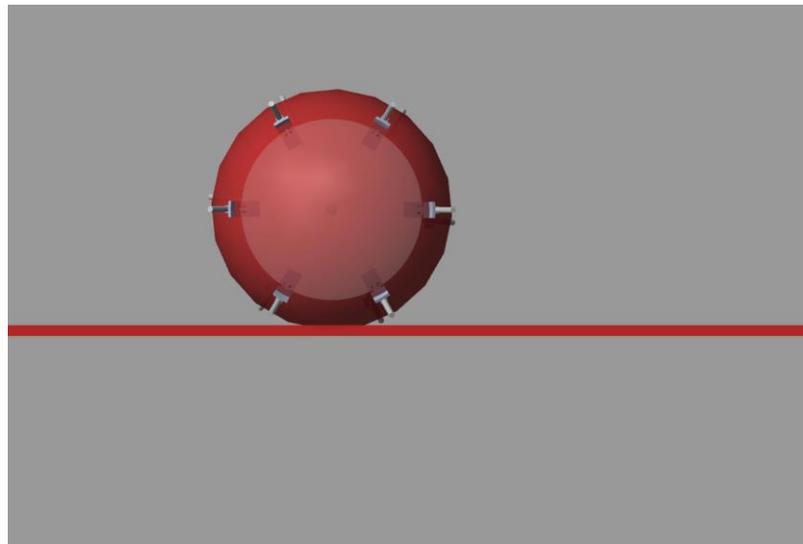
Se realizará la simulación del robot reconfigurable con las ruedas contraídas y extendidas (aspas) en una superficie plana y otra con una pendiente inclinada de  $60^\circ$  como se menciona dentro de los alcances de la tesis.

Posteriormente, se compararán los torques obtenidos para cada caso (ruedas contraídas y extendidas), y de esta forma se demostrará la utilidad de una rueda reconfigurable.

- **Superficie plana**

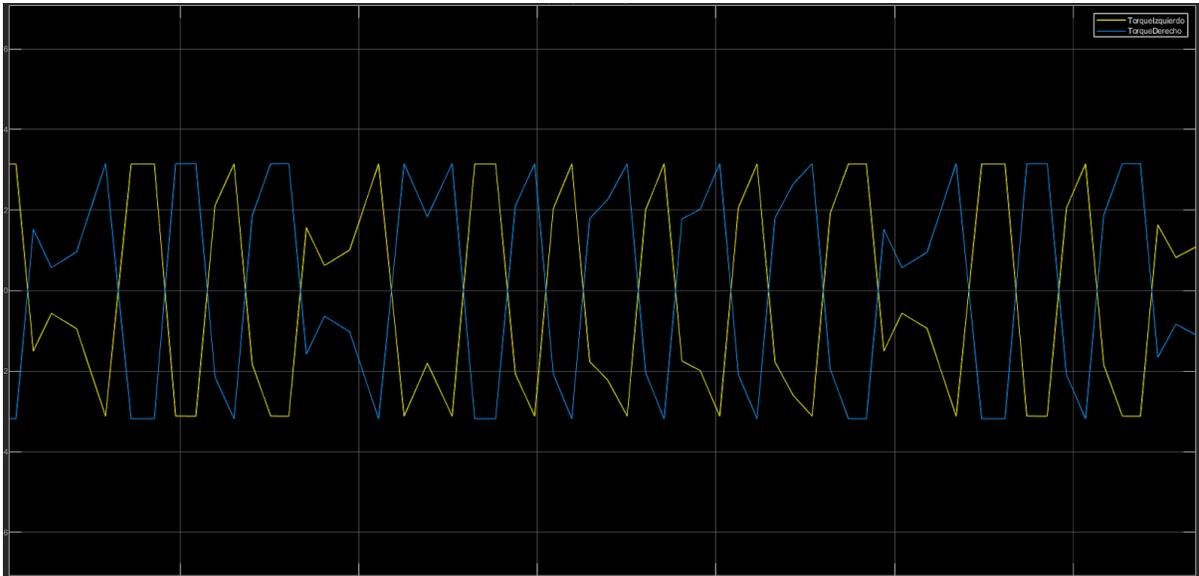
Se coloca al robot en el eje de coordenadas inerciales y a partir de ahí sigue una trayectoria en línea recta. Cabe resaltar que se consideró un coeficiente de fricción cinética de 0.46 al igual que el material ABS. Esto porque no sabemos cómo será el comportamiento del material al estar en contacto con otro tipo de superficie, el cual puede ser diverso: Tierra con agua, madera, piedras pequeñas con diámetro de 1 cm o planas, etc.

En la siguiente figura se puede observar la posición del robot y en la siguiente, la oscilación o curva del torque versus tiempo mientras las aspás se encuentran expandidas.



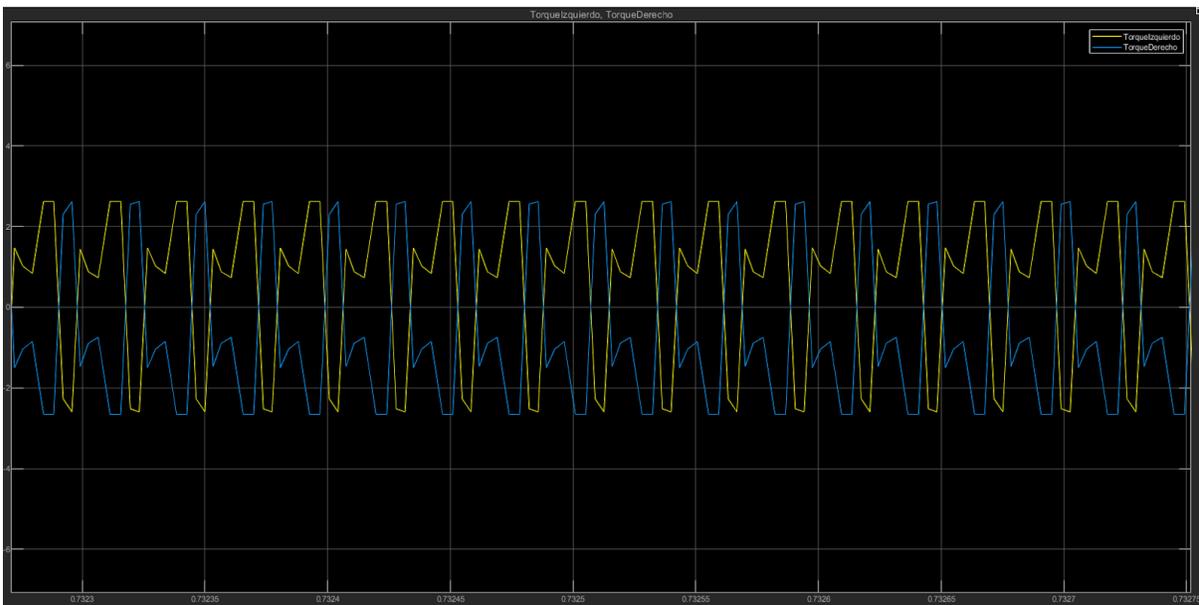
**Figura 3.41** Simulación del robot (aspas expandidas) en superficie plana.

El torque computarizado cuando la locomoción del robot se encuentra en tipo aspa expandidas oscila entre los valores de  $\pm 3$  N-m.



**Figura 3.42** Torque vs Tiempo del robot (aspas) en superficie plana.

El torque computarizado cuando la locomoción del robot se encuentra en tipo aspa contraída oscila entre los valores de  $\pm 2$  N-m.

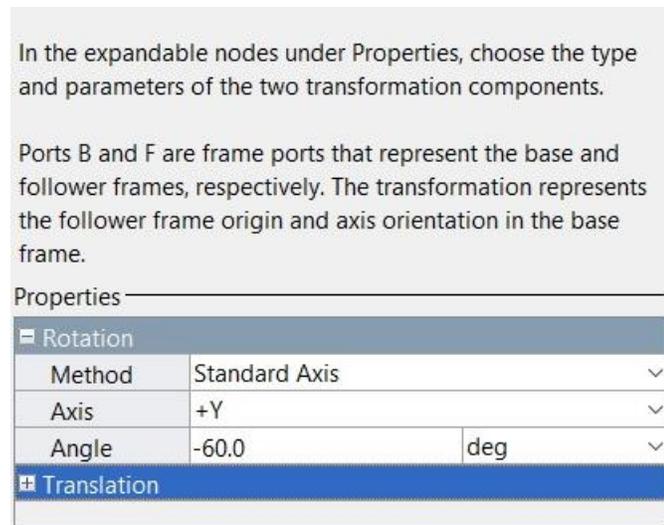


**Figura 3.43** Torque vs Tiempo del robot (aspas contraídas) en superficie plana.

En conclusión, en una superficie plana, el torque requerido para mover el robot reconfigurable oscila entre +/- 3 N-m para el caso de aspas expandidas y +/- 2 N-m en aspas contraídas. Sin embargo, la distancia recorrida resulta mayor en el caso de ruedas extendidas. Por lo tanto, en una superficie plana, la trayectoria resulta más eficiente en la posición del robot reconfigurable con aspas extendidas.

- **Superficie inclinada**

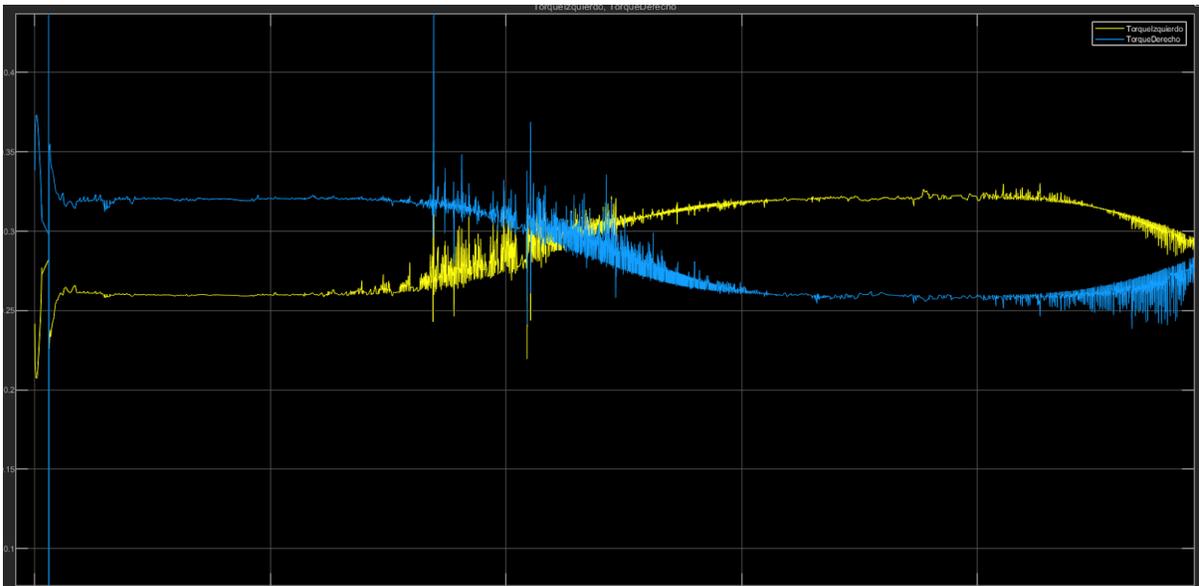
En este caso, para la inclinación de la rampa se simulará la rotación del plano en 60° con respecto al eje Y.



**Figura 3.44** Giro del eje Y de 60°.

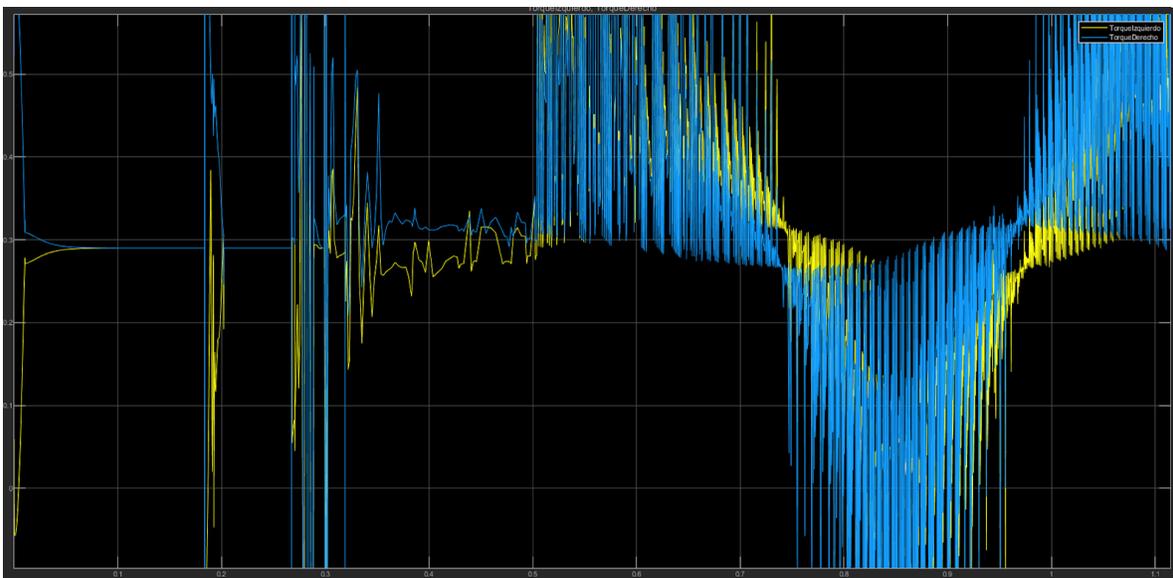
- ✓ Parámetro de bloque: Contacto de fuerza esfera-plano.
- ✓ Radio de la esfera debe ser igual al radio de la rueda sea contraída o extendida dependiendo de la simulación.

En primer lugar, para analizar de mejor manera la dinámica del robot en una inclinación de 60°, esta se dividirá en dos etapas cuando la locomoción se encuentra con ruedas contraídas y ruedas expandidas (aspas). La siguiente figura muestra torque vs tiempo cuando las ruedas se encuentran contraídas con el ángulo de inclinación ya mencionado. El valor del torque será de 0.29 N-m.



**Figura 3.45** Torque vs Tiempo del robot (aspas contraídas a 60°).

Posteriormente, se observa en 3.46 el torque cuando las aspas están expandidas. El valor promedio que se tomará será de 0.35 N-m.



**Figura 3.46** Torque vs Tiempo del robot (aspas expandidas a 60°).  
Fuente: Propia

➤ **Comparación y análisis de resultados:**

Según las gráficas de las simulaciones se han obtenido los siguientes resultados:

<b>Caso: Plano recto</b>	<b>Torque promedio (N-m)</b>
Rueda Extendida	+/- 3
Rueda Contraída	+/- 2

**Tabla 3.3** Valores de torque obtenidos en plano recto.

<b>Caso: Plano inclinado</b>	<b>Torque promedio (N-m)</b>
Rueda Extendida (60°)	+ 0.35
Rueda contraída (60°)	+ 0.29

**Tabla 3.4** Valores de torque obtenidos en plano inclinado de 60°.

En el caso del plano recto, sí existe diferencia en el uso de rueda expandida y contraída en términos de torque requerido lo que se traduce como energía consumida por ser magnitudes directamente proporcionales. Sin embargo, el uso de rueda contraída posee la ventaja de recorrer mayor distancia a mayor velocidad.

Finalmente, existe tanto una ventaja en usar aspas con mayor diámetro en superficies inclinadas y una ventaja en usar aspas con menor diámetro en superficies planas. Por lo que el hecho de presentar un mayor torque, hace que el robot sea capaz de subir pendientes mayores y no se quede a mitad de camino. En síntesis, el robot explorador tiene la versatilidad de controlar el diámetro de sus ruedas sería justificable para la optimización de energía, según sea el caso.

## CONCLUSIONES

Luego de haber desarrollado la tesis en su totalidad, es importante señalar las conclusiones que nos dejó el desarrollo de los resultados:

1. La simulación realizada en el software Matlab – Simulink, permitió demostrar la veracidad de nuestro diseño, por ese motivo se realizaron tres simulaciones de cinemáticas directas para las aspas reconfigurables. En primer lugar, se colocó un valor de velocidad angular de 5 rad/seg para ambas aspas y la respuesta del software fue que el robot se moverá en línea recta con un valor de ángulo de rotación phi o yaw de 0°. En segundo lugar, se colocó un valor de velocidad angular de 10 rad/seg al aspa izquierdo y el de aspa derecha una velocidad angular de 5 rad/seg, obteniéndose que el robot gira circularmente. De este último se obtuvo un ángulo phi o yaw con pendiente negativa, ya que el robot girará en sentido horario. Como tercer punto, se realizó el mismo cálculo planteado anteriormente, pero de manera inversa, el aspa derecha con una velocidad angular de 10 rad/seg y el aspa izquierda con una velocidad angular de 5 rad/seg. Igualmente se demostró que el robot dibuja una circunferencia, sin embargo, esta vez el ángulo phi o yaw tiene una pendiente positiva y esto se debe a que el robot se mueve de manera anti horaria.
2. Utilizando el software ANSYS, se realizaron varios análisis estáticos en donde la fuerza sometida fue variable. En primera instancia, para el caso de los tubos fijos se calculó el esfuerzo de Von Mises con una fuerza de 0.025 Kg-fuerza soportada por el peso del plato giratorio de expansión-contracción. De aquí se obtuvo un factor de seguridad de 2. Posteriormente, se desarrolló el análisis de otros componentes como el plato giratorio de expansión-contracción obteniendo un factor de seguridad de 0.137, también el del componente de conexión entre el motor DC y el plato giratorio de expansión-contracción teniendo un factor de seguridad de 1.72, asimismo, en el componente que une la cremallera con el plato de extensión y, en el segundo plato giratorio se obtuvieron valores

de factor de seguridad de 0.08 y 4.22. De esta forma, se demuestra que los componentes más críticos están dentro de un rango de factor de seguridad aceptable de diseño.

3. Simulink permitió conocer el torque que necesitan las locomociones del robot y en qué instante el motor DC obtiene un mayor esfuerzo de uso. Por ejemplo, en un plano totalmente horizontal se obtuvo que la oscilación del torque se da entre los valores de +/- 3 N-m para aspas expandidas y +/- 2 N-m para aspas contraídas; mientras que, para un plano con una inclinación de  $60^\circ$  el torque en aspas expandidas es de 0.35 N-m y en aspas contraídas de 0.29 N-m. Ante esto último, el robot demuestra que es capaz de sobrepasar obstáculos con pendientes de  $60^\circ$  como máximo cuando se encuentra con aspas expandidas e ingresar por áreas de acceso de 20 cm de ancho y 20 cm de alto cuando se encuentra con aspas contraídas.
4. Luego de lo observado por la simulación realizada en el software V-REP y las ecuaciones planteadas en el capítulo de resultados en cálculos cinemáticos, se puede mencionar que el objetivo planteado fue resuelto, ya que el robot en aspas contraídas demuestra ser versátil cuando se trata de avanzar en un plano horizontal y cuando debe ingresar por un área de acceso de 20 cm de alto; mientras que las aspas expandidas le permite al robot ser capaz de subir pendientes no solo de  $60^\circ$  sino también, de  $30^\circ$  y además, subir peldaños de escaleras con un valor máximo de altura de 18 cm.
5. Como trabajo a futuro se plantea en primer lugar, realizar el diseño electrónico que compone el robot como por ejemplo el del microcontrolador. De la misma forma, prototipar el robot y luego de realizar las configuraciones necesarias, someterlo a un test real y ver su respuesta ante un escenario de trabajo de acuerdo a los alcances que se han propuesto en este trabajo de tesis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Sonia, “Análisis y evaluación de la distribución espacial de la sismicidad y lagunas sísmicas presentes en el borde occidental de Sudamérica”. Arequipa: UNSA
- [2] Instituto Geofísico del Perú, “Reportes sísmicos y acelerométricos”, 2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadística e Informática, “Características de las viviendas particulares censadas”, 2017.
- [4] Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú, “Estadística de emergencias atendidas a nivel nacional”, 2019.
- [5] Instituto Nacional de Defensa Civil, “Emergencias ocurridas a nivel nacional por provincia y tipo de fenómeno según daños por departamento”, 2019.
- [6] USAID, “Búsqueda y rescate en estructuras colapsadas” (en Peru), Manual de campo.
- [7] Latam Israel, “Robot para rescate y búsqueda de personas”, 2019. [Online]. <http://www.comunidadesplus.com/2019/03/robot-para-rescate-y-busqueda-de.html>
- [8] Zarrouk D., “Rising STAR: A Highly Reconfigurable Sprawl Tuned Robot”. *IEEE Robotics and automation letters*, 2019.
- [9] Redacciónlr, “Robots rescatistas”, 2017. [Online]. <https://larepublica.pe/domingo/1161893-robotspara-salvar-vidas/>
- [10] Daniel A., Arreguín D., Cruz I., Guadarrama A., Mejía L., Bautista D., Toscano F., Moreno L., Miroslava Y. & Sandoval R., “Crea IPN robot arácnido para búsqueda y rescate de personas”, 2019. México: IPN.
- [11] Boston Dynamics, “Big Dog”. Diciembre, 2010. [Online]. <https://www.bostondynamics.com/bigdog>
- [12] Real Academia Española, “Significado de la palabra ictiología”, 2019, (22<sup>a</sup> ed.) Madrid, España: Autor.

- [13] Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI). “*Sismos: Percepción sísmica, escala de Mercalli*”, 2019.
- [14] Masud Khan, “*Grandes historias 2013: el derrumbe en Bangladesh que sacudió la industria textil*”. BBC, Dic.26, 2013.
- [15] *El colapso de Rana Plaza*, The University of Texas at Austin, 2017.
- [16] Met-mex Peñoles. Descontaminación de víctimas en emergencias con materiales peligrosos y evacuación con pacientes pp. 3. México.
- [17] T. T. Jesús, “*Diseño y Simulación de Locomoción de un robot hexápodo para tareas de búsqueda y rescate*”. Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [18] MJ Pont, “*Patterns for time-triggered embedded systems: Building, reliable applications with the 8051 family of micro-controllers*”. Publishing Co., 2001.
- [19] Garro R., “*Estrategia de Diseño Basada en Patrones de un Subsistema de Movimiento para un Robot Pulverizador*”. Congreso Bienal, 2014.
- [20] García R., “*Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate. Universidad Tecnológica de Mixteca*”. México, 2016, pp. 343-345.
- [21] Falla Y. & Sacristán M., “*Estudio cinemático y dinámico de un robot dedicado a la reparación de fallas menores en tuberías hidrosanitarias*”. Universidad Militar Nueva Granada, pp. 11.
- [22] Barrio A., Terrile S., Barrientos A. & Del Cerro J., “*Robots Hiper- redundantes: Clasificación del arte y problemática*”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática. España, 2018.
- [23] Jaramillo A., “*Cinemática de Manipuladores Robóticos*”, pp 5-6.
- [24] Anónimo, “*Prácticas de Robótica utilizando Matlab. Cinemática de Robots*”. Práctica 2.
- [25] Christoph H., “*Mori: Modular Origami Robot*”. IEEE, Oct. 5, 2017.
- [26] Sánchez A. “*Diseño y construcción de un robot para inspección visual de tubería operado remotamente para la empresa FSB recubrimientos industriales*”.
- [27] Muñoz O., “*Diseño de sistema amortiguador para controlar desgaste del cable de acero en sistema de carguío de mineral S.M.C.S.A.*”, pp.26

- [28] Rudas C., "*Diseño de un sistema mecatrónico para la selección de arándanos*". Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Pp.13-28
- [29] Biffi S. & Luder A., "*Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production System*", Universität Wien, Alemania.
- [30] Bejarano O., "*Diseño de una máquina experimental para la deformación en frío en una dirección de láminas no ferrosas, mediante fuerzas de compresión*". Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Pp.62-63
- [31] Cordes, F., Dettmann, A., Kirchner, F. : "*Modos de locomoción para un rover planetario híbrido con patas con ruedas*". IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Pp. 2586–2592.
- [32] Zendejo Oliver, Carrera Isela & José Baca (2020). "*Análisis de fuerza estática de una rueda con patas de geometría variable*", Ene. 10.
- [33] Llano, C. "Fibra de Carbon, Presente y futuro de un material revolucionario. (1st ed)", 2000, Metal Actual. Tomado de:  
<http://FibradeCarbono.Presentefuturounmaterialrevolucionario.pdf>
- [34] Massó, M.: "*Disseny d'un sistema de detecció de vehicles*". Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2015, Pp. 1-12.
- [35] Stea M. (2015), "Ácido Poliláctico: Estructura, propiedades, síntesis y usos". Tomado de: <https://www.lifeder.com/acido-polilactico/>
- [36] R. Correal, G. Pajares & J.J. Ruz. "*Autonomy for groundlevel robotic space exploration: framework, simulation, architecture, algorithms and experiments*". Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España, 2016.
- [37] Berra Villaseñor E., "*Descripción de elementos de control y guía de robots Rover vía GPS*", Investigación-Robótica Educativa, Colombia, pp. 18-23.
- [38] Catañeda G., Monroy D., Aponte J. & Avilés O., "*Diseño y construcción de un móvil tipo Rover. Plataforma de robótica*", Colombia, pp 1-5.
- [39] D. Hernandez, D. Luque & J. Ardilla., "*Diseño y construcción de un vehículo autónomo tipo Rover*", Tesis de pregrado, Departamento de ingeniería mecatrónica, Colombia, 2005.

- [40] López J., Quijano C., Moncayo R., Piedrahita J., Jiménez J., Navarro N. & Angarita I. "*Diseño y prototipado de un robot explorador que soporte las actividades de los boberos*". Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2015.
- [41] Sánchez M., "*Departamento de Teoría de la Señal y comunicaciones*". Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, España, 2015.
- [42] Espinoza C., "*Sistema Problemático: Diseñando líneas de investigación*". Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2011.
- [43] Navarrete T., "*Análisis comparativo de los métodos de caja negra, blanca y gris de testing de software, para la propuesta de un método estándar de testing*". Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, 2012.
- [44] Vela J., "*Diseño y desarrollo de una aplicación web para la gestión automática de prácticas*". Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009.
- [45] Raúl D., Livio M. & Fernando C., "*Análisis de función morfológica aplicado al diseño de un implemento agrícola*", Chile, 2018, pp.12-16.
- [46] Anónimo, "*Diseño de ROV a partir de la Metodología de Diseño Mecatrónico*", Departamento de Ingeniería Mecatrónica, 2015, pp. 1-9.
- [47] Anónimo, "*Análisis Morfológico*", Departamento de comunicación, 2020, pp.3-9.
- [48] Anónimo, "*Control of Robot Manipulators in Join Space*", AP.4., Departamento de Mecatrónica, 2019, pp. 135-138.
- [49] Anónimo, "*Cinemática Directa*", AP.5., Departamento de Mecatrónica, UNI, 2018, pp. 2-30.
- [50] Marcos V., "*Modelado y simulación del robot industrial Staubli Unimation PUMA 560*", Tesis de pregrado, UPV, España, 2018. pp. 10-29
- [51] Alberto G., "*Diseño, construcción y control de un robot manipulador de 3 grados de libertad de bajo coste para el desarrollo de un manipulador móvil*", Tesis de pregrado, UPV, España, 2016. pp. 14-20
- [52] Scarlet B., "*Cinemática diferencial de un robot paralelo con una cadena virtual*", Tesis de pregrado, UNAM, México, 2017. pp. 29-33
- [53] Anónimo, "*Modelado geométrico y cinemático del robot*", Departamento de Ingeniería Mecatrónica, 2016, pp. 10-19

- [54] A. Del Pozo, "Modelo Cinemático Dinámico del Mini Robot Móvil RICIMAF", *RIELAC*, vol. XXXIII, Dic. 2012, pp. 50-53.
- [55] J. Valencia, "Modelo Cinemático de un Robot Móvil Tipo Diferencial y Navegación a partir de la Estimación Odométrica", *SET*, vol. 41, May. 2009, pp. 191-194.
- [56] S. Konduri, R. Pagilla, y E. Cobos, "Dynamics and Control of a Differential Drive Robot with Wheel Slip: Application to Coordination of Multiple Robots", *ASME*, vol 10, sep. 2016.
- [57] K. Akimaya, K. Tadakuma, K. Nagatani, y K. Yoshida, "Development of a Mobile Robot for Volcano Exploration using a Mechanism of Roll Downhill", Dic. 2.
- [58] W. Feng, F. Gao, H. Jiang, C. Haung, J. Liu, y H. Li, "Design and Analysis of a Compliant variable-diameter mechanism used in variable variable-diameter wheels for lunar rover", Feb. 2018, pp. 1-19.
- [59] G. Jung, K. Cho, y S. Ahn, "Deformable Wheel robot based on Origami Structure", *IEE*, May. 2013.
- [60] I. Nesnas, J. Matthews, P. Abad, J. Burdick, J. Edlund, J. Morrison, R. Peters, M. Tanner, R. Miyake, B. Solish, y R. Anderson, "Axel and Duaxel Rovers for the Sustainable Exploration of Extreme Terrains", *Journal of Field Robotics*, Oct. 2011, pp. 1-23.
- [61] I. De Jesús, y E. Novelo, "Diseño, Análisis y Construcción de un Brazo Robot de diseño propio", *IM-058, CNIES*, Nov. 2017.
- [62] J. Otero, S. Rodriguez, y J. Gutierrez, "Diseño y Construcción de un Brazo Mecánico de tres grados de libertad", *ISSN 0122-1701, N°29*, Sep. 2008.
- [63] E. Orozco, E. Castillo, y B. Chaparro, "Análisis Dinámico y Estático de un Robot Móvil sometido a una fuerza externa de repulsión", *ISBN: 978-607-9394-11-0, AMM*, Oct. 2017.
- [64] M. Marco, "Disseny d'un sistema de detecció de vehicles lents", *Anexo: D*, nov. 2018.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1: Concepción de la solución

En este punto se describirá, a detalle, cada palabra mencionada en la metodología de diseño, como por ejemplo las que se colocaron en la lista de exigencias, elaboración del concepto, abstracción o representación de nivel, estructura de funciones y, por último, el concepto solución.

### ➤ **Requerimientos en la lista de exigencias:**

- **Función Principal:** El robot reconfigurable será capaz de reemplazar y/o ayudar en el trabajo que realizan rescatistas y/o bomberos en labores de alto riesgo. Llámese a esto localizar a personas que se encuentran bajo escombros o que están atrapadas en lugares por donde un ser humano no puede ingresar debido a que es un área pequeña de 20 cm x 20 cm o inclusive un acceso con medidas de 10 cm x 10 cm. Esto facilitaría y disminuiría el tiempo en la labor de rescate en la etapa de búsqueda.
- **Versatilidad:** El diseño final que se tome en cuenta debe ser capaz de poder movilizarse por lugares pequeños y al mismo tiempo sobrepasar terrenos no estructurados sin presentar problema alguno. Lo más importante es que el robot pueda llegar al lugar en donde se encuentre la víctima sin tener retrasos, en tiempo, mayor a 10 horas según investigaciones ya realizadas por parte de INDECI.
- **Seguridad:** Identificar cuáles pueden ser los posibles peligros cuando se realiza la operación del robot. Es decir, si el robot no llega a cumplir su labor debido a una sobrecarga (que caiga sobre este un muro o se produzca un corto circuito debido a que el derrumbe compromete varias instalaciones eléctricas). El uso de la norma de seguridad ISO/TS 15066 que es para robots colaborativos y que entró en vigencia en el año 2010, pone a conocimiento los requisitos de seguridad para sistemas en donde el robot y el ser humano comparten una determinada área de trabajo.
- **Ergonomía:** El diseño debe permitir que sea de fácil manejo, forma y/o construcción no complicada y debe tener accionamientos sencillos. Además, deben tenerse en cuenta las posibles negligencias que puede tener el usuario al instante en el que opere el robot. De la misma forma, saber qué acciones seguir si falla algún componente

antes, durante o después de la operación. Aquí debe tenerse en consideración los puntos que están más expuestos a desgaste, como lo es el sistema de locomoción a usar ya que va a estar en constante contacto con los distintos tipos de superficies.

- **Fabricación:** Es importante que el diseño vaya acorde con el material y con la fabricación. En este caso, se realizará accionamientos mecánicos tales como cilindros neumáticos y otros más a detallar más adelante. De esta forma, se descarta el uso de componentes electrónicos en la totalidad del robot disminuyendo el peso que este debe cargar.
- **Control de calidad:** Aquí se debe establecer las acciones y herramientas necesarias para detectar futuros errores en el robot. Para esto debe inspeccionarse el autómeta cada vez que es utilizado.
- **Montaje:** La idea principal es que el diseño sea de fácil montaje. Esto indica que no es necesario la presencia de personal especializado ni técnico para armar la estructura del robot. Sin embargo, también debe existir una serie de pasos que deben cumplirse para que este funcione de manera correcta y no presente un corto tiempo de vida.
- **Control del proceso:** Esto va a permitir medir, comparar y corregir las actividades o acciones que va a cumplir el robot dentro de su área de trabajo para que pueda cumplir su principal objetivo sin tener ninguna interrupción. Es decir, mediante las pruebas y simulaciones, se someterá al robot a distintas acciones que se puedan presentar en un ambiente real.

➤ **Estructura de funciones**

• **Función principal:**

La representación hecha por la caja negra resumen y explica la función principal que realizará el robot que es: Robot reconfigurable capaz de ingresar por espacios reducidos.

• **Funciones secundarias o parciales:**

La función principal del robot puede dividirse en funciones parciales o secundarias que cumple cada una con una tarea específica. A continuación, se mencionan dichas funciones que representan los objetivos y alcance del robot:

- **Posición:** Colocar el robot en el área denominada zona caliente.
- **Traslado:** El robot autónomo se traslada al lugar de derrumbe e ingresa por pequeñas áreas de acceso.
- **Ubicación:** El autómata, es capaz de encontrar la ubicación exacta de la víctima que se encuentra bajo escombros y brinda esa información al rescatista.
- **Rescate:** Disminuye el tiempo en la fase de búsqueda que realizan los rescatistas y/o bomberos para llegar a la ubicar a las víctimas.

**NOTA:**

Se debe recalcar, que la fase de control de proceso está activa en todo momento hasta que el robot culmina su labor.

**Concepto Solución.**

De lo ya expuesto, cada una de las alternativas con cada función parcial deberá coincidir en la tabla con una imagen que describa qué objeto mecánico o electrónico cumplirá con dicha función. Finalmente, se tendrán tres guías que describirán tres posibles soluciones de las cuales se decidirá por una de manera estadística y que será tomada como el diseño final.

La descripción de las funciones que se han tomado en cuenta para la metodología se describe a continuación:

- Posicionar: Definir y ubicar al robot al lugar por donde ingresará.
- Señal: Dispositivo que envía la señal de inicio (on).
- Procesar: Graba órdenes que debe ejecutar para realizar su labor.
- Traslación: Delimita los sistemas de locomoción.
- Accionamiento: Medio por el que se genera movimiento.
- Sensor: Se encarga de detectar los movimientos realizados por el robot.
- Emitir: Dispositivo encargado de emitir señales visuales.

➤ **Disposición Básica:**

- **Alternativa de solución 1 (Azul)**

El mecanismo que se encarga de posicionar al robot en la zona caliente, es un brazo robótico de largo alcance, de esta forma se asegura que el rescatista o bombero no pase por alguna emergencia que le pueda causar algún accidente. Cabe resaltar que, previamente, se debió localizar el área de acceso de mínimo 10 cm x 10 cm.

Luego, mediante el uso de un pulsador, el robot está listo para empezar la marcha y en primera instancia lo hace con una locomoción de tipo ruedas, en caso se presente un obstáculo difícil de sobrepasar por este tipo de desplazamiento, el robot podrá tomar una locomoción distinta que sería tipo patas cambiando su estructura.

Lo indicado en la parte final del párrafo anterior, le permitirá sobrepasar un obstáculo con pendiente o escaleras, para que así pueda llegar a ubicar a la víctima que se encuentra bajo escombros. Algunas veces podrá localizar al mismo a una cierta distancia pero en otras tendrá que acercarse un poco más, esta acción se llevará a cabo gracias a una cámara termográfica. Luego que encuentra al afectado, emite una señal de tipo video que ayudará al rescatista a ubicarlo más rápido.

- **Alternativa de solución 2 (naranja)**

En esta etapa, el robot es colocado en el área de acceso al siniestro manualmente por parte del rescatista o bombero. Aquí el robot no presenta autonomía, y es accionado por un

motor a pilas pequeño con la ayuda de un joystick que es el que recibe señales cuando el robot encuentre a la víctima.

Cuando encuentre a la víctima, va a emitir señales con la ayuda de un sensor de proximidad que emitirá un sonido avisando cuál es la ubicación aproximada del afectado. La locomoción es de tipo espas que le permita pasar obstáculos sin problemas, asimismo, estas ruedas tienen la posibilidad de tener un agarre, en determinado momento y cuando lo necesite, de tipo garras. Esto permitirá que la locomoción no resbale cuando está bajando una pendiente.

- **Alternativa de solución 3 (verde)**

Al igual que el caso anterior, el robot es colocado en el área de acceso de manera manual y es autómata. Es decir, no necesita un joystick para poder cumplir con su labor. Esto es gracias a que posee un microordenador que le indica los movimientos que este debe tener si se encuentra con algún tipo de dificultad en el terreno.

La locomoción le permite al robot moverse como si fuese una oruga y subir por peldaños sin ningún problema; sin embargo, ¿qué sucede si se presenta un terreno resbaladizo? En este caso, el robot podrá utilizar patas en forma de media luna que le permitirán salir de terrenos obstruidos gracias a la ayuda de un motor paso a paso que le podrá generar el torque necesario.

Finalmente, cuando el robot encuentre a la víctima, emitirá una señal de zumbido continuo por medio de un sensor infrarrojo de proximidad. De esta forma, el rescatista sabrá la ubicación aproximada del afectado.

## ANEXO 2: Programación en Matlab-Simulink

Aquí se muestra el código Python con el que se traza el movimiento del robot en el software V-REP. De la misma forma, el cambio entre aspas y rueda convencional solo de la rueda. Esto último con fines visuales ya que, al querer hacerlo con el diseño del robot en su totalidad, se presentan complicaciones con el software. Por último, el código utilizado en Matlab para las ecuaciones mostradas en la sección de resultados y que ayuda a conocer el comportamiento del robot, tanto en aspas expandidas como retraídas, siguiendo una determinada trayectoria.

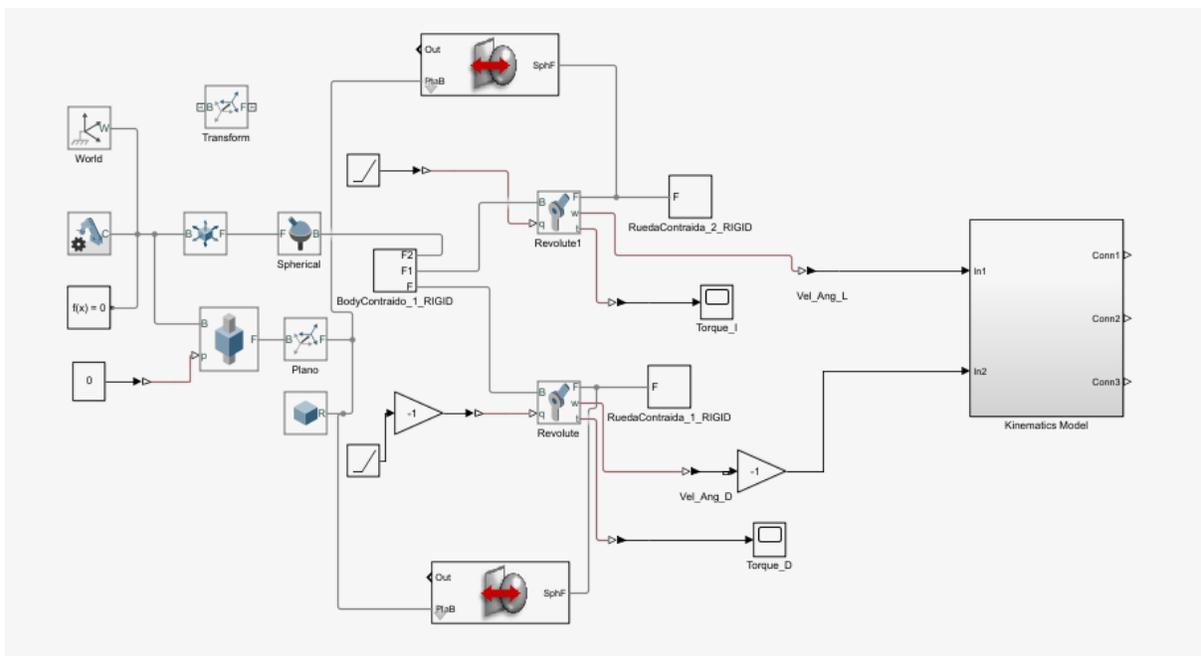


Figura.2. Cinemática en SIMULINK.

```

%ploteo de data
subplot(2,2,1)
plot(x,y,xi2,yi2)
title('Posición del móvil')
xlabel('x')
ylabel('y')

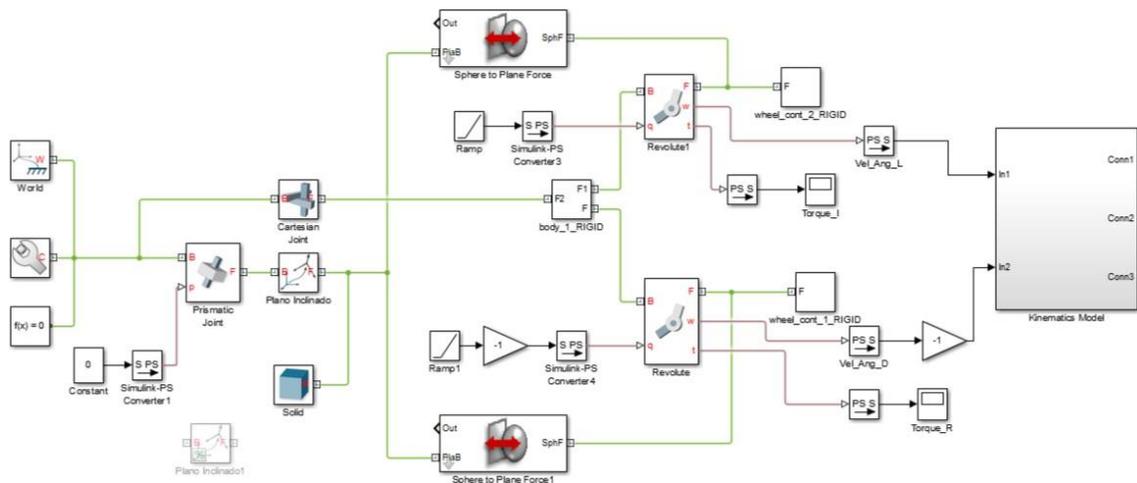
subplot(2,2,2)
plot(linspace(0,10,57),Vx,(linspace(0,10,57)),Vy,(linspace(0,10,57)),Vx2,(linspace(0,10,57)),Vy2)
title('Velocidades en los ejes X y Y')
xlabel('t')
ylabel('V')
legend('Vx1','Vy1','Vx2','Vy2')

subplot(2,2,3)
plot((linspace(0,10,57)),phi,(linspace(0,10,57)),phi2)
title('Phi')
xlabel('t')
ylabel('phi')
legend('Phi1','Phi2')

subplot(2,2,4)
V1 = sqrt((Vx.*Vx).(Vy.*Vy));
V2 = sqrt((Vx2.*Vx2).(Vy2.*Vy2));
plot(linspace(0,10,57),V1,(linspace(0,10,57)),V2)
xlabel('t')
ylabel('V')
legend('V1','V2')

```

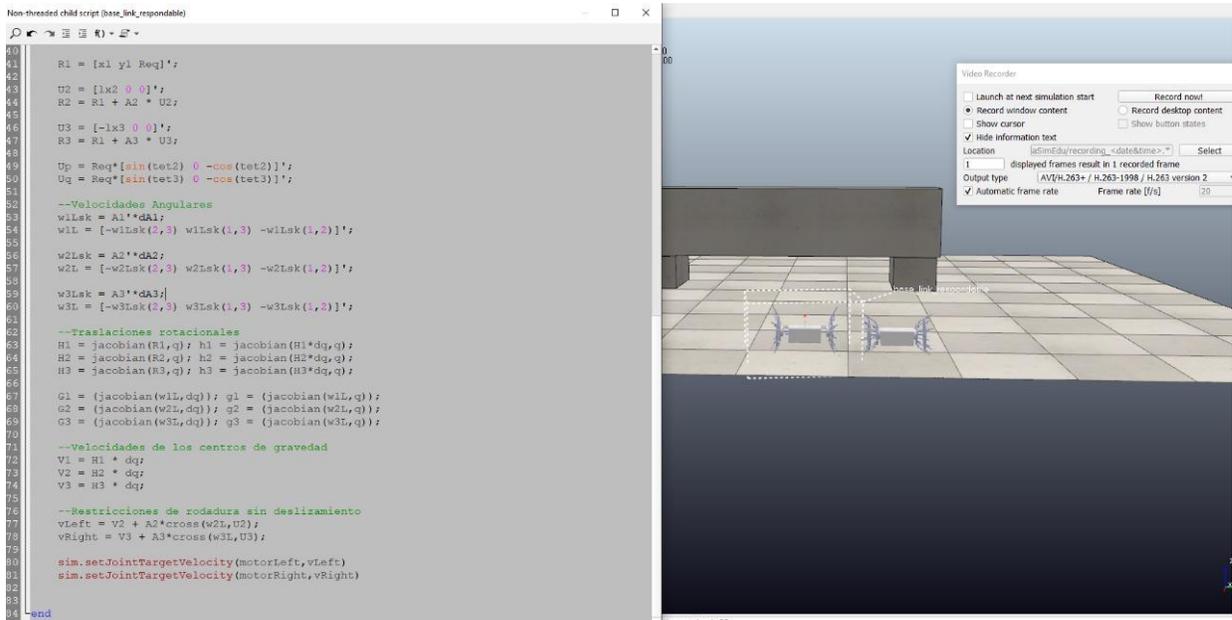
**Figura.3.** Cinemática en MATLAB



**Figura.4.** Implementación de dinámica para la demostración de la importancia de la locomoción en tipo aspas y ruedas.

## ANEXO 3: Programación en V-REP

En este anexo se muestra la programación realizada en el software V-REP según las ecuaciones planteadas en el punto 3.2 del capítulo de resultados.



```
Non-threaded child script (base_link_respondable)
20
21 R1 = [a1 y1 Req1]';
22
23 U2 = [1x2 0 0]';
24 R2 = R1 + A2 * U2;
25
26 U3 = [-1x3 0 0]';
27 R3 = R1 + A3 * U3;
28
29 Up = Req*[sin(tet2) 0 -cos(tet2)]';
30 Uq = Req*[sin(tet3) 0 -cos(tet3)]';
31
32 --Velocidades Angulares
33 w1Lsk = A1'*dA1;
34 w1L = [-w1Lsk(2,3) w1Lsk(1,3) -w1Lsk(3,2)]';
35
36 w2Lsk = A2'*dA2;
37 w2L = [-w2Lsk(2,3) w2Lsk(1,3) -w2Lsk(3,2)]';
38
39 w3Lsk = A3'*dA3;
40 w3L = [-w3Lsk(2,3) w3Lsk(1,3) -w3Lsk(3,2)]';
41
42 --Traslaciones rotacionales
43 H1 = jacobian(R1,q); h1 = jacobian(H1*dq,q);
44 H2 = jacobian(R2,q); h2 = jacobian(H2*dq,q);
45 H3 = jacobian(R3,q); h3 = jacobian(H3*dq,q);
46
47 G1 = (jacobian(w1L,dq)); g1 = (jacobian(w1L,q));
48 G2 = (jacobian(w2L,dq)); g2 = (jacobian(w2L,q));
49 G3 = (jacobian(w3L,dq)); g3 = (jacobian(w3L,q));
50
51 --Velocidades de los centros de gravedad
52 V1 = H1 * dq;
53 V2 = H2 * dq;
54 V3 = H3 * dq;
55
56 --Restricciones de rodadura sin deslizamiento
57 vLeft = V2 + A2*cross(w2L,U2);
58 vRight = V3 + A3*cross(w3L,U3);
59
60 sim.setJointTargetVelocity(motorLeft,vLeft)
61 sim.setJointTargetVelocity(motorRight,vRight)
62
63
64 end
```

Figura.5. Implementación de las ecuaciones en lenguaje Phython (software V-REP).