

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de mecanismo de locomoción para un robot de  
búsqueda y rescate en terrenos hostiles**

Trabajo de graduación presentado por Kevin Estuardo Muñoz Muñoz  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de mecanismo de locomoción para un robot de  
búsqueda y rescate en terrenos hostiles**

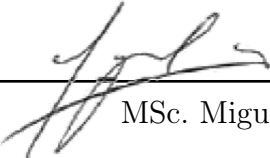
Trabajo de graduación presentado por Kevin Estuardo Muñoz Muñoz  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

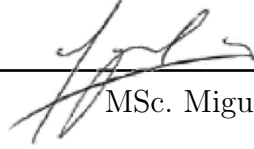
2019

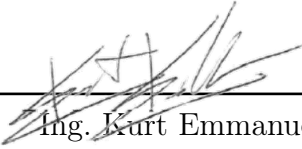



Vo.Bo.:

(f)   
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Miguel Zea

(f)   
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

(f)   
Ing. Luis Pedro Montenegro

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de Diciembre de 2019.



Este trabajo de investigación fue posible con la ayuda de MSc. Miguel Zea como asesor a lo largo de la realización de este trabajo de investigación, las instalaciones y el equipo brindado por la Universidad del Valle de Guatemala.

Agradezco a mis padres Fredy Muñoz y Dinora Muñoz por darme la oportunidad de realizar mis estudios universitarios en la Universidad del Valle de Guatemala, por su apoyo y amor incondicional durante la carrera, por sus enseñanzas de vida y por alentarme a ser mejor en todas las actividades que realice.

Agradezco a mis amigos Robbin Woods, Esteban Avalos, Julio Merida, Rodrigo Villatoro y Gustavo Orellana por su ayuda en dificultades que se presentaron al realizar distintas fases del proyecto, así como sugerencias y revisión preliminar de este trabajo escrito.



<b>Prefacio</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>13</b>
<b>7. Motores</b>	<b>21</b>
7.1. Motor Dynamixel AX-12A . . . . .	21
7.2. Velocidad . . . . .	21
7.3. Código . . . . .	22
7.4. Circuito . . . . .	22
7.5. Acople . . . . .	22
<b>8. Mecanismo híbrido</b>	<b>25</b>
8.1. Piñón y cremallera . . . . .	26
8.2. Caja . . . . .	27

8.3. Engranés rectos . . . . .	27
8.4. Juntas y patas circulares . . . . .	28
8.5. Patrones de llantas . . . . .	29
8.6. Ensamble . . . . .	30
<b>9. Mecanismo Rimless Wheel</b>	<b>31</b>
9.1. Ensamble . . . . .	32
<b>10. Caracterización matemática</b>	<b>33</b>
10.1. Mecanismo Rimless Wheel . . . . .	33
10.1.1. Linealización de la energía mecánica . . . . .	33
10.1.2. Linealización de movimiento . . . . .	34
10.2. Mecanismo híbrido . . . . .	35
10.2.1. Movimiento del mecanismo híbrido abierto . . . . .	35
<b>11. Pruebas y resultados</b>	<b>39</b>
11.1. Metodología de pruebas . . . . .	39
11.1.1. Vídeos . . . . .	39
11.1.2. Terrenos . . . . .	40
11.1.3. Plataformas . . . . .	41
11.2. Análisis de videos . . . . .	42
11.2.1. Acotación de video . . . . .	42
11.2.2. Unidades . . . . .	42
11.2.3. Calibración de cámara . . . . .	42
11.2.4. Rastreo de trayectoria . . . . .	43
11.2.5. Plano cartesiano . . . . .	44
11.3. Análisis de datos . . . . .	44
11.3.1. Obtención de datos . . . . .	44
11.3.2. Normalización de datos . . . . .	44
11.3.3. Análisis en Matlab . . . . .	45
11.4. Resultados . . . . .	46
11.4.1. Caracterización matemática . . . . .	46
11.4.2. Casos especiales . . . . .	47
11.4.3. Terreno plano . . . . .	52
11.4.4. Terreno con pendiente . . . . .	57
11.4.5. Terreno con agujeros . . . . .	59
<b>12. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>13. Recomendaciones</b>	<b>65</b>
<b>14. Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>15. Anexos</b>	<b>71</b>
15.1. Código . . . . .	71
15.2. Tablas . . . . .	71
15.3. Planos . . . . .	72
<b>16. Glosario</b>	<b>95</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Suspensión Rocker-Bogie del Curiosity Rover . . . . .	3
2.	Diseño en computadora del Mars 2020 Rover [3] . . . . .	4
3.	Rhex de Boston Dynamics [5] . . . . .	4
4.	Transformación pata-llanta del Quattroped [7] . . . . .	5
5.	Transformación pata-llanta del TurboQuad [7] . . . . .	5
6.	Robot Puffer de la NASA [8] . . . . .	5
7.	Modelo de cuerpo rígido con movimiento periódico sin colisiones [9] . . . . .	6
8.	Modelo de salto: dos masas conectadas por un resorte sin masa [11] . . . . .	6
9.	Spot Mini de Boston Dynamics, que adopta el concepto de máquinas que caminan. [16] . . . . .	13
10.	SandFlea de Boston Dynamics, que adopta el concepto de rovers con ruedas. [17] . . . . .	14
11.	Prueba de estabilidad Shrimp Rover [19] . . . . .	14
12.	Adaptive Suspension Vehicle en etapa de ensamble [22] . . . . .	15
13.	Geometría de vehículos de llantas activamente articulados [24] . . . . .	16
14.	Ejemplos de auto recuperación del vehículo WAAV: en cinco situaciones distintas [25] . . . . .	17
15.	Tres pasos de una Rimless Wheel en terreno inclinado con una superficie rugosa [26] . . . . .	17
16.	Mecanismo de Chevshev de un grado de libertad . . . . .	18
17.	Mecanismo propuesto por MCgeer [28] . . . . .	19
18.	Representación de regímenes de flujo de bolas de acero. [30] . . . . .	19
19.	Distintos esquemas convencionales para la clasificación de tamaño de partícula de suelos. [31] . . . . .	20
20.	Diagrama de flujo del programa en Arduino: para control de motores . . . . .	23
21.	Diagrama del circuito utilizado para los motores . . . . .	24
22.	Iteraciones de acople de motor . . . . .	24
23.	Vistas del ensamble completo del mecanismo híbrido en Autodesk Inventor . . . . .	25
24.	Piñón y cremalleras con patas . . . . .	26
25.	Caja para ensamble de piñón, cremallera y cojinetes . . . . .	27

26.	Ensamble de engranes rectos . . . . .	27
27.	Iteraciones del ensamble de juntas y patas del mecanismo híbrido . . . . .	28
28.	Patrón de llanta unidireccional simétrico . . . . .	28
29.	Iteraciones de funda de TPU: para las patas del mecanismo híbrido . . . . .	29
30.	Ensamble del mecanismo híbrido en configuración cerrado y abierto con fundas . . . . .	29
31.	Iteraciones de parte central del mecanismo Rimless Wheel . . . . .	31
32.	Patas utilizadas en el mecanismo Rimless Wheel . . . . .	32
33.	Ensamble del mecanismo rimless wheel . . . . .	32
34.	Modelo Rimless Wheel [32] . . . . .	33
35.	Modelo Rimless Wheel [6] . . . . .	35
36.	Terrenos utilizados para realizar pruebas . . . . .	39
37.	Plataforma de montaje . . . . .	40
38.	Plataforma de pruebas . . . . .	41
39.	Herramienta Working Zone de Kinovea: para acotar vídeos . . . . .	42
40.	Linea de 1 cm para calibración de mediciones . . . . .	42
41.	Proceso de calibración de cámara . . . . .	43
42.	Herramienta para configuración de punto de referencia para generación de trayectoria en Kinovea . . . . .	43
43.	Origen del plano cartesiano ubicado en la misma posición del punto de referencia . . . . .	44
44.	Retraso en gráfica de datos entre seleccionar un tiempo real o relativo y tiempo normalizado . . . . .	45
45.	Gráfica del movimiento teórico del mecanismo rimless wheel . . . . .	46
46.	Cierre de mecanismo híbrido abierto en pruebas . . . . .	46
47.	Cierre de mecanismo híbrido abierto en pruebas . . . . .	47
48.	Llanta trabada de mecanismo híbrido abierto en pruebas . . . . .	47
49.	Mecanismo híbrido luego de un paso prueba 2 velocidad de motor 200 . . . . .	47
50.	Agujero creado por el mecanismo rimless wheel en distintas pruebas . . . . .	49
51.	Llanta trabada de mecanismo híbrido cerrado en pruebas . . . . .	49
52.	Llanta trabada de mecanismo rimless wheel en pruebas (1) . . . . .	50
53.	Llanta trabada de mecanismo rimless wheel en pruebas (2) . . . . .	50
54.	Pruebas de mecanismo rimless wheel en agujeros de tierra con velocidad de motor 1000 . . . . .	51
55.	Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de tierra (1) . . . . .	51
56.	Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de tierra (2) . . . . .	51
57.	Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de arena (1) . . . . .	52
58.	Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de arena (2) . . . . .	52
59.	Gráfica de desplazamiento vertical en tierra con configuración plana con cinco velocidades de motor . . . . .	56
60.	Gráfica de desplazamiento vertical en gravilla con configuración plana con cinco velocidades de motor . . . . .	56
61.	Gráfica de desplazamiento vertical en arena con configuración plana con cinco velocidades de motor . . . . .	56
62.	Gráfica de desplazamiento vertical en tierra con configuración agujeros con cinco velocidades de motor para mecanismo rimless wheel . . . . .	60

63.	Gráficas de desplazamiento vertical en gravilla con configuración agujeros con cinco velocidades de motor . . . . .	60
64.	Gráfica de desplazamiento vertical en arena con configuración agujeros con cinco velocidades de motor para mecanismo rimless wheel . . . . .	61
65.	Plano de primera iteración de pata para mecanismo híbrido . . . . .	74
66.	Plano de segunda iteración de junta para mecanismo híbrido . . . . .	75
67.	Plano de explosión de ensamble de la segunda iteración del mecanismo híbrido	76
68.	Plano de segunda iteración de junta para mecanismo híbrido . . . . .	77
69.	Plano de segunda iteración de pata para mecanismo híbrido . . . . .	78
70.	Plano de cremallera para mecanismo híbrido . . . . .	79
71.	Plano de piñón para mecanismo híbrido . . . . .	80
72.	Plano de caja para mecanismo híbrido . . . . .	81
73.	Plano de engrane recto con cojinete para mecanismo híbrido . . . . .	82
74.	Plano de engrane recto motor para mecanismo híbrido . . . . .	83
75.	Plano de acople de motor del engrane recto para mecanismo híbrido . . . . .	84
76.	Plano de esquina de plataforma de pruebas . . . . .	85
77.	Plano de explosión de ensamble de plataforma de montaje . . . . .	86
78.	Plano de base de plataforma de montaje . . . . .	87
79.	Plano de explosión de ensamble de caja para acople de motor a base . . . . .	88
80.	Plano de parte lateral de caja para acople de motor a base . . . . .	89
81.	Plano de parte superior de caja para acople de motor a base . . . . .	90
82.	Plano de parte inferior de caja para acople de motor a base . . . . .	91
83.	Plano de parte central de mecanismo rimless wheel . . . . .	92
84.	Plano de pata de mecanismo rimless wheel . . . . .	93
85.	Plano de funda para llanta de mecanismo híbrido . . . . .	94



---

## Lista de cuadros

---

1.	Características del motor Dynamixel AX-12A . . . . .	21
2.	Velocidad de motor en código y su equivalente en rpm . . . . .	22
3.	Tabla de datos para mecanismo híbrido abierto en arena . . . . .	48
4.	Tabla de desplazamiento vertical en pendiente de tierra . . . . .	50
5.	Tabla de tiempo en completar la configuración plana para cada terreno . . . . .	53
6.	Tabla de media y desviación estándar de la velocidad en configuración plana para cada terreno . . . . .	54
7.	Tabla de media y desviación estándar del desplazamiento vertical en configuración plana para cada terreno . . . . .	55
8.	Tabla de tiempo en completar la configuración pendiente para cada terreno . . . . .	57
9.	Tabla de media y desviación estándar de la velocidad de tres pruebas realizadas configuración con pendiente para cada terreno . . . . .	58
10.	Tabla de tiempo en completar la configuración agujeros para cada terreno . . . . .	62
11.	Tabla de tiempo en completar la configuración plana para cada terreno . . . . .	71
12.	Tabla de media y desviación estándar de la velocidad de tres pruebas realizadas configuración plana para cada terreno . . . . .	72
13.	Tabla de profundidad máxima en la configuración agujeros para cada terreno . . . . .	73



En este trabajo de investigación se realizó el diseño e implementación entre dos mecanismos de locomoción, uno basado en el concepto de Rimless Wheel propuesto por McGeer en el año 1990, y otro basado en los vehículos híbridos llanta-pata presente en el Quattroped de la universidad de Taiwán, para seleccionar el mecanismo que sea más efectivo para el desplazamiento de una plataforma robótica en terreno hostiles. Se realizaron pruebas en tres distintos terrenos (arena, tierra y gravilla), cada uno de ellos con una configuración plana, con pendiente y con agujeros, y con 5 velocidades de motor diferentes. Cada prueba fue grabada y analizada en un software, para obtener la velocidad, aceleración, tiempo y desplazamiento vertical del centro geométrico de cada mecanismo.

El mecanismo híbrido cerrado presentó un menor tiempo promedio en completar los terrenos planos en para todas las velocidades de motor con una diferencia de tiempos máxima de 1.51 segundos y una diferencia mínima de 0.02 segundos entre ambos mecanismos, exceptuando para el terreno de arena en donde el mecanismo rimless wheel fue más rápido por 0.58 segundos para una velocidad de motor 200.

En terrenos con pendiente el mecanismo híbrido cerrado presentó un menor tiempo promedio en completar los terrenos para todas las velocidades de motor con una diferencia máxima de 7.58 segundos y una diferencia mínima de 0.82 segundos

En la configuración de agujeros el mecanismo rimless wheel fue capaz de completar la configuración en los terrenos tierra y arena, y en gravilla el mecanismo híbrido cerrado presentó un menor tiempo promedio en completar el terreno para todas las velocidades de motor, con una diferencia máxima de 0.60 segundos y una diferencia mínima de 0.29 segundos, exceptuando para una velocidad de motor 200 en la cual el mecanismo rimless wheel toma 0.44 segundos menos en completar el terreno.



The study developed throughout this document presents the design and implementation of two mechanisms for locomotion through rough terrain, based on the concept of rimless wheel and hybrid leg-wheel vehicles (such as the Quattropped by the Taiwan University). Trials were accomplished using a trial platform in which three different terrains (soil, river sand and gravel) were arranged as plain, with slope and with holes. Each trial was recorded and then analyzed using software, to obtain data such as acceleration, velocity and vertical displacement through the trial, and the time required to complete it.

The closed hybrid mechanism presents a lower average time to complete the different terrains arranged as plain for every motor speed, with a maximum and minimum difference of 1.51 and 0.02 seconds respectively, except for sand terrain, where the rimless wheel mechanism was faster by 0.58 seconds for a 200 motor speed.

On slope terrains the closed hybrid mechanism presents a lower average time to complete all terrains with a difference of 7.58 seconds maximum and 0.82 seconds minimum.

On hole configuration the rimless wheel mechanism was the only mechanism capable of completing this configuration on river sand and soil. On gravel, the closed hybrid mechanism presents a lower average time to complete the terrain with a maximum difference of 0.6 seconds and a minimum difference of 0.29 seconds, and the rimless wheel presents a lower average time to complete the terrain just with a 200 motor speed taking 0.44 seconds less than the closed hybrid mechanism.



El trabajo de investigación presentado en este documento esta inspirado en la búsqueda de un mecanismo que permita la locomoción en terrenos difíciles, para luego ser implementada en una plataforma robótica que tiene como objetivo el apoyo a rescatistas en situaciones que presenten un riesgo para los mismos.

El enfoque de esta investigación es diseñar e implementar dos distintos mecanismos de locomoción basados en distintos conceptos y encontrar aquel que presente un mejor desplazamiento en terreno hostiles realizando pruebas en distintos terrenos y distintas configuraciones, como agujeros y pendientes, tomando vídeo del recorrido realizado en cada prueba, analizando los vídeos para obtener velocidad, aceleración y desplazamiento vertical para luego realizar la comparación entre ambos mecanismos y seleccionar aquel que presente un mejor desplazamiento.

En este trabajo de investigación se presentan las distintas piezas que conforman a cada mecanismo y su ensamble, la plataforma utilizada para realizar las pruebas y los materiales y configuraciones para simular distintos ambientes a los que se pueda someter la plataforma, y las herramientas y configuración utilizada para tomar los vídeos de las pruebas para obtener resultados al analizar los mismos en Kinovea.



Se han realizado una gran variedad de robots que buscan desplazarse sobre terrenos hostiles, de los cuales resaltan el Curiosity Rover y Mars 2020 Rover de la NASA, el RHex, de la empresa Boston Dynamics, y el TurboQuad y Quattroped de la Universidad de Taiwan, estos últimos dos implementando híbridos pata-llanta de dos maneras distintas.

El Curiosity Rover (Figura 1) cuenta con seis ruedas que cuentan con un sistema de giro independiente y un sistema de suspensión tipo Rocker-Bogie heredado del Pathfinder y de Mars Exploration Rover Missions. El termino Rocker-Bogie se deriva de Bogie que es un sistema ferroviario antiguo, y de Rocker que es el diseño del diferencial. Este tipo de suspensión le permite repartir equitativamente la carga en todo el cuerpo del rover cuando uno de sus lados se eleva .Fue diseñado para superar obstáculos de hasta 65 cm y poder recorrer hasta 200 m por día en Marte.[1]



Figura 1: Suspensión Rocker-Bogie del Curiosity Rover

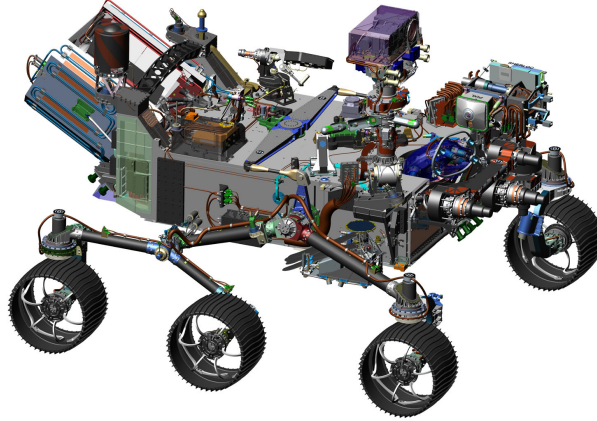


Figura 2: Diseño en computadora del Mars 2020 Rover [3]

El Mars 2020 Rover (Figura 2) cuenta con tecnología similar a la del Curiosity. Las llantas de 52.5 cm de diámetro son echas de aluminio y cuenta con radios curvos de titanio que brindan un soporte elástico.[2]

El RHex (Figura 3) posee 6 patas controladas independientemente, permitiendo un paso especializado que propulsan al RHex sobre terrenos como lodo, arena, vegetación, entre otros. La parte innovadora de este robot son las patas utilizadas, las cuales tienen la forma de medio círculo, lo cual brinda agilidad al robot al encontrarse con obstáculos. [4]

El Quattroped y TurboQuad se basan en la implementación de una híbrido pata-llanta, que permite cambiar la morfología de una llanta por medio de un sistema mecánico. En el Quattroped la llanta se transforma a una pata con forma de medio círculo como se observa en la Figura 4, similar a la que se encuentra en el Rhex de Boston Dynamics, por medio de un mecanismo piñón-cremallera, un motor DC y un servo RC.[6] En el TurboQuad, la llanta se transforma en dos mitades circulares como se observa en la Figura 5, por medio de



Figura 3: Rhex de Boston Dynamics [5]

un mecanismo que consta de dos piñones y una cremallera, y un motor DC.[7]



Figura 4: Transformación pata-llanta del Quattroped [7]



Figura 5: Transformación pata-llanta del TurboQuad [7]

El PUFFER (por sus siglas en inglés Pop-Up Flat Folding Explorer) es un robot en desarrollo por la NASA en el Jet Propulsion Laboratory. Este robot está inspirado en origami, ya que es capaz de aplastarse y arrastrarse con el fin de llegar a espacios a los que un rover no es capaz de llegar, y terrenos que presenten un riesgo para el rover. [8]

Gomes y Ruina propusieron un modelo de cuerpo rígido (Figura 7) que presenta movimiento periódico sin colisiones, evitando las mismas utilizando un modo interno de oscilación por el balanceo de la parte superior del cuerpo, la cual está acoplada a las patas por medio de resortes [9].

La eficiencia energética de locomoción puede incrementar si se reduce la pérdida de energía si se tienen actuadores eficientes. Se tienen pérdidas de energía por disipación interna, trabajo absorbido por los actuadores, deformación inelástica del terreno, pérdidas viscosas en los fluidos cercanos principalmente. Secundariamente se tienen las pérdidas de energía por el trabajo negativo realizado por los actuadores, ya que en su mayoría son no regenerativos y el trabajo realizado por los mismos no es recuperable. Por lo que para diseñar locomoción energéticamente eficiente es necesario hacer que las pérdidas por colisión y por trabajo negativo sean evitadas [10].

En 2002, Chatterjee describió un modelo unidimensional pasivo de salto, en el cual se observa que el movimiento de el sistema interno pasivo puede llegar a eliminar colisiones. Dos

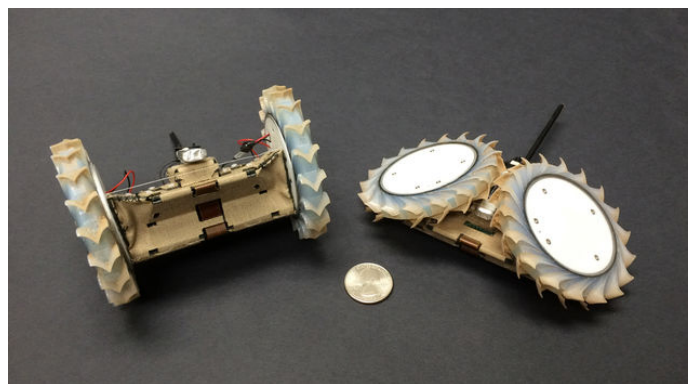


Figura 6: Robot Puffer de la NASA [8]

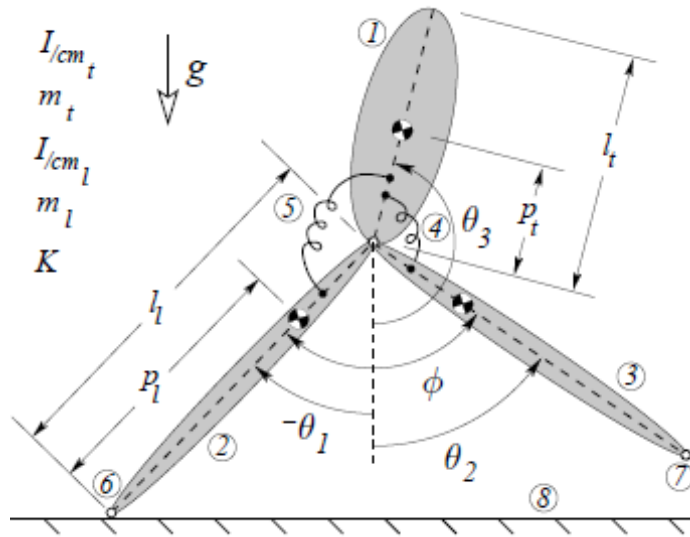


Figura 7: Modelo de cuerpo rígido con movimiento periódico sin colisiones [9]

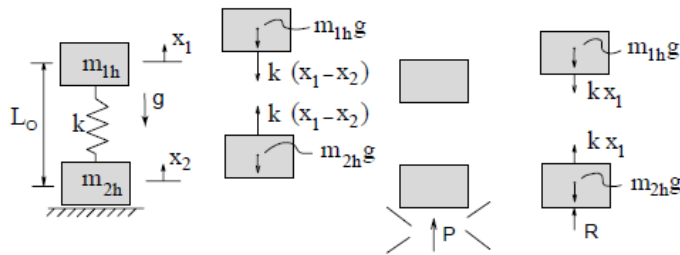


Figura 8: Modelo de salto: dos masas conectadas por un resorte sin masa [11]

masas puntuales se encuentran conectadas por un resorte, y la masa puntual inferior tiene una colisión inelástica con el suelo; y a pesar de la misma el sistema presenta movimientos periódicos simétricos que conservan la energía cuando la colisión se encuentra a una velocidad relativa igual a cero [11]. En la Figura 8 la masa  $m_{2h}$  que representa el pie tiene una colisión plástica con el suelo;  $x_1$  es igual a cero cuando  $m_{2h}$  se encuentra en el suelo y el resorte no tiene tensión. En la misma figura también se presentan tres diagramas de cuerpo libre, uno cuando el sistema se encuentra levantado, uno cuando se presenta la colisión, y uno en el contacto.

Nuestro país se encuentra en una ubicación geográfica en la cual somos más susceptibles a sismos; además se encuentran diferentes volcanes aún activos. El país es vulnerable ya que no se cuenta con la infraestructura necesaria para enfrentar estos fenómenos. La rápida y certera localización de personas que se encuentran afectadas por estos desastres es de suma importancia para poder garantizar una mayor probabilidad de supervivencia de los mismos, así como de los rescatistas. La doctora Tejsrhi Shah, de Médicos Sin Fronteras, asegura que muchos de los lesionados durante terremotos están tan heridos que no sobreviven para ser atendidos y afirma que si la gente está atrapada ".el hecho estar inmovilizado reduce las posibilidades de sobrevivir". La doctora Shah dice que estimar cuánto tiempo pueden sobrevivir las personas sin agua ".es la pregunta del millón de dólares", pero el promedio es entre tres y siete días [12].

Por esto el diseño de un robot, que permita localizar de manera rápida y en circunstancias no aptas para rescatistas, puede ser de gran ayuda para realizar rescates más precisos. En la erupción del volcán de fuego en Guatemala en el año 2018, se estimó que en un momento había más de 1000 desaparecidos, y solo se pudo buscar en 10 % de la zona afectada [13], ya que el mayor peligro para los rescatistas es que el volcán puede generar flujos piroclásticos, compuestos por gases tóxicos, piedras y materia volcánica[14].

Las forma de las patas permiten al robot tener agilidad en el movimiento. Utilizando ruedas se logra un movimiento suave sobre una superficie plana y aun sobre una que presenta pequeñas irregularidades y no se necesita de una sincronización precisa. El patrón a utilizar en la llanta, así como el material son factores que afectan la tracción de las mismas sobre distintas superficies. Utilizar patas de media circunferencia, permite tener un movimiento no tan suave como el que se logra con llantas, pero esta forma permite que el robot pueda movilizarse sobre superficies irregulares, y al utilizar las mismas en su parte no cóncava permite que estas funcionen como un apoyo sobre una superficie. Esta forma requiere de una sincronización que permita al robot mantenerse equilibrado, y permite también la variación de las zancadas para movilizarse en distintos terrenos y de distintas formas.



### 4.1. Objetivo general

Seleccionar e implementar un mecanismo de locomoción efectivo para el desplazamiento de una plataforma robótica en terrenos hostiles.

### 4.2. Objetivos específicos

- Contrastar entre dos propuestas de locomoción, una basada en ruedas y otra basada en extremidades, para seleccionar la que mejor se adapte a terrenos difíciles.
- Caracterizar matemáticamente el comportamiento de los mecanismos de locomoción para contrastar el comportamiento teórico con el comportamiento en la práctica.
- Realizar e implementar una plataforma de pruebas para evaluar el rendimiento de la locomoción.



El alcance de esta investigación es realizar dos prototipos funcionales de mecanismos que permitan la movilización en terrenos hostiles de un robot de búsqueda y rescate, realizar pruebas a los mismos en una plataforma de pruebas diseñada para recrear distintas situaciones simuladas con distintos terrenos, analizar el movimiento y comportamiento de los prototipos por medio de software y realizar una comparación entre ellos para elegir el que mejor cumpla con el objetivo de brindar movilización a un robot en terrenos hostiles.

Un prototipo será un híbrido pata-llanta inspirado en el diseño del TurboQuad, utilizando los mismos mecanismos, realizando suposiciones del diseño de componentes mecánicos utilizados en el mismo. El otro prototipo será un rimless wheel, basado en el concepto introducido por Mcgeer en 1990, el cual posee un numero de patas distribuidas alrededor de la parte central del mecanismo.

La caracterización matemática de ambos mecanismos será básica, considerando las patas como sólidos y no se considerarán partes como las fundas de TPU.

Los dos prototipos funcionales serán diseñados en Autodesk Inventor, e impresos en 3D con materiales como TPU: y PLA:.

Las pruebas serán realizadas en una plataforma rectangular sobre la cual se simularán terrenos hostiles con materiales como tierra, arena de río y gravilla.

El análisis por software se realizará con en Kinovea:. Este análisis consta en evaluar la trayectoria que produce el dentro del mecanismo al movilizarse por los distintos terrenos y obteniendo los datos de velocidad, aceleración y desplazamiento vertical.

El manejo de datos y gráficas obtenidas de Kinovea se realizará con el software Matlab:.



La movilidad en terrenos difíciles es limitada dada la ausencia de conceptos de locomoción adecuados. Gran parte de los conceptos de locomoción en superficies que se encuentran disponibles no han evolucionado últimamente. El concepto de máquinas que caminan (Figura 9) se refiere a máquinas que adaptan a ambientes no estructurados dado que pueden asegurar estabilidad en un amplio rango de situaciones, pero necesitan de muchos recursos de control y sistemas mecánicos complejos. El concepto de caterpillars demuestra gran habilidad en off-road con alta estabilidad y un coeficiente de fricción bajo durante el movimiento a pesar de su simplicidad y robustez, pero se tienen pérdidas de tracción al realizar giros. El concepto de rovers con ruedas (Figura 10) presenta una solución óptima para ambientes estructurados (terrenos planos y regulares), pero la movilidad se ve comprometida en terrenos difíciles, y depende del tipo de ambiente y del tamaño de los obstáculos. [15]

Los sistemas de locomoción que se encuentran disponibles pueden ser divididos a grandes rasgos en sistemas con llantas y con patas. Los sistemas con llantas poseen gran adapta-



Figura 9: Spot Mini de Boston Dynamics, que adopta el concepto de máquinas que caminan. [16]



Figura 10: SandFlea de Boston Dynamics, que adopta el concepto de rovers con ruedas. [17]

bilidad en terrenos difíciles cuando estos utilizan sistemas pasivos de suspensión, como se observa en el Shrimp Rover desarrollado por el Instituto Federal Suizo de Tecnología Lausanne (EPFL, por sus siglas en francés).[18]. El Shrimp Rover cuenta con una buena estabilidad tanto en terrenos suaves y difíciles, y su habilidad al escalar objetos le permite subir escalones de hasta el doble del diámetro de sus llantas (22cm), gracias a los dos bogies(chasis que lleva un juego de ruedas, el cual se encuentra unido a un vehículo) independientes. La habilidad de escalar del rover puede observarse en la Figura 11 [19]

Las llantas son por mucho el mecanismo de locomoción más popular en robots móviles y vehículos. Puede lograr una buena eficiencia con simples implementaciones mecánicas. El balance no es un problema que necesita de investigación rigurosa ya que los robots con llantas son diseñados de tal manera que todas las llantas estén en contacto con el suelo en todo momento; y la investigación se enfoca más en problemas como tracción, maniobrabilidad,



Figura 11: Prueba de estabilidad Shrimp Rover [19]

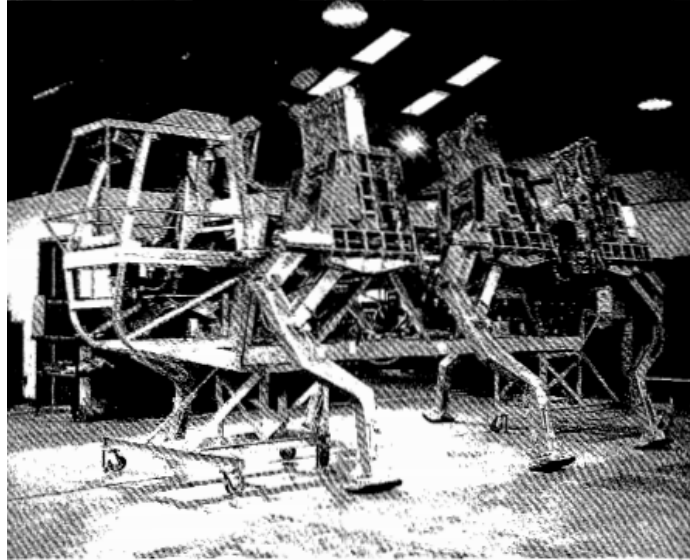


Figura 12: Adaptive Suspension Vehicle en etapa de ensamble [22]

y control. El mínimo número de llantas requeridas para estabilidad estática es dos. Bajo circunstancias ordinarias esta solución requiere que el diámetro de las llantas sea impráctico, por lo cual un se requiere convencionalmente de una tercera llanta y que cumpla con encerrar al centro de gravedad dentro de un triángulo formado por el punto de contacto de las tres llantas. Al utilizar un robot con dos ruedas este puede modelarse con un modelo realista conocido como robot accionado diferencialmente, colocando un marco de referencia en cada rueda, y así conocer la velocidad de las ruedas para obtener cierta velocidad lineal y angular. [20]

Las máquinas con patas proveen la locomoción de vehículos autónomos en una mayor gama de tipos de terrenos. Los sistemas de patas cuentan con la habilidad de adaptar su postura y caminar en terrenos desiguales y moverse a través de terrenos discontinuos. [18]

Las máquinas con patas pueden distinguirse por su movimiento, el cual puede ser estático o dinámico. Las máquinas con movimiento estático mantienen equilibrio estático durante todo su movimiento, requieren de al menos cuatro patas, impone una restricción de velocidad ya que las aceleraciones cíclicas deben ser limitadas para minimizar las fuerzas inerciales. Un ejemplo de máquina con movimiento estático es el Adaptive Suspension Vehicle (Fig 12). Las máquinas con movimiento dinámico pueden tener una menor cantidad de patas y pueden ser más rápidos.[21] La incorporación de elementos de suspensión coordinada activa en sistemas de ruedas presentan una mejora en desempeño sobre los sistemas convencionales tales como capacidad de sobrepasar obstáculos, capacidad de auto, menores requerimientos de energía en terrenos difíciles, y la habilidad de acomodarse a fallo de componentes; y también conlleva desventajas como complejidad relativa (lo cual aumenta potenciales problemas de seguridad) y software de computadora avanzado para lograr reemplazar la coordinación mecánica con coordinación electrónica.[23] En el Adaptive Suspension Vehicle (ASV) (Fig 12 ) desarrollado en 1981 posee seis patas diseñadas para el movimiento sustentable en te-

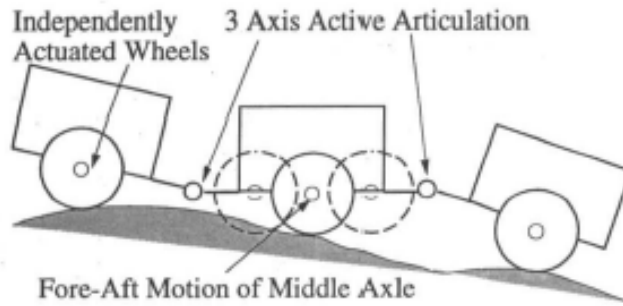


Figura 13: Geometría de vehículos de llantas activamente articulados [24]

rrenos irregulares, utilizando pantógrafos de dos dimensiones. El sistema sensa 82 variables de control que son retroalimentadas como señales análogas a una computadora de control, la cual consta de 17 Intel 86/30. [22]

Los vehículos híbridos llanta-pata (HWLV:, por sus siglas en inglés) son una subclase de los vehículos de llantas activamente articulados (WAAV:, por sus siglas en inglés) que tienen mejores capacidades en terrenos irregulares y desconocidos. Los vehículos híbridos llanta-pata consisten en una combinación entre llantas y patas que posee grados de libertad independientes entre las mismas, lo que permite controlar su postura. El control de estos sistemas accionados exhiben una interacción compleja con el ambiente mucho más difícil a la de los robots convencionales. [18].

Los vehículos WAAV: están compuestos por módulos que son actuados por llantas independientemente actuadas, y estos módulos se encuentran interconectados por articulaciones activas, que son juntas esféricas de tres grados de libertad (Figura 13). Este tipo de vehículos posee actuadores controlados independientemente para los grados de libertad de la suspensión y locomoción, los cuales pueden influenciar directamente las componentes de las fuerzas de contacto en los puntos de contacto del vehículo y el terreno. [24].

El sistema experimental basado en el vehículo WAAV:, desarrollado en 1994 por el Advanced Robotics Laboratory de Ohio State University posee la habilidad de auto recuperación(Figura ) en distintas situaciones con ayuda de actuadores presentes en las juntas esféricas.

La rimless wheel fue propuesta por McGeer en 1990, y se define como una masa con  $n$  picos igualmente espaciados que se extienden hacia el exterior, el cual en las condiciones adecuadas y con un diseño mecánico correcto es capaz de estabilizarse en un ciclo estable sin la necesidad de control en una pendiente cuesta abajo. La estabilización se debe a la interacción entre la inercia de la rueda y la fuerza de gravedad. [21]

La colisión plástica de una pata resulta en una discontinuidad de la velocidad, y causa

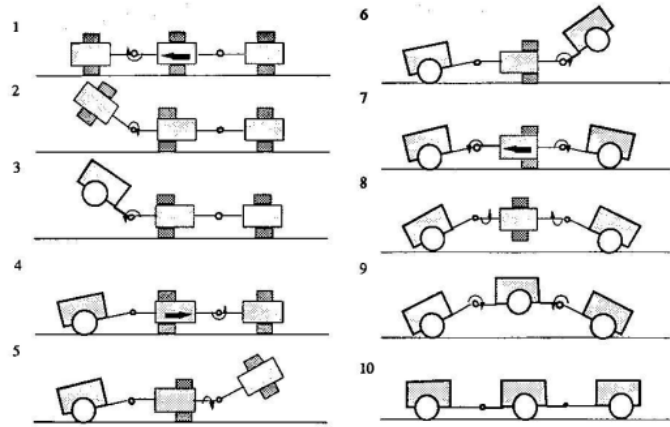


Figura 14: Ejemplos de auto recuperación del vehículo WAAV: en cinco situaciones distintas [25]

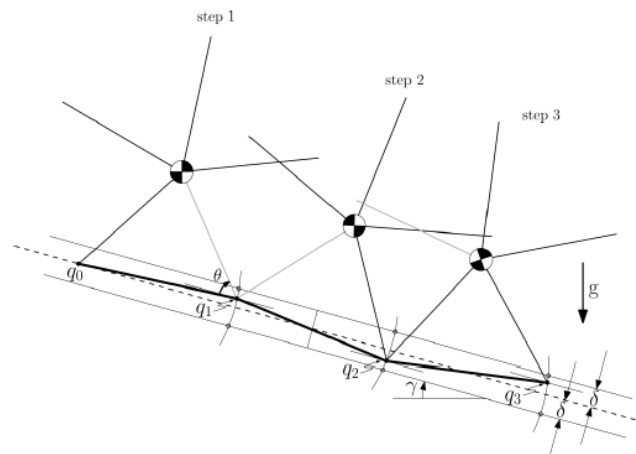


Figura 15: Tres pasos de una Rimless Wheel en terreno inclinado con una superficie rugosa [26]

una pérdida en energía cinética. Por lo que en cuesta abajo la rueda gana energía cinética de la energía potencial gravitatoria, aunque se pierde una pequeña porción dada la colisión del siguiente paso. La estabilización al andar se logra cuando la energía potencial es igual a la energía perdida por el impacto. [27]

Una de las ventajas de la locomoción con patas es la habilidad que poseen de atravesar terrenos difíciles ya que se necesita contacto intermitente con el terreno. La rimless wheel no tiene un movimiento periódico sobre terrenos difíciles dado que la posición de una pata al inicio del paso será diferente al final del mismo debido a la aspereza del terreno, pero puede tener largos periodos de caminata continua. Ya que el impacto de las patas es la única manera de pérdida de energía, en el modelo ideal, el estudio de la colisión plástica permite conocer la respuesta del sistema al impacto de las patas, y poder diseñar métodos que permitan disminuir la pérdida de energía en el sistema [26]. En la Figura 15 se observa una serie de pasos que realiza la rimless wheel, en donde  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  representan la rugosidad del terreno inclinado en el punto de contacto,  $g$  es la gravedad, y  $\gamma$  es el ángulo de inclinación del terreno respecto a la horizontal,  $\theta$  es el ángulo entre el terreno

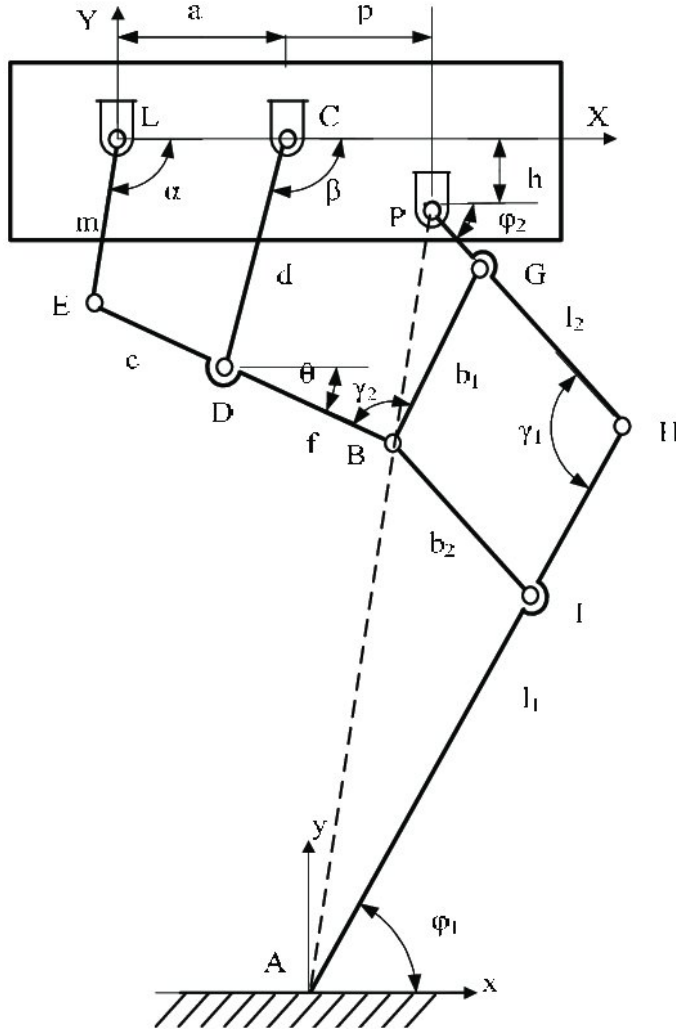


Figura 16: Mecanismo de Chebyshev de un grado de libertad

y la pata, y delta denota la rigurosidad máxima por encima o por debajo del suelo inclinado.

En la colisión plástica, la energía se puede perder por la combinación de mecanismos de disipación de energía. El balance de momento lineal y angular puede determinar la pérdida de energía, independientemente de los mecanismos de disipación si el modelo rígido es preciso para todas las partes antes y después de la colisión. Cuando un objeto sin masa se adhiere junto con un cambio brusco de velocidad, se tiene una pérdida de energía, y estas pérdidas de energía por colisión representan el consumo de energía en los sistemas pasivos dinámicos. [9]

El mecanismo de Chebyshev (Figura 16) consiste de un modelo de un grado de libertad basado en un mecanismo aproximado de línea recta, el cual guía el punto de contacto del mecanismo con el suelo de tal manera que casi evita la colisión.[29]

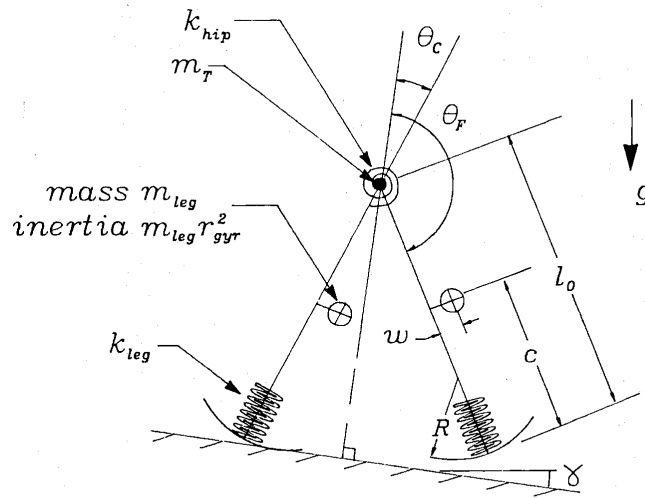


Figura 17: Mecanismo propuesto por McGeer [28]

McGeer, propuso un modelo en 1990 (Figura 17) en el cual se colocan resortes telescópicos sin masa al final de las patas, y se puede obtener una disipación de energía cercana a cero si la velocidad del final de la pata en el contacto sea paralela a la pata [28].

Los flujos granulares se encuentran separados por tres regiones que corresponden a los tres regímenes de flujo: una región sólida que los granos no se mueven, una región líquida en la que fluye una capa densa, y una región gaseosa en la que los granos rebotan en distintas direcciones, lo cual se puede observar en la Figura 18, la cual ilustra los regímenes de flujo

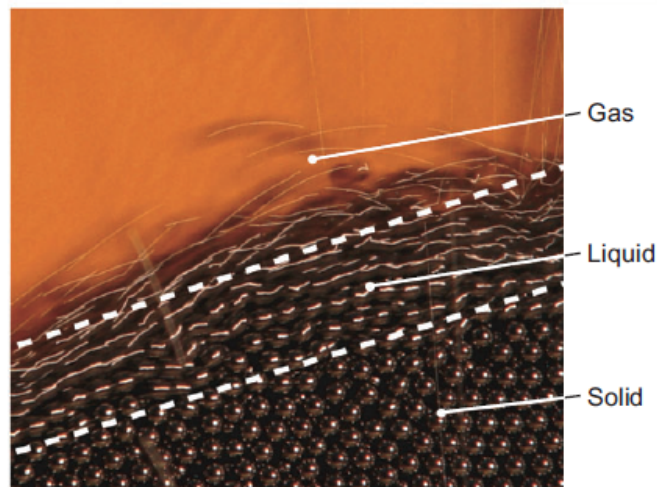


Figura 18: Representación de regímenes de flujo de bolas de acero. [30]



### 7.1. Motor Dynamixel AX-12A

Se utilizaron cuatro motores Dynamixel AX-12A de la compañía Robotis Co. que permiten controlar su velocidad y posición con una alta precisión, y cuentan con las características de voltaje y corriente de operación, peso y velocidad de comunicación que se describen en el Cuadro 1.

### 7.2. Velocidad

Las velocidades del motor utilizadas para realizar las pruebas se encuentran en la columna de velocidad de motor en el Cuadro 2, en la columna de velocidad de motor (rpm) del mismo cuadro se encuentra la conversión de velocidad de motor en unidades utilizadas en el código a rpm de las velocidades utilizadas en las pruebas realizadas. En este trabajo se utiliza el término de velocidad de motor de la columna izquierda.

#### Características Dynamixel AX-12A

---

<b>Voltaje de operación</b>	9-12 V (11.1 V recomendado)
<b>Peso</b>	55 g
<b>Corriente máxima</b>	900 mA
<b>Velocidad de comunicación</b>	7343 bps - 1Mbps

Cuadro 1: Características del motor Dynamixel AX-12A

## Velocidades para motor AX-12A

Velocidad de motor	Velocidad de motor (rpm)
200	22.2
400	44.4
600	66.6
800	88.8
1000	111

Cuadro 2: Velocidad de motor en código y su equivalente en rpm

### 7.3. Código

Se realizó un código en Arduino: para controlar el giro de los motores por medio de dos botones. Un botón activa dos motores, para el mecanismo rimless wheel, y el otro botón activa los cuatro motores para el mecanismo híbrido. Cada motor posee un número de identificación propio, con el cual se enciende el motor y se inicia el giro del mismo. Los cuatro motores utilizados poseen el mismo número de identificación ya que así se encuentran configurados al ser utilizados por primera vez. Con un código de Arduino: se realizó el cambio del número de identificación para poder utilizar dos o cuatro motores al mismo tiempo para realizar las pruebas.

### 7.4. Circuito

En la Figura 21 se presenta el diagrama del circuito utilizado para controlar el giro de los motores por medio de dos botones. Se utilizó un Arduino: ATmega 2560, dos resistencias de 10k ohm para los botones, dos botones y cuatro motores Dynamixel AX-12A.

### 7.5. Acople

Se realizaron acoples que permiten la transmisión de potencia del motor al mecanismo. El motor Dynamixel AX-12 cuenta con distintas piezas intercambiables, y se utilizó una pieza circular de 40 mm de diámetro, que cuenta con distintos agujeros distribuidos en la pieza.

En Autodesk Inventor 2018 se realizó una pieza del mismo diámetro, que cuenta con 8 ranuras de 10.2mm de largo y 4.2 mm de ancho, separadas por un ángulo de 45 grados entre las mismas, lo cual permite colocar hasta 8 tornillos que permiten ajustar el acople al motor. Se realizaron dos iteraciones del acople (Figura 22), una de ellas posee un agujero de 7.8 mm de diámetro (Figura 22b) para introducir a presión un eje de 7.650 mm, y el otro

cuenta con una extrusión (Figura 22a) de un círculo de 8 mm de diámetro y un cuadrado de 10 mm x 5 mm que coincide con el centro del círculo, lo que permite la transmisión de potencia del motor al engrane o al mecanismo rimless wheel.

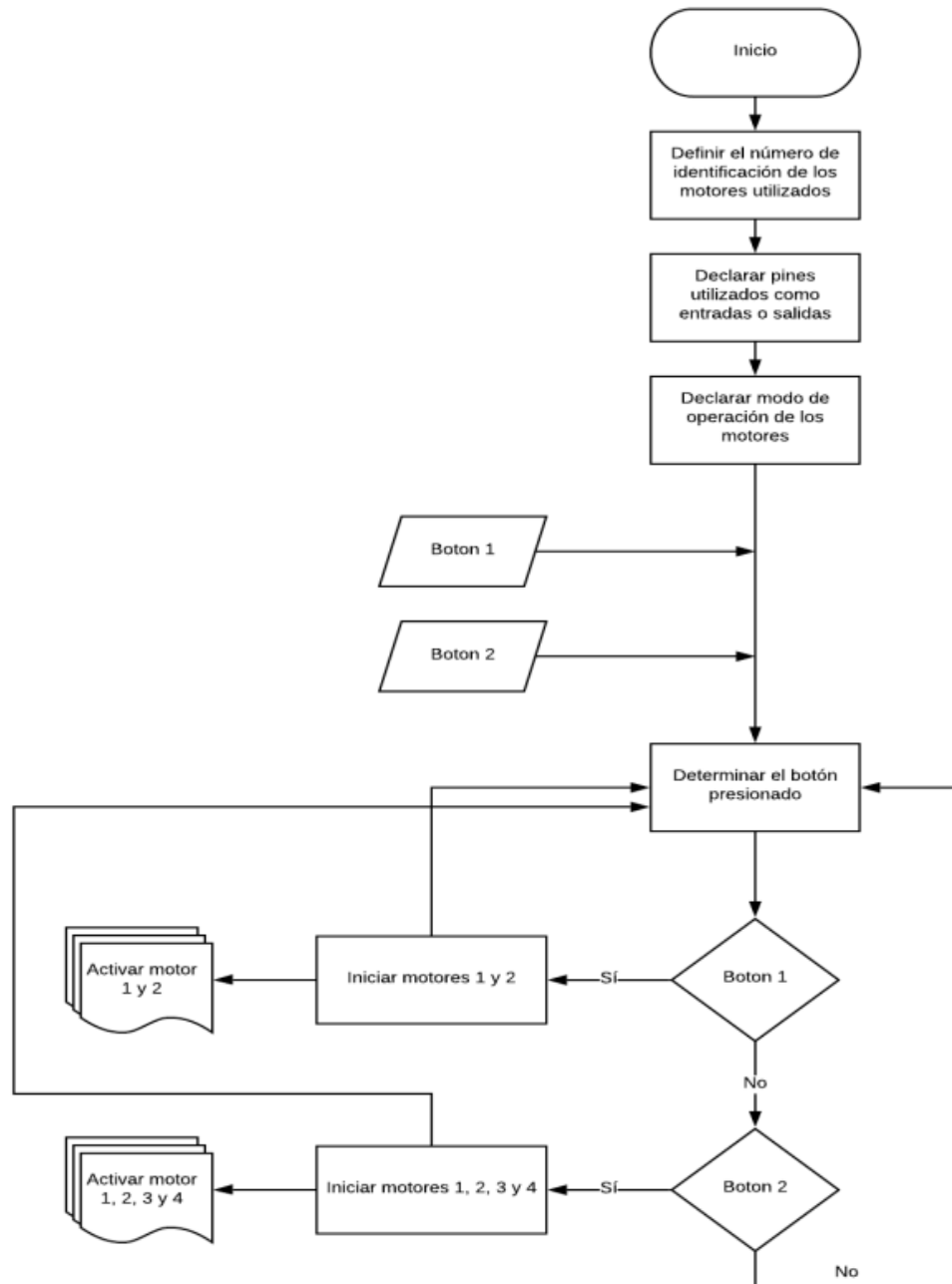


Figura 20: Diagrama de flujo del programa en Arduino: para control de motores

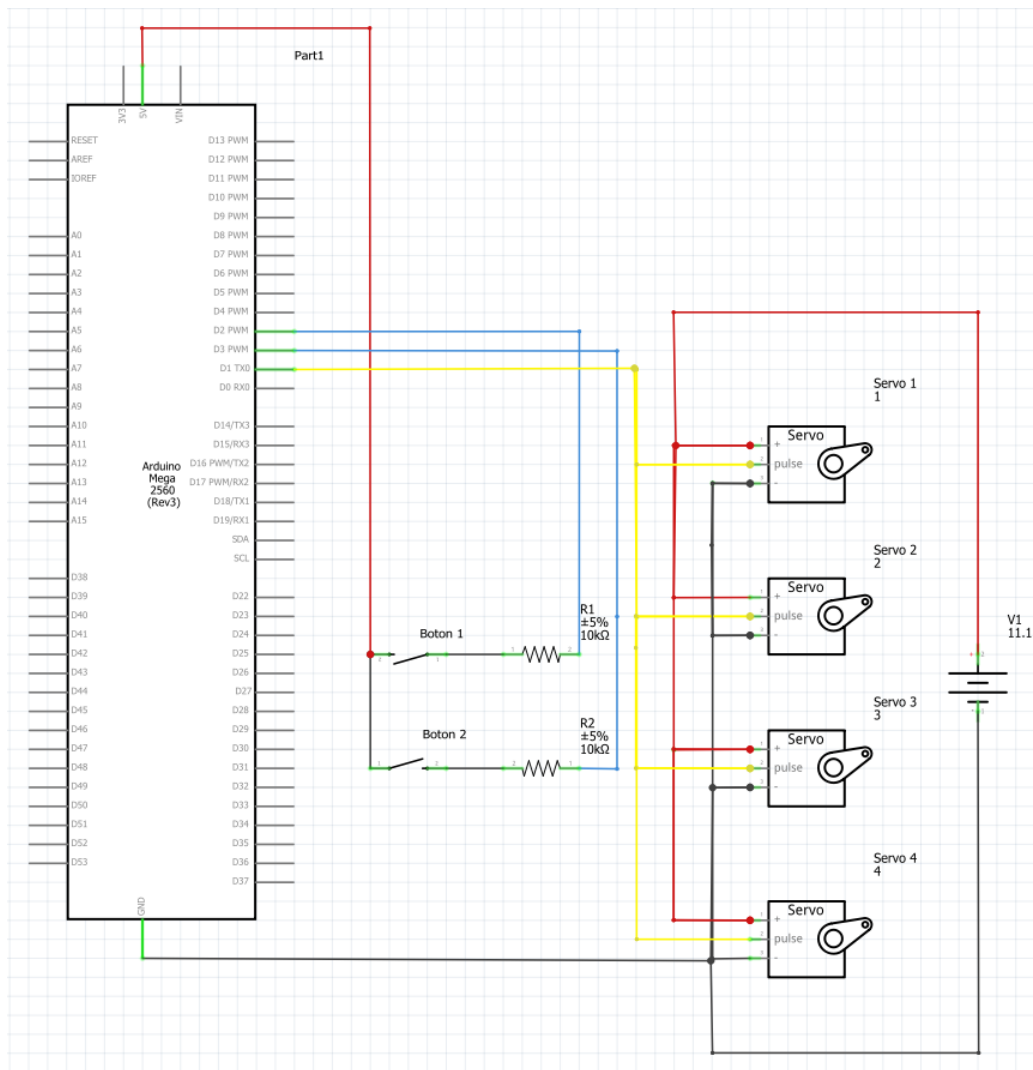


Figura 21: Diagrama del circuito utilizado para los motores

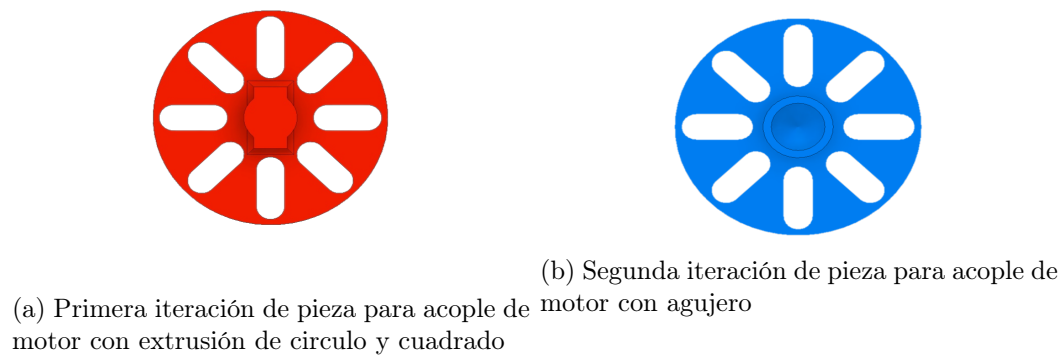


Figura 22: Iteraciones de acople de motor

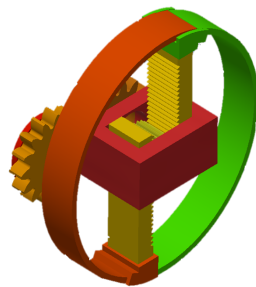
---

## Mecanismo híbrido

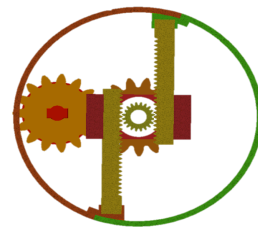
---

El mecanismo híbrido (Figura 23) busca combinar una rueda y 2 patas en forma de semicírculo. El mecanismo que consta de un piñón y dos cremalleras permiten realizar el cambio de morfología pata-llanta. El giro del piñón permite mover las cremalleras en sentido opuesto, lo cual da lugar a dos semicírculos desfasados por el giro del piñón.

Una caja abierta por dos caras opuestas permite sostener el piñón por medio de dos cojinetes por los que pasa un eje. A la caja se encuentra fijo a un engrane recto que posee un cojinete en el centro y permite la transmisión de potencia necesaria para girar el piñón y realizar el cambio de morfología. En juego con el engrane recto se encuentra un engrane recto por el que pasa una extrusión como la que se observa en la Figura 23a, que transmite la potencia que permite mover toda la caja con el mecanismo de cambio de morfología.



(a) Vista isométrica del ensam-  
ble completo del mecanismo híbrido



(b) Vista frontal interna del ensam-  
ble completo del mecanismo híbrido

Figura 23: Vistas del ensam-  
ble completo del mecanismo híbrido en Autodesk Inventor

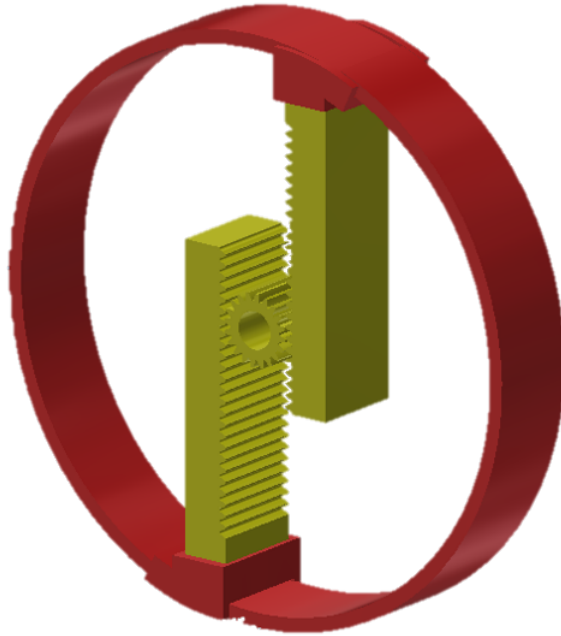


Figura 24: Piñón y cremalleras con patas

Cada media llanta fue recubierta con una funda de material flexible que cuenta con un patrón de llanta, el cual brinda una mayor tracción.

El piñón, cremalleras, caja abierta y engranes rectos fueron realizados en impresión 3D, con material PLA. Se utilizó un eje de madera de 8 mm de diámetro y cojinetes ABEC 5 de 22 mm de diámetro externo y 8 mm de diámetro interno.

## 8.1. Piñón y cremallera

El piñón fue diseñado con un ayuda de la herramienta Spur Gears Component Generator de Autodesk Inventor 2018. Con un módulo (m) de 0.700 mm, una distancia entre centros de 14mm (Dp) y un ángulo de presión de 20°, se obtuvo como resultado un número de dientes igual a 20 dientes. El módulo y paso fueron seleccionados de la tabla de módulos y pasos normalizados. El diámetro externo del piñón es de 15.4 mm.

La cremallera fue diseñada con los mismos datos obtenidos del piñón. El desplazamiento lineal que tiene la cremallera fue calculado con la ecuación

$$\text{Desplazamiento} = \text{paso} * (\text{numerodientes} * \text{numerodevueltas})$$

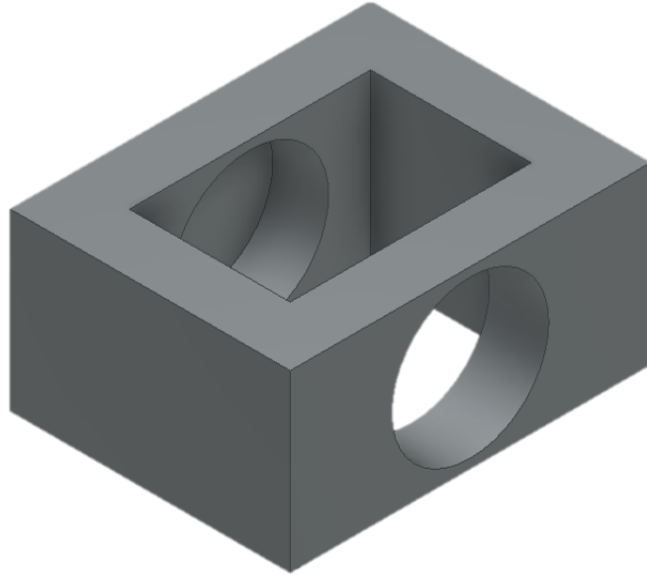


Figura 25: Caja para ensamble de piñón, cremallera y cojinetes

## 8.2. Caja

Se diseñó una caja con medidas de 51.5 mm x 40 mm x 25.5 mm, que cuenta con dos agujeros de 22.5 mm de diámetro para colocar dos cojinetes por los cuales pasa un eje sobre el cual está montado el piñón. Las dimensiones internas son de 34.5 mm de largo para colocar el piñón y las dos cremalleras, y 22 mm dejando dos milímetros entre las paredes y el ancho del piñón y cremallera.

## 8.3. Engranés rectos

Los engranes rectos fueron realizados de manera similar al piñón, utilizando un módulo (m) estándar y 15 dientes, y utilizando la herramienta de Spur Gears Component Generator

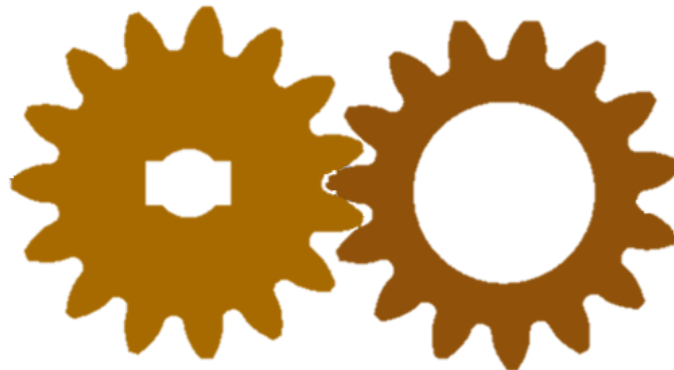


Figura 26: Ensamble de engranes rectos



(a) Primera iteración del ensamble de juntas y patas (b) Segunda iteración del ensamble de juntas y patas

Figura 27: Iteraciones del ensamble de juntas y patas del mecanismo híbrido

de Autodesk Inventor 2018.

#### 8.4. Juntas y patas circulares

Para las juntas que unen las patas circulares con los piñones se realizaron dos iteraciones, ya que al realizar el ensamble se encontró que existía una separación de ambas patas al encontrarse en forma de llanta como se observa en la Figura 27a. Para eliminar esta separación se realizó una segunda iteración, en la cual se buscó que la parte final de las patas encaja con las juntas para poder formar una llanta como se observa en la Figura 27b, por lo cual se ajustó el ángulo en el cual se encuentra apoyada la pata. En cada iteración realizada también se cambió la forma que posee la pata, ya que en la iteración 1 se tenía un perfil en I para la pata, lo cual presentaba rigidez en la misma, y en la segunda iteración se cambió a un perfil plano con un espesor pequeño que permite un comportamiento de amortiguamiento en la pata.

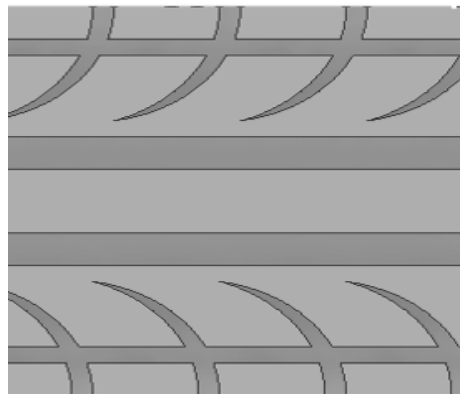
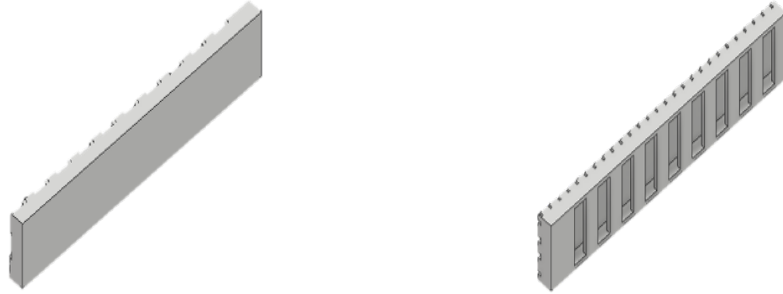


Figura 28: Patrón de llanta unidireccional simétrico



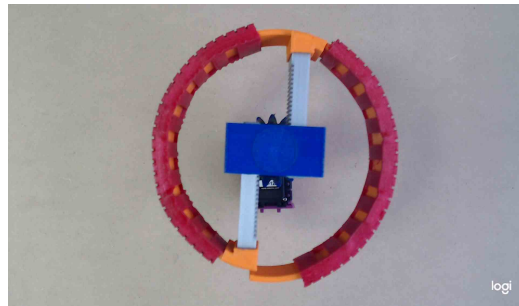
(a) Primera iteración de funda de TPU:, parte trasera tapada (b) Segunda iteración de funda de TPU:, parte trasera con patrón rectangular

Figura 29: Iteraciones de funda de TPU: para las patas del mecanismo híbrido

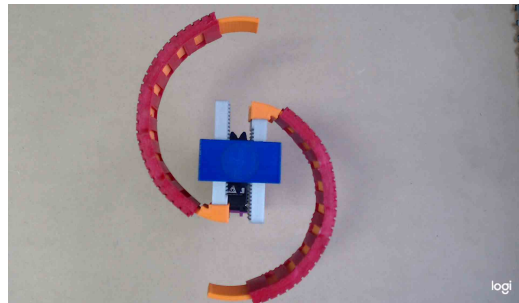
## 8.5. Patrones de llantas

Para dar mayor tracción a las llantas al momento de desplazarse por distintos terrenos, se realizaron fundas de material TPU: NinjaFlex, con un patrón direccional unilateral como el de la Figura 28, el cual permite que no se cree hidroplaneo, ya que posee flechas que van desde el centro de la llanta hacia los extremos, permitiendo que el agua que se encuentra bajo las llantas se desplace en la misma dirección.

Las fundas realizadas para colocar en las dos patas con forma de semicírculo fueron realizadas de dos maneras distintas. Al realizar la impresión 3D de la manera en que se observa



(a) Ensamble físico mecanismo híbrido cerrado



(b) Ensamble físico mecanismo híbrido abierto

Figura 30: Ensamble del mecanismo híbrido en configuración cerrado y abierto con fundas

en la Figura 29a, con la parte trasera tapada, se tuvo dificultad al introducir la misma en la pata, por lo que se optó por realizar un patrón rectangular a lo largo de la parte trasera como en la Figura 29b, el cual permitió una introducción en la pata más fácil.

El TPU: NinjaFlex cuenta con una mayor flexibilidad y menor rigidez que el TPU: estándar, lo que permite una mayor deformación del material.

## 8.6. Ensamble

El ensamble del mecanismo (Figura 30) consistió en introducir un eje al piñón dejando 10 mm del eje de un lado del piñón y 50 mm del eje del otro lado. El lado de 10 milímetros del eje se introduce en el cojinete que se encuentra en la parte cerrada de la caja para el ensamble, y luego se introduce el segundo cojinete al eje y se fija al agujero externo de la caja. Luego se introduce un cojinete en un engrane recto, y este se fija a la caja con cemento de contacto. Las cremalleras se fijaron a las juntas de las patas circulares con cemento de contacto. Las fundas de TPU: NinjaFlex se introdujeron a las patas.

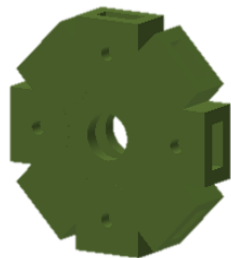
---

## Mecanismo Rimless Wheel

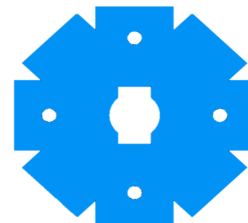
---

El mecanismo Rimless Wheel cuenta con 8 patas, cuatro de ellas siendo sólidas, y cuatro de ellas siendo shocks. La parte central del mecanismo está hecha de PLA y cuenta con ocho espacios para colocar cuatro shocks y cuatro patas.

La pieza central cuenta con 8 espacios que se encuentran distribuidos equitativamente a lo largo de la pieza, en los cuales se colocaran las patas a utilizar, siendo estas sólidas o shocks (Figura 32b y 32b respectivamente).



(a) Pieza central del mecanismo rimless wheel con extrusion de un círculo y un rectángulo con agujero



(b) Pieza central del mecanismo rimless wheel

Figura 31: Iteraciones de parte central del mecanismo Rimless Wheel



(a) Shock del mecanismo rimless wheel



(b) Pata del mecanismo rimless wheel

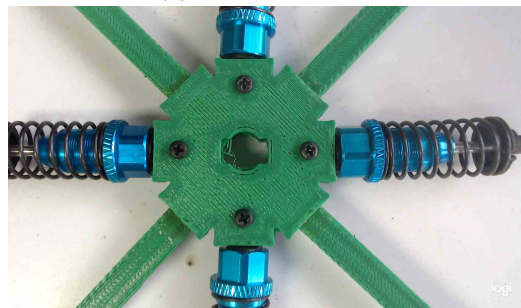
Figura 32: Patas utilizadas en el mecanismo Rimless Wheel

## 9.1. Ensamble

El ensamble del mecanismo (Figura 33) consistió en agregar cemento de contacto dentro del espacio para insertar las patas sólidas. Los resortes se insertaron en los espacios restantes y se colocaron tornillos para sujetar los resortes a la parte central del mecanismo (Figura 33b).



(a) Ensamble físico



(b) Parte central del ensamble de las patas y resortes

Figura 33: Ensamble del mecanismo rimless wheel

## 10.1. Mecanismo Rimless Wheel

### 10.1.1. Linealización de la energía mecánica

La ecuación dinámica del mecanismo rimless wheel en la Figura 34 está dada por

$$ml^2\ddot{\theta} - mgl\sin(\theta) = 0 \quad (1)$$

y su linealización alrededor  $\theta = \dot{\theta} = 0$  es

$$ml^2\ddot{\theta} - mgl\theta = 0 \quad (2)$$

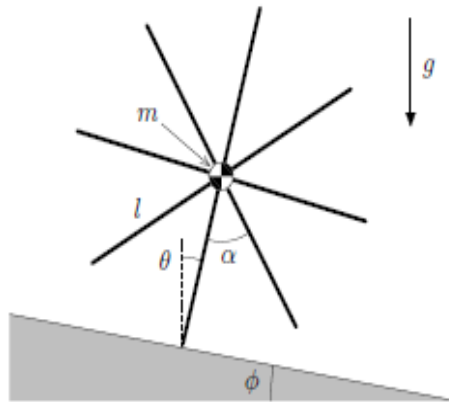


Figura 34: Modelo Rimless Wheel [32]

Arreglando la ecuación 2

$$\ddot{\theta} = \omega^2 \theta \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4)$$

La representación de espacio de estados es

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

La energía cinética del mecanismo rimless wheel original esta determinada por

$$K(\dot{\theta}) = \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

considerando la aproximación de segundo orden para la energía potencial del mecanismo rimless wheel original

$$P(\theta) = mgl \left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right) \quad (7)$$

Se define la ecuación 7 como la energía potencial correspondiente al sistema linealizado. La energía potencial máxima que puede alcanzar el mecanismo se define como  $Pmax = mgl$ . La ecuación 7 se reescribe como

$$P(\theta) = Pmax - \frac{1}{2} mgl \theta^2 \quad (8)$$

La energía mecánica total se determina por medio de

$$E(\mathbf{x}) = Pmax + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{W}_0 \mathbf{x} \quad (9)$$

en donde

$$\mathbf{W}_0 = \begin{bmatrix} -mgl & 0 \\ 0 & ml^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{W}_0$  es una matriz constante que incluye la inercia y gravedad.

### 10.1.2. Linealización de movimiento

Tomando el punto de contacto del mecanismo con el suelo como el origen, la posición del centro de masa del mecanismo  $(x_{cm}, z_{cm})$ , es  $(l \sin(\theta), l \cos(\theta))$ . Ya que la energía potencial

del modelo linealizado está dada por la ecuación 7, la posición en  $Z$  del sistema linealizado ( $\overline{z_{cm}}$ ) se puede determinar como

$$\overline{z_{cm}} = l\left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right) \quad (12)$$

Su derivada en el tiempo es

$$\dot{\overline{z_{cm}}} = -l\theta\dot{\theta} \quad (13)$$

La energía cinética esta dada por

$$K = \frac{1}{2}m(\dot{\overline{x_{cm}}}^2 + \dot{\overline{z_{cm}}}^2) = \frac{1}{2}m(\dot{\overline{x_{cm}}}^2 + l^2\theta^2\dot{\theta}^2) \quad (14)$$

y debe ser igual a la ecuación 6. La derivada del tiempo de la posición  $X$  del centro de masa ( $\overline{x_{cm}}$ ) puede determinarse como

$$\dot{\overline{x_{cm}}} = l\dot{\theta}\sqrt{1 - \theta^2} \quad (15)$$

y ( $\overline{x_{cm}}$ ) se puede obtener al integrar esto con respecto al tiempo

$$\overline{x_{cm}} = \int_0^\theta l\sqrt{1 - x^2}dx = \frac{1}{2}l(\theta\sqrt{1 - \theta^2} + \sin^{-1}(\theta)) \quad (16)$$

## 10.2. Mecanismo híbrido

### 10.2.1. Movimiento del mecanismo híbrido abierto

El mecanismo híbrido tiene dos grados de libertad en coordenadas polares, por lo que el estado de movimiento se puede expresar como

$$\chi_i = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i \\ r_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

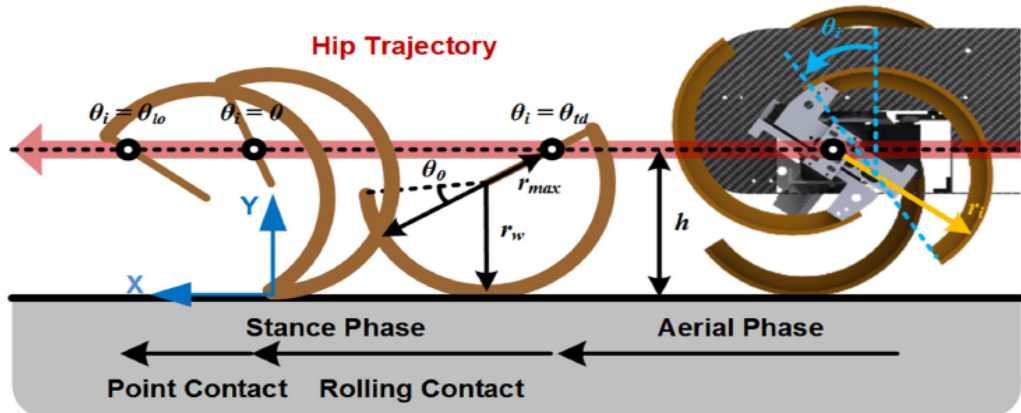


Figura 35: Modelo Rimless Wheel [6]

El factor de trabajo ( $\beta$ ) se define como la relación de tiempo de la pata en la fase de apoyo y el total del periodo. La velocidad de avance se describe como

$$v\Delta = w_{st}h = \frac{1 - \beta}{\beta} w_{sw}h \quad (18)$$

en donde  $w_{st}$  y  $w_{sw}$  son las velocidades angulares en la fase de apoyo y en la fase de oscilación respectivamente.

En la Figura 35 se observa que el mecanismo híbrido abierto tiene dos fases, una fase de apoyo y una fase aérea. La fase de apoyo posee dos sub fases, una de contacto continuo ( $\theta_{td} \leq \theta_i \leq 0$ ) y una de punto de contacto ( $0 \leq \theta_i \leq \theta_{lo}$ ). Cuando el mecanismo se mueve hacia adelante, el vector de posición del centro de masa ( $x_i, y_i$ ) en la fase de apoyo se puede escribir como

$$\begin{cases} x_i = r_w\theta_i + (r_i - r_w)\sin(\theta_i + \theta_0) \\ y_i = r_w + (r_i - r_w)\cos(\theta_i + \theta_0) \end{cases} \theta_{td} \leq \theta_i \leq 0 \quad (19)$$

$$\begin{cases} x_i = r_w\sin(\theta_i) + (r_i - r_w)\sin(\theta_i + \theta_0) \\ y_i = r_w\cos(\theta_i) + (r_i - r_w)\cos(\theta_i + \theta_0) \end{cases} 0 \leq \theta_i \leq \theta_{lo} \quad (20)$$

La velocidad del mecanismo puede derivarse diferenciando el vector de posición en 19 y 20. Con la velocidad y una altura constante del centro de masa, el movimiento ( $\chi_i$ ) se puede derivar usando la ecuación 18

$$\chi_i = \begin{bmatrix} w_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_i(\delta)v\cos^2(\theta_i + \theta_0)}{h - r_w\sin^2(\theta_i + \theta_0)} \\ \frac{h - r_w}{\cos(\theta_i + \theta_0)} + r_w \end{bmatrix} \theta_{td} \leq \theta_i \leq 0 \quad (21)$$

$$\chi_i = \begin{bmatrix} w_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_i(\delta)v\cos^2(\theta_i + \theta_0)}{h - r_w\sin(\theta_0)\sin(\theta_i + \theta_0)} \\ \frac{h - r_w\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i + \theta_0)} + r_w \end{bmatrix} 0 \leq \theta_i \leq \theta_{lo} \quad (22)$$

La configuración de contacto y despegue pueden ser derivadas por relación geométrica como

$$\begin{cases} \theta_{td} = -(\cos^{-1}(\frac{h - r_w}{r_{max} - r_w}) + \theta_0) \\ \theta_{lo} = \cos^{-1}(\frac{r_w h + (r_{max} - r_w)(H\sin(\theta_0) + h\cos(\theta_0))}{r_w^2 + (r_{max} - r_w)^2 + 2r_w(r_{max} - r_w)\cos(\theta_0)}) \end{cases} \quad (23)$$

en donde

$$H = \sqrt{r_w^2 + (r_{max} - r_w)^2 - h^2 + 2r_w(r_{max} - r_w)\cos(\theta_0)} \quad (24)$$

La duración de la fase de apoyo ( $T_{i-st}$ ) puede expresarse como la sumatoria del tiempo en fase de contacto continuo ( $T_{i-st-rc}$ ) y el tiempo en la fase de punto de contacto ( $T_{i-st-pc}$ ), y se puede derivar como

$$T_{i-st} = T_{i-st-rc} + T_{i-st-pc} = \frac{r_w(\theta_i - \tan(\theta_i + \theta_0)) + h\tan(\theta_i + \theta_0)}{v/\Delta_i(\delta)} \Big|_{\theta_i = 0, \theta_i = \theta_{td}} \quad (25)$$

$$+ \frac{\sin(\theta_0)r_w(\theta_i - \tan(\theta_i + \theta_0)) + h\tan(\theta_i + \theta_0)}{v/\Delta_i(\delta)} \Big|_{\theta_i = \theta_{lo}, \theta_i = 0} \quad (26)$$

La fase aérea está planeada para posicionar correctamente la pata para el siguiente contacto. Utilizando la ecuación 25, 26 y la definición del factor de trabajo ( $\beta = \frac{T_{st}}{T_i}$ ), el tiempo de duración de la fase aérea es

$$T_{i-sw} = \frac{\Delta_i(\delta) - \beta}{\beta} T_{i-st} \quad (27)$$

como resultado, la velocidad de la pata puede derivarse como

$$\omega_{i-sw} = \frac{\pi + \theta_{td} - \theta_{lo}}{T_{i-st}} \quad (28)$$

De la ecuación 28, el movimiento del mecanismo en su fase aérea se puede expresar como

$$\chi_i = \begin{bmatrix} \omega_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{i-sw} \\ r_{max} \end{bmatrix} \quad (29)$$



## 11.1. Metodología de pruebas

### 11.1.1. Vídeos

Se utilizó una cámara Logitech C920 Pro con captura de vídeo a 30 fps y resolución de 1080p. Se utilizó el software Logitech Capture para poder capturar los vídeos y almacenarlos. La cámara se montó a una altura de 135 mm, una distancia de 200 mm desde la orilla de la plataforma de pruebas y centrada a la misma, esto con el fin de poder captar el movimiento del mecanismo sobre toda la plataforma. Las velocidades a las que puede operar el motor se controlan con un programa en Arduino, y estas varían entre el rango de 1 y 1000. Se realizaron pruebas para velocidades de 200, 400, 600, 800 y 1000, tomando 3 vídeos por cada velocidad, en cada configuración de terreno.



(a) Terreno de arena con agujeros



(b) Terreno plano de tierra



(c) Terreno plano de gravilla

Figura 36: Terrenos utilizados para realizar pruebas

### 11.1.2. Terrenos

Las pruebas a las que se sometieron los mecanismos se realizaron en tres distintos terrenos (Figura 36). Los terrenos utilizados poseen flujos granulares distintos; la gravilla posee un flujo granular menor a los otros dos terrenos gracias al tamaño de los granos (5 mm - 20 mm), la arena de río (tamaño de grano 0.5 mm - 2 mm) presenta un flujo granular que se encuentra entre los otros dos materiales, y la tierra negra (tamaño de grano 0.075 mm - 0.5 mm) posee un flujo granular alto en comparación a los otros dos terrenos.

#### Configuración plana

En esta configuración se acomoda la tierra cada vez que se realiza una prueba, ya que luego de cada prueba se generan cambios en el terreno por el paso de los mecanismos. Para generar nuevamente el terreno deseado para las pruebas se utilizó una pieza de MDF: de 250 mm de largo, igual a la plataforma, por lo que al realizar un barrido de la superficie se obtiene nuevamente una superficie plana.

#### Configuración con agujeros

En esta configuración se realizaron dos agujeros que se encuentran cuentan con una separación igual a la que se encuentra entre los mecanismos una vez montados en la plataforma de montaje, esto con el fin de observar el comportamiento del mecanismo al encontrarse desbalanceado. Los agujeros son generados utilizando una pieza cilíndrica de 8 cm de diámetro, la cual se introduce en el terreno hasta una profundidad de 2 cm y al retirarla se obtiene el agujero. Al igual que con la configuración plana, luego de cada prueba se vuelve a generar una superficie plana y se hacen los agujeros.

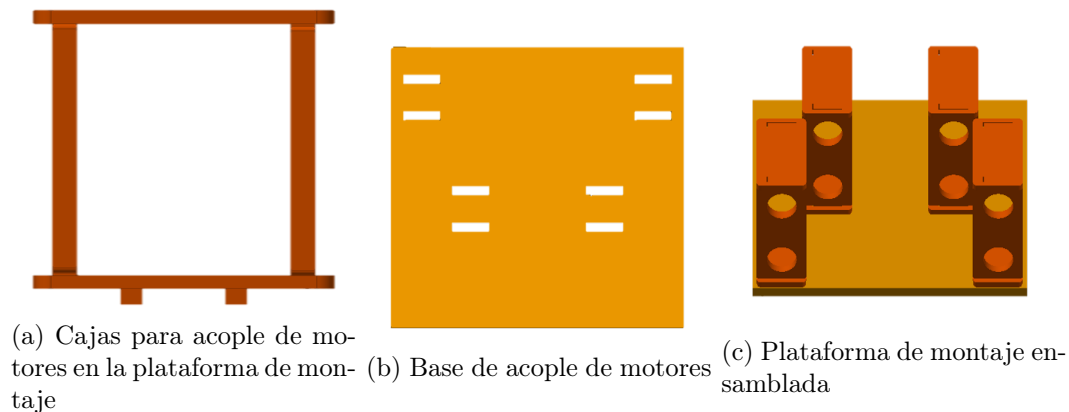


Figura 37: Plataforma de montaje

## Configuración con pendiente

En esta configuración la tierra se coloca en una pendiente de 15 grados y una distancia de 12 cm. De igual manera el terreno se vuelve a generar luego de cada prueba realizada. Para generar la pendiente de una manera similar en todas las pruebas con la cámara de vídeo montada se toma una fotografía para medir el ángulo de inclinación de la pendiente hasta obtener el ángulo deseado, y con una regla que se encuentra montada en la plataforma como referencia de medida se toma la distancia de 12 cm.

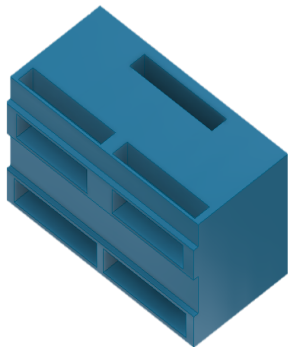
### 11.1.3. Plataformas

#### Plataforma de montaje

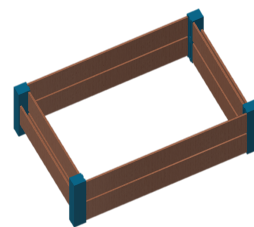
La plataforma de montaje (Figura 37) cuenta con una base de dimensiones 100 mm x 120 mm x 4 mm (Figura 37b) en la cual se encuentran espacios para ensamblar cuatro marcos (Figura 37a) para fijar los motores a la base y tener la distancia entre centros requerida para el juego de los engranes rectos utilizados en el mecanismo híbrido (Figura 37c).

#### Plataforma de pruebas

Las pruebas se realizaron sobre una base rectangular con medidas de 550 mm largo, 350 mm de ancho y 50 mm de profundidad (Figura 38b), sobre la cual se colocaron los materiales para simular los distintos ambientes en los cuales se realizaran las pruebas a los mecanismos. La plataforma cuenta con esquinas impresas en 3D con material PLA que tienen espacios rectangulares de 35 mm x 6.4 mm (espesor del MDF:) para insertar las piezas de MDF: (Figura 38a).



(a) Esquina para ensamble de plataforma de pruebas



(b) Ensamble en Autodesk Inventor de plataforma de pruebas

Figura 38: Plataforma de pruebas

## 11.2. Análisis de videos

Los vídeos se analizaron en el software Kinovea: [33] versión 0.8.27.

### 11.2.1. Acotación de video

Los vídeos a analizar se acotaron dentro de Kinovea: con el fin de tener un área de trabajo de análisis de vídeo con los cuadros (frames) relevantes, ya que al realizar las pruebas se tiene un tiempo al inicio y final del vídeo en el cual el mecanismo se encuentra estático. El área de trabajo deseada se obtuvo con la herramienta de Working Zone (Figura 39), la cual permite establecer el cuadro inicial y final, los cuales se encontraron observando cuadro por cuadro el momento en el cual inicia y finaliza el movimiento del mecanismo y agregando a estos límites cinco cuadros.

### 11.2.2. Unidades

En los vídeos se utiliza un objeto con medidas conocidas para calibrar las mediciones realizadas en el software, en este caso se utiliza una regla pegada a la plataforma de pruebas para poder calibrar las mediciones en Kinovea: Se utiliza una línea de 1 cm para la calibración (Figura 40). El software realiza el análisis y genera los datos en unidades acorde al sistema internacional de medidas (SI), a excepción de desplazamiento horizontal y vertical, los cuales se presentan en cm.

### 11.2.3. Calibración de cámara

La calibración de la cámara utilizada se realizó con el software AgiLens (Figura 41a), el cual despliega en el monitor de la computadora un tablero de ajedrez para tomar foto-



Figura 39: Herramienta Working Zone de Kinovea: para acotar vídeos

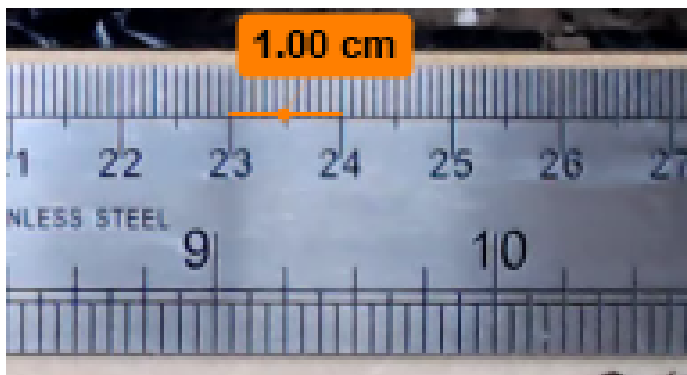
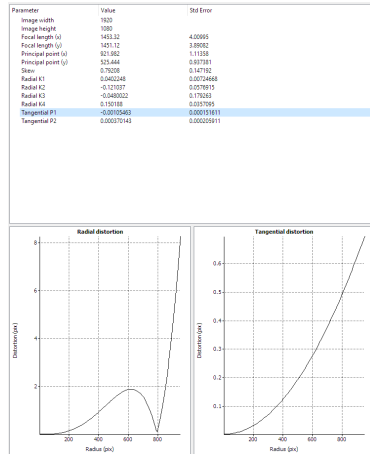
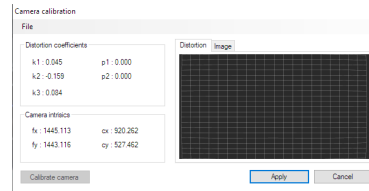


Figura 40: Línea de 1 cm para calibración de mediciones



(a) Coeficientes calculados en AgiLens con imágenes capturadas del tablero de ajedrez



(b) Calibración de cámara en Kinovea: con parámetros calculados en Agilens

Figura 41: Proceso de calibración de cámara

grafías del mismo desde distintos ángulos con el fin de que el software pueda determinar distintos parámetros de la cámara, que luego son exportados a un archivo CSV que posee los parámetros para calibrar el vídeo a analizar en Kinovea: (Figura 41b).

#### 11.2.4. Rastreo de trayectoria

En Kinovea: se genera la trayectoria del centro del mecanismo y distintas mediciones de la misma tales como velocidad, desplazamiento y aceleración, respecto a un punto de referencia seleccionado. En el mecanismo Rimless Wheel se tienen dos colores diferentes entre el engrane y el mecanismo, por lo que se utilizó el centro del engrane como punto de referencia para generar la trayectoria, el cual se coloca por medio de la herramienta Configure Trajectory Tool en Kinovea: (Figura 42).

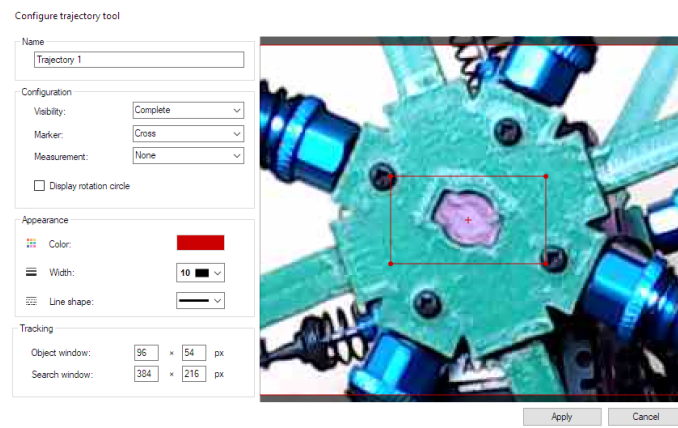


Figura 42: Herramienta para configuración de punto de referencia para generación de trayectoria en Kinovea

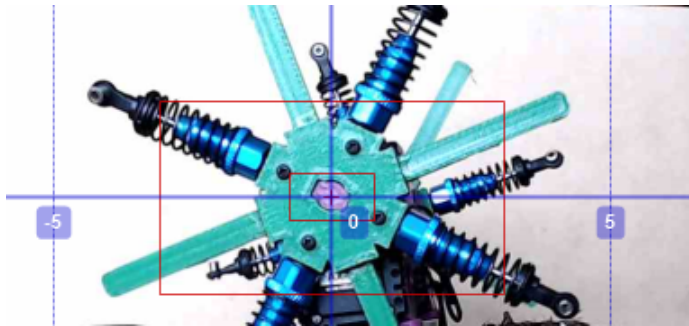


Figura 43: Origen del plano cartesiano ubicado en la misma posición del punto de referencia

### 11.2.5. Plano cartesiano

El plano cartesiano puede ser ubicado en cualquier posición del vídeo dentro de Kinovea:. Se colocó el origen del plano cartesiano de tal manera que este se encontrará en la misma posición que el punto de referencia para generar la trayectoria y mediciones (Figura 43), con el fin de obtener mediciones de desplazamiento vertical a partir del punto de inicio del centro utilizado como referencia.

## 11.3. Análisis de datos

### 11.3.1. Obtención de datos

La obtención de datos se realizó desde Kinovea:, que permite exportar los datos de velocidad, aceleración y desplazamiento vertical y horizontal de la trayectoria generada por el punto de referencia seleccionado. Estos datos se exportan a un archivo csv que guarda en una columna el tiempo y en otra los datos.

### 11.3.2. Normalización de datos

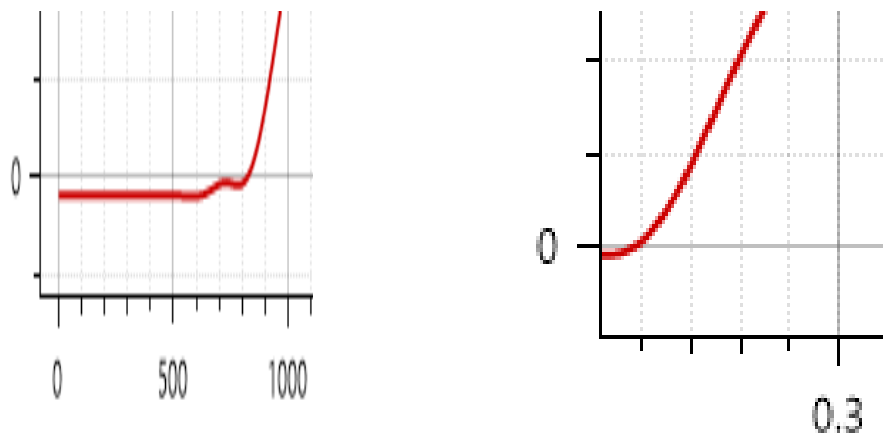
Kinovea: permite exportar los datos obtenidos con el tiempo real del vídeo tomado, con el tiempo relativo al utilizar la herramienta working zone para acotar el vídeo, y el tiempo normalizado que toma los datos y distribuye los mismos en un intervalo desde 0 a 1. Al utilizar el tiempo como real o relativo se obtiene un retraso en el inicio de la gráfica de datos dado que el análisis de la trayectoria se inicia al iniciar el vídeo, no al iniciar el movimiento del punto de referencia (Figura 44a). Al utilizar una escala de tiempo normalizada se elimina este retraso (Figura 44b). Al normalizar los datos, la escala de tiempo permite realizar una comparación de velocidad, aceleración y desplazamiento del punto de referencia a distintas velocidades de motor ya que en el rango de 0 a 1 del tiempo normalizado se pierde la dimensional del tiempo y se puede interpretar como las variaciones de velocidad, aceleración y desplazamiento en distintos puntos a lo largo de la trayectoria realizada (desplazamiento horizontal).

### 11.3.3. Análisis en Matlab

En el software Matlab: se realizó el análisis de datos importando los archivos csv obtenidos de Kinovea:; interpolando los datos en el mismo intervalo entre 0 y 1, obteniendo la media y desviación estándar de cada corrida para la velocidad, aceleración y desplazamiento vertical, y realizando un promedio de las tres corridas para cada característica medida tener una gráfica que representa el comportamiento en cada terreno.

#### Interpolación

Los archivos csv obtenidos de Kinovea: con el tiempo normalizado no presentan el mismo número de datos muestreados, y el tiempo no se encuentra igualmente espaciado. Para poder tener el mismo número de datos muestreados se utilizó la función interpolación en la cual se introduce un vector con los puntos de muestra (tiempo normalizado), un vector con valores de muestra (datos de velocidad, aceleración y desplazamiento vertical), un vector de puntos de consulta (valores entre 0 y 1 con un paso de 0.001) y el método de interpolación deseado, el cual en este caso fue una interpolación cúbica por tramos con conservación de forma, el cual utiliza un polinomio cúbicos por partes  $P(x)$  que deben cumplir con las propiedades de: (1) para cada sub-intervalo  $x_k \leq x \leq x_{k+1}$  el polinomio  $P(x)$  es un polinomio cúbico de interpolación de Hermite para los puntos de datos dados con derivadas específicas (pendientes) en los puntos de interpolación. (2)  $P(x)$  interpola  $y$ ; es decir  $P(x_j) = y_j$ , y la primera derivada  $\frac{dP}{dx}$  es continua. La segunda derivada  $\frac{d^2P}{dx^2}$  es probablemente no continua, por lo que saltos en  $x_j$  son posibles. (3) El interpolante cúbico  $P(x)$  preserva su forma. Las pendientes en  $x_j$  se escogen de tal manera que  $P(x)$  preserva la forma de los datos y respeta la monotonicidad. Por lo tanto, en intervalos donde los datos monótonos, también lo es  $P(x)$ , y en puntos en los cuales los datos tienen un máximo local, también  $P(x)$



(a) Retraso en inicio de gráfica de datos con tiempo real o relativo (b) Eliminación de retraso en inicio de gráfica de datos con tiempo normalizado

Figura 44: Retraso en gráfica de datos entre seleccionar un tiempo real o relativo y tiempo normalizado

## 11.4. Resultados

### 11.4.1. Caracterización matemática

Anteriormente se describió la caracterización matemática para ambos mecanismo. Como se muestra mas adelante en este capítulo, el mecanismo híbrido abierto presenta fallas al realizar las pruebas, por lo que no se tiene una gráfica de la trayectoria generada por el centro del mecanismo de manera experimental.

El mecanismo rimless wheel presenta una trayectoria de su centro geométrico de manera experimental acorde a la caracterización matemática realizada, en la Figura 45 se muestra la gráfica de de la trayectoria de un paso del centro geométrico del mecanismo rimless wheel obtenida de de un programa en matlab (Anexos) que gráfica las ecuaciones matemáticas encontradas. Esta gráfica presenta el comportamiento sobre una superficie plana. Durante este capitulo se muestra la trayectoria generada por este mecanismo de manera experimental, la cual es similar a la trayectoria experimental obtenida. Es notable una diferencia entre ambas trayectorias cuando cambia de una pata a otra ya que el terreno no es plano, y en cada contacto entre la pata y el suelo, este se hunde.

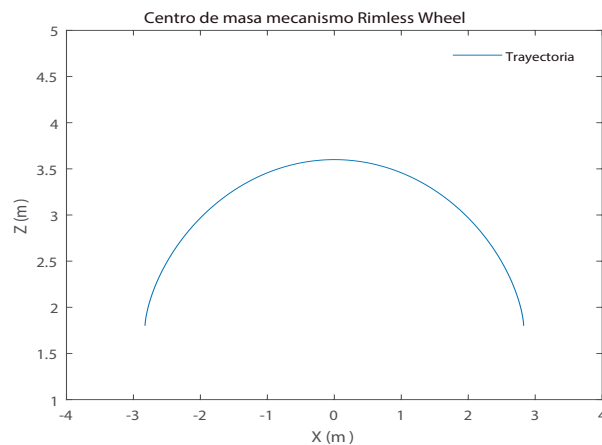
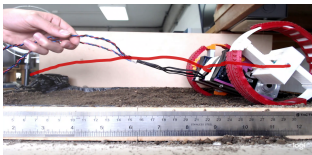


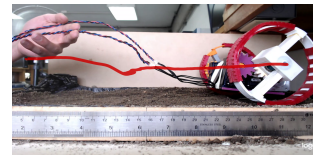
Figura 45: Gráfica del movimiento teórico del mecanismo rimless wheel



(a) Prueba 1 velocidad de motor 400

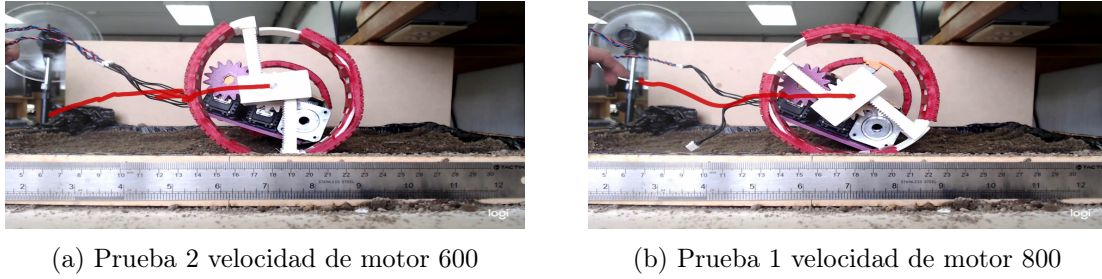


(b) Prueba 2 velocidad de motor 400



(c) Prueba 1 velocidad de motor 600

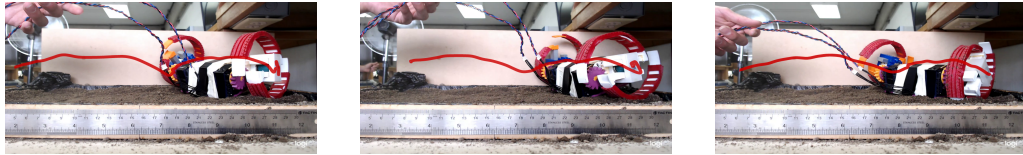
Figura 46: Cierre de mecanismo híbrido abierto en pruebas



(a) Prueba 2 velocidad de motor 600

(b) Prueba 1 velocidad de motor 800

Figura 47: Cierre de mecanismo híbrido abierto en pruebas



(a) Prueba 2 velocidad de Motor 800

(b) Prueba 3 velocidad de motor 800

(c) Prueba 2 velocidad de motor 1000

Figura 48: Llanta trabada de mecanismo híbrido abierto en pruebas

### 11.4.2. Casos especiales

#### Mecanismo híbrido abierto

De las tres pruebas realizadas al mecanismo híbrido abierto en arena plana se obtuvieron los datos que se encuentran en la Tabla 3 luego de analizar los vídeos en Kinovea: para cada velocidad de motor. En las figuras 46, 47, 48 y 49, se muestran los distintos escenarios que se presentaron al realizar las pruebas para este mecanismo con las distintas velocidades de motor.

En la prueba 2 con velocidad de motor 200 (Figura 49) el tiempo en el Cuadro 3 difiere de las otras dos pruebas con la misma velocidad de motor por una diferencia de 5 segundos, debido a que el mecanismo no pudo dar un segundo paso ya que el motor no brindó el torque necesario para salir de la posición en la que se encontraba.

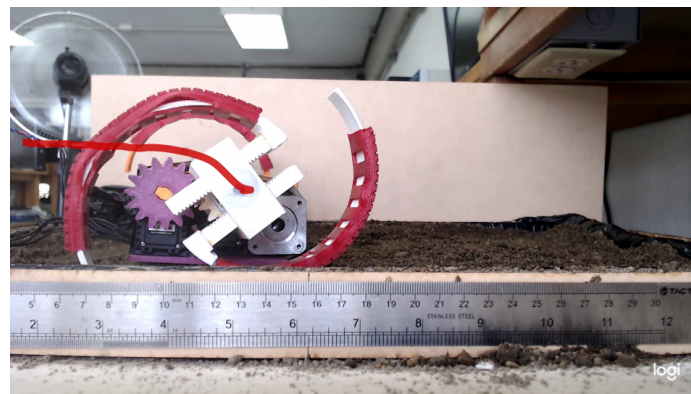


Figura 49: Mecanismo híbrido luego de un paso prueba 2 velocidad de motor 200

Mecanismo híbrido abierto en arena

Velocidad motor	Datos	Híbrido abierto		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
		<b>Desplazamiento vertical</b>		
200	Media (cm)	0.5510	-0.3689	-0.9910
	Desviación Estándar (cm)	0.3966	0.5808	0.6472
400	Media (cm)	0.8789	1.1215	1.5351
	Desviación Estándar (cm)	0.3715	0.4669	0.7698
600	Media (cm)	-0.9664	1.1906	1.3566
	Desviación Estándar (cm)	0.4447	0.4605	0.5604
800	Media (cm)	-0.9990	0.2423	-0.1639
	Desviación Estándar (cm)	0.3352	0.6048	0.4218
1000	Media (cm)	0.4137	0.5573	1.8995
	Desviación Estándar (cm)	0.5651	0.5488	1.0776
		<b>Velocidad</b>		
200	Media (m/s)	0.0206	0.0645	0.0307
	Desviación Estándar (m/s)	0.0197	0.0597	0.0489
400	Media (m/s)	0.0462	0.0363	0.0690
	Desviación Estándar (m/s)	0.0647	0.0529	0.0633
600	Media (m/s)	0.0779	0.0466	0.1029
	Desviación Estándar (m/s)	0.0798	0.0416	0.0800
800	Media (m/s)	0.0580	0.1372	0.1276
	Desviación Estándar (m/s)	0.0707	0.1055	0.0933
1000	Media (m/s)	0.1429	0.1621	0.1915
	Desviación Estándar (m/s)	0.0900	0.0996	0.1306
		<b>Aceleración</b>		
200	Media (m/s <sup>2</sup> )	-0.0031	-0.0402	-0.0007
	Desviación Estándar (m/s <sup>2</sup> )	0.1772	0.7462	0.4664
400	Media (m/s <sup>2</sup> )	0.0058	0.0044	-0.0068
	Desviación Estándar (m/s <sup>2</sup> )	0.4599	0.4404	0.6351
600	Media (m/s <sup>2</sup> )	-0.0045	0.0305	0.0247
	Desviación Estándar (m/s <sup>2</sup> )	0.6909	0.4762	0.7721
800	Media (m/s <sup>2</sup> )	0.0034	-0.0143	0.0312
	Desviación Estándar (m/s <sup>2</sup> )	0.7630	0.8590	0.9268
1000	Media (m/s <sup>2</sup> )	0.0312	0.0514	0.2816
	Desviación Estándar (m/s <sup>2</sup> )	0.7221	1.0701	0.9032
		<b>Tiempo</b>		
200	Tiempo (seg)	3.97	1.53	8.33
400	Tiempo (seg)	5.73	5.43	3.87
600	Tiempo (seg)	3.30	3.30	2.87
800	Tiempo (seg)	2.13	1.97	1.83
1000	Tiempo (seg)	1.70	1.50	1.33

Cuadro 3: Tabla de datos para mecanismo híbrido abierto en arena

En las pruebas 1 y 2 con velocidad de motor 400, prueba 1 y 2 con velocidad de motor 600, y prueba 1 con velocidad de motor 800 (Figuras 46a, 46b, 46c, 47a, 47b respectivamente), el mecanismo abierto se cerró durante la prueba. La media de la velocidad en las pruebas 1 y 2 con velocidad de motor 400 se encuentra cercanas, y la diferencia con la prueba 3 es de 0.02 m/s, debido al cierre del mecanismo. La desviación estándar de la aceleración para las

pruebas con velocidad de motor 400 para las pruebas 1 y 2 son similares, y la diferencia con la prueba 3 es cercana a  $0.2 \text{ m/s}^2$ , debido a que al cerrarse el mecanismo no presenta picos altos en la aceleración debidos al pasar del punto de contacto al final de una pata al punto de contacto con la parte circular de la otra pata.

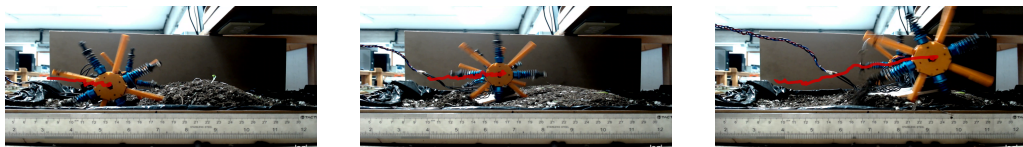
En la media de velocidad de las pruebas 2 y 3 con velocidad de motor 800 hay una diferencia de  $0.01 \text{ m/s}$ , y entre éstas y la media de la velocidad de la prueba 1 hay una diferencia de  $0.06 \text{ m/s}$ , siendo la media de la prueba 1 la menor, debido a que la llanta que se encuentra al fondo de la grabación no continuó con su comportamiento esperado, lo que provocó que la llanta que se está rastreando gire sobre un punto fijo (la otra llanta) generando un cambio en la velocidad.

Por las situaciones descritas en el terreno plano, no se realizaron pruebas en las otras configuraciones de los tres terrenos. En el Quattroped y RHex se observa que estos robots poseen cuatro y seis patas respectivamente, y al encontrarse en casos como los descritos anteriormente, tienen una mejor estabilidad.

## Pendiente de tierra

Se realizaron pruebas en pendiente de tierra para cada velocidad de motor para ambos mecanismos, y en ninguno de los casos se logró completar el circuito por situaciones como las que se presentan en las figuras 50, 51, 52 y 53.

En el Cuadro 4 se presenta la distancia horizontal máxima alcanzada por los mecanismos. Las distancias para las pruebas de ambos mecanismos mayores a 7 cm son datos atípicos, ya que el desplazamiento horizontal máximo se alcanzó cuando la llanta que no se está analizando se estanca en un punto y la llanta que se está analizando gira sobre un punto fijo, como se observa en las figuras 52 y 53 para el mecanismo rimless wheel, y la Figura 51 para el mecanismo híbrido cerrado.



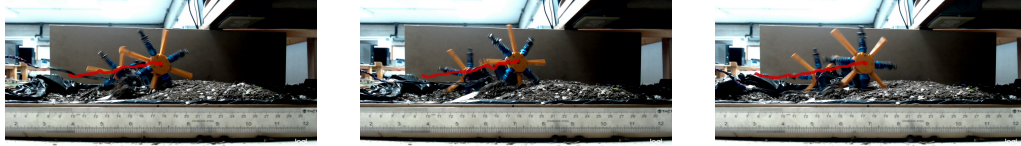
(a) Rimless Wheel prueba 1 velocidad de motor 400 (b) Rimless Wheel prueba 1 velocidad de motor 600 (c) Rimless Wheel prueba 2 velocidad de motor 600

Figura 50: Agujero creado por el mecanismo rimless wheel en distintas pruebas



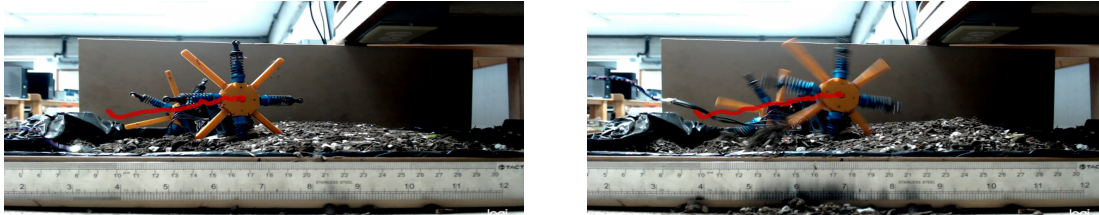
(a) Híbrido cerrado prueba 1 velocidad de motor 400 (b) Híbrido cerrado prueba 1 velocidad de motor 800 (c) Híbrido cerrado prueba 1 velocidad de motor 1000

Figura 51: Llanta trabada de mecanismo híbrido cerrado en pruebas



(a) Rimless wheel prueba 1 velocidad de motor 800 (b) Rimless wheel prueba 2 velocidad de motor 800 (c) Rimless wheel prueba 3 velocidad de motor 800

Figura 52: Llanta trabada de mecanismo rimless wheel en pruebas (1)



(a) Rimless Wheel prueba 2 velocidad de motor 1000 (b) Rimless Wheel prueba 3 velocidad de motor 1000

Figura 53: Llanta trabada de mecanismo rimless wheel en pruebas (2)

Velocidad motor	Dato estadístico	Desplazamiento horizontal pendiente					
		Rimless Wheel			Híbrido cerrado		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
		Tierra					
200	Desplazamiento horizontal (cm)	4.23	3.72	6.11	7.39	8.56	4.65
400	Desplazamiento horizontal (cm)	7.59	6.33	4.17	11.29	7.16	6.25
600	Desplazamiento horizontal (cm)	9.47	16.12	4.81	8.65	5.32	3.15
800	Desplazamiento horizontal (cm)	8.83	8.58	10.01	14.47	9.35	12.54
1000	Desplazamiento horizontal (cm)	7.53	7.90	8.18	11.19	5.65	10.45

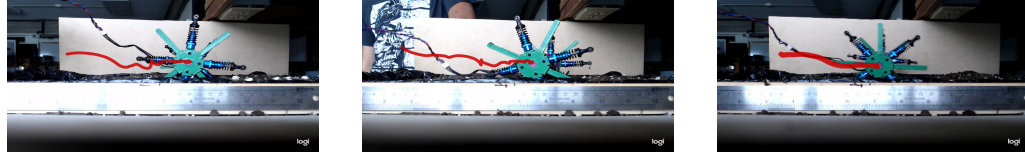
Cuadro 4: Tabla de desplazamiento vertical en pendiente de tierra

Por estas situaciones antes descritas en pendiente de tierra y para lograr hacer una comparación de mecanismos en distintas situaciones en distintos terrenos se agrego una capa de 2 cm de gravilla sobre la pendiente de tierra, ya que esto brinda una mayor tracción a los mecanismos, y por debajo de la capa de gravilla la tierra seguirá presentando su comportamiento esperado.

### Arena y tierra con agujeros

En las figuras 54, 55, 56, 57 y 58 presentan imágenes de los casos en los cuales el mecanismo rimless wheel y el mecanismo híbrido cerrado no lograron completar la configuración de agujeros.

En la Figura 54 se muestran los tres casos en los cuales el mecanismo rimless wheel no pudo salir del agujero en tierra con una velocidad de motor 1000. Esto se debe a que por la alta velocidad de giro del motor y el flujo granular es mayor en tierra que en los otros dos terrenos, por lo que el mecanismo no logra un punto de apoyo para impulsarse a sí mismo y salir del agujero. Este es el único caso en el cual el mecanismo rimless wheel no logró completar esta configuración.

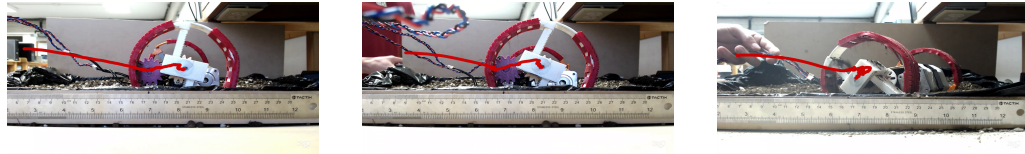


(a) Prueba 1

(b) Prueba 2

(c) Prueba 3

Figura 54: Pruebas de mecanismo rimless wheel en agujeros de tierra con velocidad de motor 1000

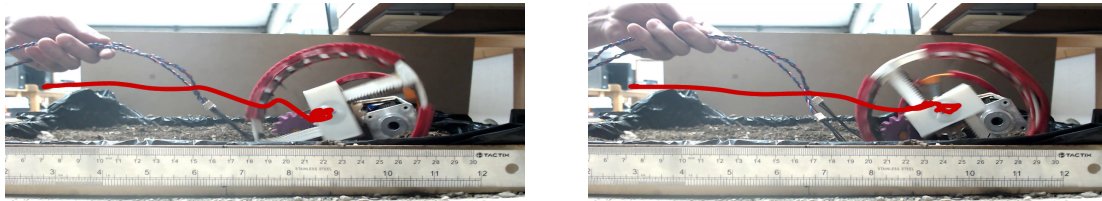


(a) Prueba velocidad de motor 200

(b) Prueba velocidad de motor 400

(c) Prueba velocidad de motor 600

Figura 55: Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de tierra (1)



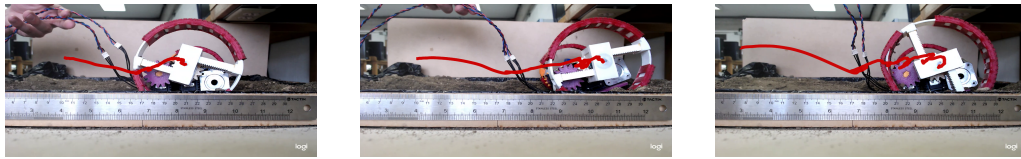
(a) Prueba velocidad de motor 800

(b) Prueba velocidad de motor 1000

Figura 56: Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de tierra (2)

El mecanismo híbrido cerrado no logró completar la configuración con agujeros en los terrenos de tierra (figuras 55 y 56) y arena (figuras 57 y 58) con ninguna de las velocidades de motor. En las figuras para el mecanismo híbrido cerrado se presenta una prueba por cada velocidad de motor.

El mecanismo híbrido logró completar esta configuración en gravilla para todas las velocidades de motor. Los terrenos de arena y tierra presentan un flujo granular más alto en comparación a la gravilla. Al tratar de salir de los agujeros de tierra y arena, no tenía un punto de apoyo fijo como lo tiene en gravilla, por lo que resbalaba cada vez que encontraba un punto de apoyo y deslizaba, lo cual permitió que el desplazamiento del mecanismo en el terreno cada vez que hacía contacto con el mismo. El mecanismo rimless wheel presentó un comportamiento similar a altas velocidades de motor (800 y 1000). En arena y tierra se creaban distintos puntos de apoyo dado que estos materiales poseen un flujo granular mayor a la arena, como se mencionó anteriormente, pero a diferencia del mecanismo híbrido cerrado, que tiene un punto de contacto semi continuo, el mecanismo rimless wheel posee distintos puntos de contacto, lo que le permite un punto de apoyo en periodos más cortos de tiempo.



(a) Prueba velocidad de motor 200 (b) Prueba velocidad de motor 400 (c) Prueba velocidad de motor 600

Figura 57: Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de arena (1)



(a) Prueba velocidad de motor 800 (b) Prueba velocidad de motor 1000

Figura 58: Pruebas de mecanismo híbrido cerrado en agujeros de arena (2)

### 11.4.3. Terreno plano

En el Cuadro 5 se presenta el promedio de los tiempos correspondientes a cada una de las tres pruebas realizadas en cada uno de los terrenos con configuración plana. En el cuadro 6 en el cual se presenta el promedio de la media y desviación estándar para las pruebas en configuración plana en los terrenos

Para los terrenos de tierra y gravilla el mecanismo híbrido cerrado presenta un menor tiempo en completar el circuito para todas las velocidades de motor; al igual que en gravilla. En arena el mecanismo rimless wheel presenta un menor tiempo y desviación estándar de la velocidad, y una media de velocidad mayor con una velocidad de motor 200; y para la velocidad de motor 400 el tiempo es igual (con 2 cifras significativas), la media de la velocidad presenta una diferencia absoluta de 0.0030 m/s y la desviación estándar presenta una diferencia absoluta de 0.0172 m/s.

Para el mecanismo rimless wheel al comparar la velocidad de motor 800 y 600 en tierra se presenta un tiempo mayor en completar el circuito, una diferencia de media de velocidad de 0.0014 m/s y una desviación estándar de -0.0011 m/s. Al comparar la velocidad de motor 1000 y 800 en arena se presenta un tiempo mayor en completar el circuito, una diferencia de media de velocidad de -0.0137 m/s y una desviación estándar de 0.0045 m/s. El mecanismo híbrido cerrado no presenta en ningún caso un tiempo menor al aumentar la velocidad de motor.

Por velocidades de motor, en el mecanismo rimless wheel para todas las velocidades, exceptuando 1000, se tiene el menor tiempo en completar el circuito en arena, y con la velocidad de motor 1000 se tiene el menor tiempo en gravilla. En el mecanismo híbrido cerrado, para todas las velocidades, exceptuando 100, se tiene el menor tiempo en completar el circuito en gravilla, y para la velocidad de motor 1000 el menor tiempo es en tierra.

<b>Tiempo terreno plano</b>			
<b>Velocidad motor</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Rimless Wheel</b>	<b>Híbrido cerrado</b>
<b>Tierra</b>			
<b>200</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	8.47	7.49
<b>400</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	3.91	3.58
<b>600</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	2.88	2.13
<b>800</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	2.99	1.48
<b>1000</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	2.19	1.22
<b>Gravilla</b>			
<b>200</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	7.85	6.79
<b>400</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	3.41	3.14
<b>600</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	2.53	1.69
<b>800</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	1.63	1.35
<b>1000</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	1.51	1.32
<b>Arena</b>			
<b>200</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	7.12	7.70
<b>400</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	3.23	3.23
<b>600</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	2.21	2.01
<b>800</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	1.54	1.52
<b>1000</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	1.71	1.26

Cuadro 5: Tabla de tiempo en completar la configuración plana para cada terreno

En los tres terrenos, el tiempo mínimo para completar el circuito lo logra el mecanismo híbrido cerrado con una velocidad de motor 1000 para los tres terrenos (velocidad media de 0.1884 m/s para tierra, 0.1759 m/s para gravilla y 0.2082 m/s para arena). El mecanismo rimless wheel lo logra con una velocidad de motor 1000 en tierra y gravilla (velocidad media de 0.1062 m/s y 0.1869 m/s respectivamente), y con una velocidad de motor 800 en arena (velocidad media de 0.1465 m/s).

La diferencia entre el mayor tiempo para ambos mecanismos (velocidad de motor 200 para los tres terrenos) en completar el circuito en tierra es de 0.98 segundos con un menor tiempo en el mecanismo híbrido cerrado (diferencia de velocidad media 0.0059 m/s y diferencia de desviación estándar 0.0238 m/s), en gravilla es de 1.06 segundos con un menor tiempo en el mecanismo híbrido cerrado (diferencia de velocidad media 0.0020 m/s y diferencia de desviación estándar 0.0110 m/s) y en arena es de 0.58 segundos con un menor tiempo en el mecanismo rimless wheel (diferencia de velocidad media 0.0040 m/s y diferencia de desviación estándar -0.0044 m/s). La diferencia entre el menor tiempo para ambos mecanismos en completar el circuito en tierra es de 0.97 segundos, en gravilla es de 0.19 segundos y en arena es de 0.28 segundos (velocidad de motor 800 con el mecanismo rimless wheel y velocidad de motor 1000 con el mecanismo híbrido cerrado), en los tres casos el mecanismo híbrido cerrado presentan un menor tiempo.

Para todas las velocidades de motor el mecanismo híbrido cerrado presenta una media de la velocidad mayor al mecanismo rimless wheel en tierra, en gravilla para velocidades de

motor 200 y 600, y en arena para velocidades de motor 400, 600, 800 y 1000. La diferencia máxima entre el mecanismo híbrido cerrado y el mecanismo rimless wheel de la media de las velocidades es 0.0822 m/s a una velocidad de motor 1000 en tierra, y la mínima de 0.0020 m/s a una velocidad de motor 200 en gravilla. El mecanismo rimless wheel presenta una media de velocidad mayor en gravilla con velocidades de motor 800 y 1000.

En el Cuadro 7 se presenta el promedio del desplazamiento vertical correspondientes a cada una de las tres pruebas realizadas en cada uno de los terrenos con configuración plana, así como la desviación estándar. Para el mecanismo rimless wheel la media del desplazamiento vertical es negativa para la velocidad de motor 1000 en arena y en tierra, y

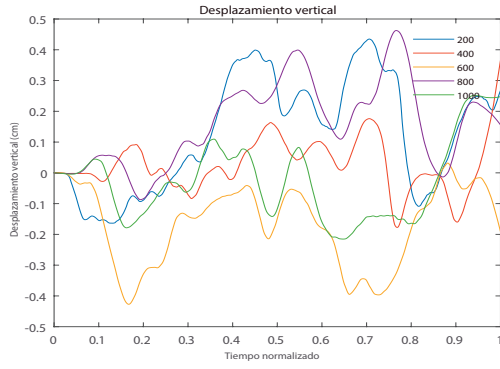
<b>Velocidad terreno plano</b>			
<b>Velocidad motor</b>	<b>Dato estadístico</b>	<b>Rimless Wheel</b>	<b>Híbrido cerrado</b>
<b>Tierra</b>			
<b>200</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0296	0.0355
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0150	0.0388
<b>400</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0620	0.0724
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0393	0.0555
<b>600</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0836	0.1149
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0457	0.0777
<b>800</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0850	0.1600
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0446	0.0883
<b>1000</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1062	0.1884
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0693	0.0979
<b>Gravilla</b>			
<b>200</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0300	0.0320
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0204	0.0314
<b>400</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0730	0.0675
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0289	0.0628
<b>600</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1047	0.1096
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0491	0.0649
<b>800</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1556	0.1471
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0562	0.0912
<b>1000</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1869	0.1759
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0886	0.0813
<b>Arena</b>			
<b>200</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0352	0.0312
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0182	0.0226
<b>400</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.0774	0.0804
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0355	0.0527
<b>600</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1192	0.1293
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0577	0.0750
<b>800</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1465	0.1711
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0645	0.0797
<b>1000</b>	<b>Media (m/s)</b>	0.1328	0.2082
	<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0.0690	0.0863

Cuadro 6: Tabla de media y desviación estándar de la velocidad en configuración plana para cada terreno

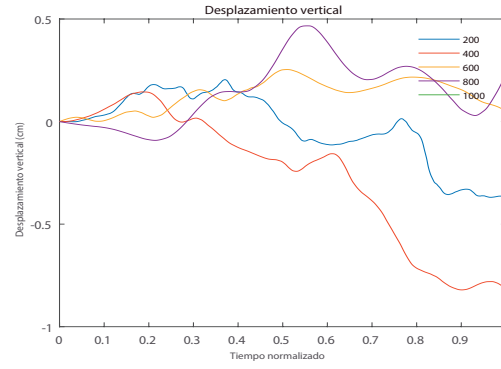
es positiva en gravilla. En las figuras 59, 60 y 61 se graficó el desplazamiento vertical de ambos mecanismos en los terrenos de tierra, gravilla y arena respectivamente. En las gráficas del mecanismo rimless wheel se observa que en tierra, para las velocidades de motor 200 y 800 el desplazamiento vertical se mantuvo sobre el eje horizontal (desplazamiento positivo) durante la mayor parte del recorrido; y la velocidad de motor 600 presenta un desplazamiento vertical negativo durante la mayor parte del recorrido. Para el mecanismo híbrido cerrado las velocidades de motor 200 y 400 presentan un desplazamiento vertical negativo y un comportamiento decreciente. Las velocidades de motor 600, 800 y 1000 presentan un

<b>Desplazamiento vertical terreno plano</b>			
<b>Velocidad motor</b>	<b>Dato estadístico</b>	<b>Rimless Wheel</b>	<b>Híbrido cerrado</b>
		<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 1</b>
<b>Tierra</b>			
<b>200</b>	<b>Media (cm)</b>	0.1257	-0.0310
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2688	0.2034
<b>400</b>	<b>Media (cm)</b>	0.0253	-0.2618
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2527	0.3361
<b>600</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.1660	0.1294
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2261	0.2290
<b>800</b>	<b>Media (cm)</b>	0.1574	0.1404
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2119	0.2550
<b>1000</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.0283	0.1664
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2269	0.2742
<b>Gravilla</b>			
<b>200</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.7079	-0.0976
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3520	0.1312
<b>400</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.4461	0.2839
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3397	0.2491
<b>600</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.3638	0.2220
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3041	0.2194
<b>800</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.1731	0.3116
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3282	0.2364
<b>1000</b>	<b>Media (cm)</b>	0.1481	0.3863
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2291	0.4057
<b>Arena</b>			
<b>200</b>	<b>Media (cm)</b>	0.0847	0.0515
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3087	0.2587
<b>400</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.1532	-0.1426
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3416	0.3040
<b>600</b>	<b>Media (cm)</b>	0.0477	0.0918
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.3105	0.2875
<b>800</b>	<b>Media (cm)</b>	0.1106	-0.0060
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2432	0.2478
<b>1000</b>	<b>Media (cm)</b>	-0.0431	-0.0444
	<b>Desviación Estándar (cm)</b>	0.2396	0.1505

Cuadro 7: Tabla de media y desviación estándar del desplazamiento vertical en configuración plana para cada terreno

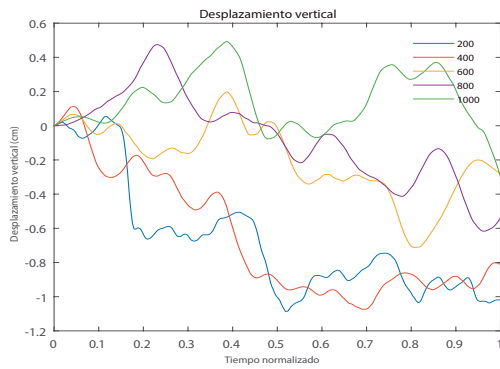


(a) Mecanismo Rimless Wheel

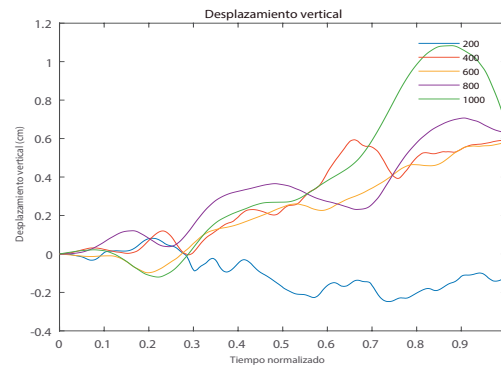


(b) Mecanismo híbrido cerrado

Figura 59: Gráfica de desplazamiento vertical en tierra con configuración plana con cinco velocidades de motor

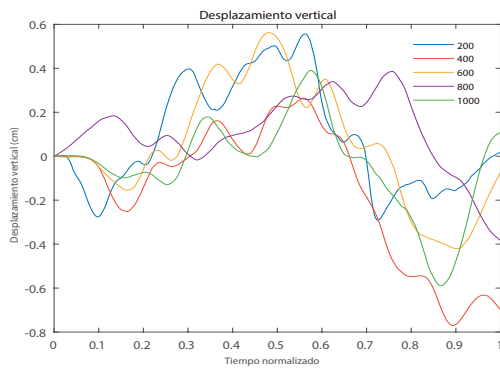


(a) Mecanismo Rimless Wheel

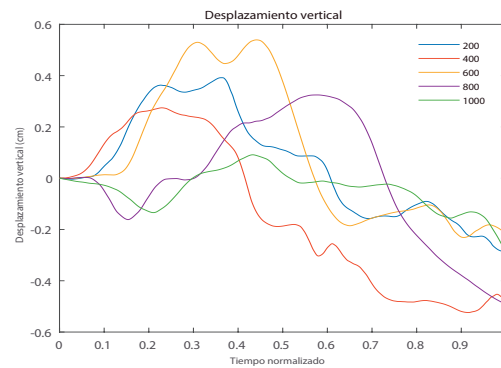


(b) Mecanismo híbrido cerrado

Figura 60: Gráfica de desplazamiento vertical en gravilla con configuración plana con cinco velocidades de motor



(a) Mecanismo Rimless Wheel



(b) Mecanismo híbrido cerrado

Figura 61: Gráfica de desplazamiento vertical en arena con configuración plana con cinco velocidades de motor

desplazamiento vertical positivo durante la mayor parte del recorrido.

En gravilla el mecanismo rimless wheel con una velocidad de motor 1000 presenta un desplazamiento vertical positivo durante todo el recorrido, y no decae como las otras velocidades de motor, notorio en las velocidades de motor 200 (media de -0.7079 cm) y 400 (-0.4461 cm). Con estas dos velocidades de motor se tienen los dos puntos más bajos de desplazamiento vertical en los 3 terrenos con todas las velocidades de motor, que es menor a 1cm. En las velocidades de motor 200 y 400 se observan pequeñas oscilaciones del desplazamiento vertical en periodos cortos (notorio en la velocidad de motor 200), esto se debe a que a estas velocidades cada pata permanece un mayor periodo de tiempo apoyada sobre un grano, el cual sufre una perturbación al tener contacto con la pata. El mecanismo híbrido cerrado presenta un desplazamiento vertical negativo con una velocidad de motor 200, y para las otras velocidades presenta un comportamiento similar (creciente).

En arena se observa un comportamiento similar para todas las velocidades de motor en el mecanismo rimless wheel, en la primera mitad del recorrido se observa un desplazamiento vertical creciente, y en la segunda mitad se observa un desplazamiento vertical decreciente; al igual que para el mecanismo híbrido cerrado. Con la velocidad de motor 800 se observan transiciones suaves cada vez que la pata hace contacto, y se debe a que la arena húmeda posee un menor flujo granular y esto permite que cada contacto de la pata con el suelo no presente un desplazamiento vertical negativo.

#### 11.4.4. Terreno con pendiente

En el Cuadro 8 se encuentran los tiempos en completar la pendiente en cada terreno para cada mecanismo variando las velocidades de motor, y en el Cuadro 9 se encuentran la media y desviación estándar de la velocidad. Como se menciona anteriormente, ya que ninguno de los dos mecanismos fue capaz de completar la pendiente en tierra, se agrego una capa de gravilla al mismo para poder realizar la comparación de tiempo.

Tiempo terreno con pendiente							
Velocidad motor	Dato estadístico	Rimless Wheel			Híbrido cerrado		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tierra con gravilla							
200	Tiempo (seg)	12.30	9.40	12.20	9.73	6.13	7.00
400	Tiempo (seg)	3.47	3.80	5.43	3.80	3.27	2.97
600	Tiempo (seg)	2.80	2.57	3.07	2.13	1.80	1.70
800	Tiempo (seg)	2.27	2.67	2.20	1.33	1.40	1.60
1000	Tiempo (seg)	1.37	2.50	4.03	1.37	1.17	1.17
Gravilla							
200	Tiempo (seg)	26.67	12.23	9.30	7.37	8.64	9.44
400	Tiempo (seg)	6.23	4.80	5.23	3.03	3.41	2.97
600	Tiempo (seg)	3.73	3.20	3.33	2.20	2.36	1.96
800	Tiempo (seg)	2.70	2.90	2.60	1.53	1.68	1.43
1000	Tiempo (seg)	2.03	2.20	1.90	1.10	1.28	1.14
Arena							
200	Tiempo (seg)	7.53	12.63	15.53	6.80	7.37	5.77
400	Tiempo (seg)	2.73	4.40	4.10	2.73	3.90	3.43
600	Tiempo (seg)	3.40	2.70	2.50	2.17	2.17	1.93
800	Tiempo (seg)	1.60	3.27	2.13	1.60	1.60	1.33
1000	Tiempo (seg)	1.97	3.40	3.20	1.33	1.40	1.07

Cuadro 8: Tabla de tiempo en completar la configuración pendiente para cada terreno

Velocidad terreno pendiente							
Velocidad Motor	Dato estadístico	Rimless Wheel			Híbrido cerrado		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Tierra con gravilla</b>							
200	Media (m/s)	0.0164	0.0188	0.0224	0.0205	0.0222	0.0282
	Desviación Estándar (m/s)	0.0122	0.0129	0.0245	0.0302	0.0137	0.0186
400	Media (m/s)	0.0741	0.0685	0.0495	0.0548	0.0754	0.0849
	Desviación Estándar (m/s)	0.0519	0.0520	0.0397	0.0396	0.0484	0.0456
600	Media (m/s)	0.0787	0.0901	0.0841	0.1199	0.1332	0.1414
	Desviación Estándar (m/s)	0.0570	0.0632	0.0602	0.0848	0.0714	0.0943
800	Media (m/s)	0.0983	0.0748	0.1062	0.1573	0.1638	0.1647
	Desviación Estándar (m/s)	0.0684	0.0576	0.0761	0.1016	0.0760	0.0609
1000	Media (m/s)	0.1181	0.0629	0.0418	0.1838	0.2245	0.2073
	Desviación Estándar (m/s)	0.0517	0.0496	0.0492	0.1163	0.0715	0.0960
<b>Gravilla</b>							
200	Media (m/s)	0.0170	0.0209	0.0267	0.0224	0.0212	0.0198
	Desviación Estándar (m/s)	0.0164	0.0179	0.0290	0.0226	0.0296	0.0220
400	Media (m/s)	0.0453	0.0504	0.0602	0.0761	0.0698	0.0775
	Desviación Estándar (m/s)	0.0278	0.0362	0.0541	0.0569	0.0563	0.0602
600	Media (m/s)	0.0676	0.0799	0.0895	0.1124	0.1147	0.1097
	Desviación Estándar (m/s)	0.0526	0.0562	0.0704	0.0536	0.0578	0.0609
800	Media (m/s)	0.0878	0.0955	0.1075	0.1338	0.1298	0.1307
	Desviación Estándar (m/s)	0.0425	0.0722	0.0615	0.0778	0.0899	0.0731
1000	Media (m/s)	0.1351	0.1119	0.1494	0.1831	0.1904	0.1869
	Desviación Estándar (m/s)	0.1159	0.0789	0.1030	0.0799	0.0865	0.0741
<b>Arena</b>							
200	Media (m/s)	0.0172	0.0138	0.0089	0.0321	0.0276	0.0182
	Desviación Estándar (m/s)	0.0136	0.0144	0.0084	0.0403	0.0359	0.0149
400	Media (m/s)	0.0379	0.0555	0.0373	0.0909	0.0658	0.0732
	Desviación Estándar (m/s)	0.0320	0.0522	0.0241	0.0682	0.0715	0.1004
600	Media (m/s)	0.0447	0.0904	0.1024	0.1159	0.1253	0.1243
	Desviación Estándar (m/s)	0.0294	0.0800	0.0715	0.0525	0.0706	0.0583
800	Media (m/s)	0.0779	0.0562	0.1125	0.1589	0.1332	0.1599
	Desviación Estándar (m/s)	0.0578	0.0391	0.0944	0.0808	0.1059	0.0752
1000	Media (m/s)	0.1273	0.0579	0.0833	0.1866	0.1838	0.2329
	Desviación Estándar (m/s)	0.1118	0.0455	0.0925	0.0823	0.1051	0.1144

Cuadro 9: Tabla de media y desviación estándar de la velocidad de tres pruebas realizadas configuración con pendiente para cada terreno

Para la pendiente de tierra con gravilla el mecanismo híbrido cerrado tardó un menor tiempo en completar el circuito para la mayoría de pruebas realizadas. El tiempo de las pruebas con el mecanismo híbrido cerrado para cada velocidad de motor se encuentran mas cercanos que los tiempos del mecanismo rimless wheel, y se presentan menos datos atípicos, como el tiempo de la prueba 3 con velocidad de motor 400, el tiempo de la prueba 3 con velocidad de motor 600, y el tiempo de la prueba 3 con velocidad de motor 1000.

Con la velocidad de motor 200, dos de las pruebas realizadas con el mecanismo rimless wheel tomaron más de 12 segundos, siendo estos 3 segundos mayores al tiempo más alto del mecanismo híbrido cerrado de 9.73 segundos en completar el mismo circuito. Para velocidad de motor 400 los tiempos de ambos mecanismos se encuentran cercanos. En las pruebas con velocidad de motor 800 existe una diferencia mínima de 0.6 segundos entre ambos mecanismos.

La media de las velocidades se encuentra agrupada para las pruebas realizadas con cada velocidad de motor para el mecanismo híbrido abierto, al compararlas con la media de las velocidades con el mecanismo rimless wheel. Para los tiempos atípicos del mecanismo rimless wheel mencionados anteriormente, la media de la velocidad para la prueba 3 con velocidad de motor 400 es la menor de las tres pruebas realizadas con una diferencia de 0.0190 m/s, al

igual que la media de la prueba 3 con velocidad de motor 1000 con una diferencia de 0.0211 m/s.

Para la pendiente de tierra con gravilla hay una diferencia significativa (mayor a 1 segundo) entre el tiempo requerido por ambos mecanismo con velocidades de motor 800 y 1000. La media de la velocidad para las velocidades de motor referidas anteriormente poseen de igual manera una diferencia entre ambos mecanismos (diferencia mínima de 0.0223 m/s para velocidad de motor 800, y 0.0337 m/s para velocidad de motor 1000). La desviación estándar de la velocidad para las pruebas con velocidad de motor 1000 es mayor para el mecanismo rimless wheel. En pendiente con arena el mecanismo híbrido abierto tardó menos tiempo en terminar el circuito en muchas de las pruebas con distintas velocidades de motor. La media de la velocidad para las pruebas con velocidad de motor 200 es mayor en dos de las tres pruebas el mecanismo híbrido, con velocidad de motor 400 la media es mayor por un mínimo de 0.0103 m/s. Para las velocidades de motor 600 y 800 la media de la velocidad de las pruebas se encuentra más cercana para el mecanismo híbrido cerrado.

El mecanismo rimless wheel presenta tiempos más cortos para completar el circuito en arena para velocidad de motor 400, en tierra con gravilla para velocidad de motor 600 y 800, y en gravilla para velocidad de motor 1000. El mecanismo híbrido cerrado presenta tiempos más cortos en arena para velocidad de motor 200 y 400, en tierra con gravilla para velocidad de motor 600.

La media de la velocidad presenta un aumento mínimo de 0.0271 m/s entre velocidad de motor 200 y 400, siendo la diferencia mínima más alta al comparar las velocidades de motor 400-600,600-800 y 800-1000 en tierra con gravilla. Este comportamiento se repite para los otros terrenos (diferencia mínima entre velocidad de motor 200 y 400 de 0.0186 m/s en gravilla, y 0.0201 m/s en arena). Entre las velocidades de motor 200 y 400 existe una diferencia de tiempo más grande que para las otras comparaciones de velocidad de motor (400-600,600-800 y 800-1000) en los tres terrenos.

Para el mecanismo híbrido cerrado la diferencia mínima entre la media de la velocidad para pruebas con velocidad de motor 200 y 400 es de 0.0266 m/s en tierra con gravilla, 0.0474 m/s en gravilla y 0.0411 m/s en arena, las cuales son mayores que para el mecanismo rimless wheel, pero no presentan una diferencia de tiempo tan alta como en el mecanismo rimless wheel. En las pruebas realizadas a ambos mecanismo la media y la desviación estándar de la velocidad aumentan conforme aumenta la velocidad de motor, excepto con la velocidad de motor 1000 con el mecanismo rimless wheel en tierra con gravilla, en donde la desviación estándar es menor que en la velocidad de motor anterior (800).

El mecanismo híbrido cerrado presenta una velocidad media superior de las tres pruebas en tierra con gravilla con una velocidad de motor 1000, y el mecanismo rimless wheel presenta una velocidad media superior de las tres pruebas en gravilla con una velocidad de motor 1000.

#### **11.4.5. Terreno con agujeros**

En las figuras 62, 63 y 64 se representa la trayectoria del desplazamiento vertical del los mecanismos rimless wheel e híbrido en los terrenos con agujeros. En el cuadro 10 se

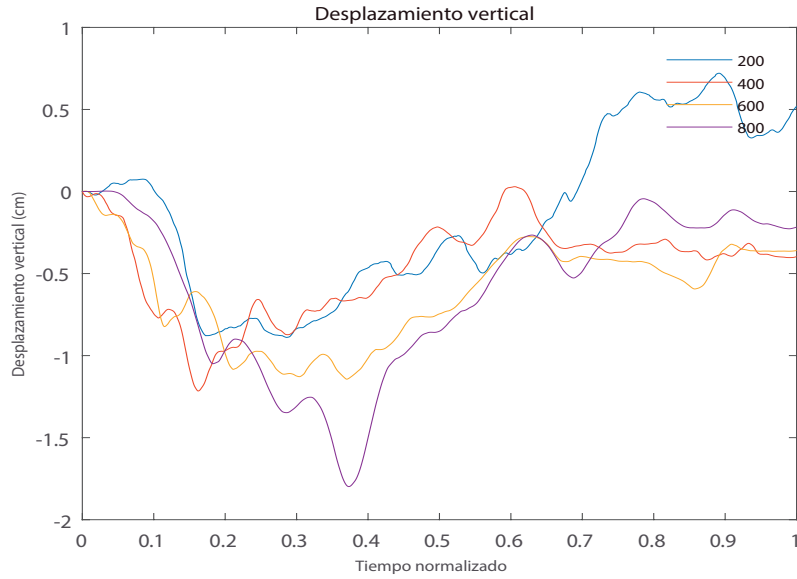
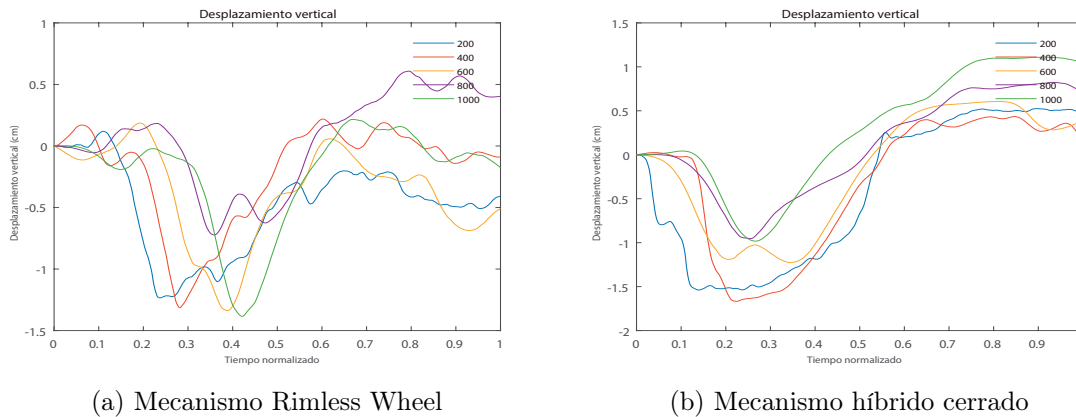


Figura 62: Gráfica de desplazamiento vertical en tierra con configuración agujeros con cinco velocidades de motor para mecanismo rimless wheel

encuentran el tiempo en el que se completo el circuito.

Como se menciona anteriormente, el mecanismo híbrido cerrado no logró completar el circuito en tierra y arena para ninguna velocidad de motor, y el mecanismo rimless wheel no completó el circuito en tierra con una velocidad de motor 1000. Por consiguiente para los terrenos de tierra y arena la comparación se realizara entre las velocidades de motor del mecanismo rimless wheel.

En tierra (Figura 62) se observa que la trayectoria con velocidad de motor 800 tiene su punto más bajo desplazado del resto de los demás, y es el punto más bajo alcanzado en este terreno. El desplazamiento del punto más bajo y el tiempo que tardó en regresar a una posición vertical neutra se debe a que a altas velocidades el mecanismo gira más rápido y



(a) Mecanismo Rimless Wheel

(b) Mecanismo híbrido cerrado

Figura 63: Gráficas de desplazamiento vertical en gravilla con configuración agujeros con cinco velocidades de motor

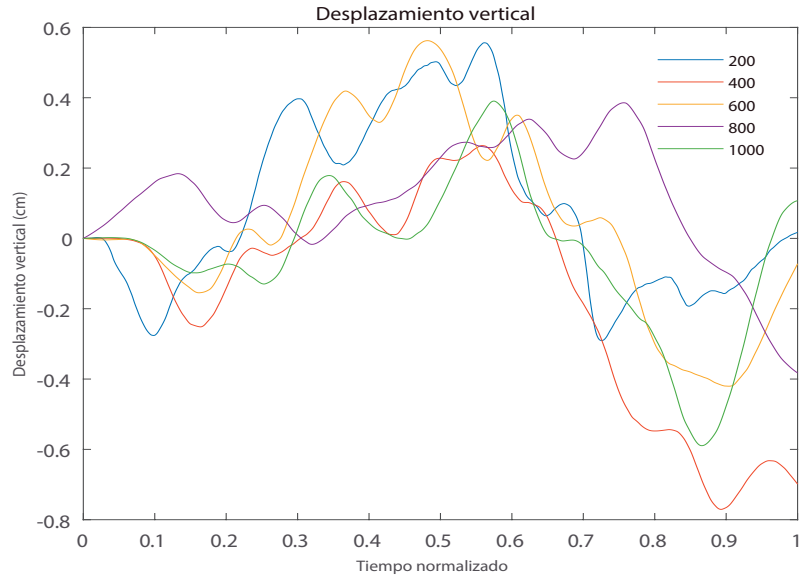


Figura 64: Gráfica de desplazamiento vertical en arena con configuración agujeros con cinco velocidades de motor para mecanismo rimless wheel

por el alto flujo granular que tiene la tierra el mecanismo tuvo muchos puntos de contacto y arrastró el terreno hasta que este se encontrara tan sólido como para apoyarse y subir. El tiempo que tardó en recorrer el circuito es de 14.42 segundos, el más alto en tierra por una diferencia de 7 segundos.

En gravilla al comparar el comportamiento entre ambos mecanismos, el mecanismo rimless wheel sale del agujero en un periodo de 0.4 y el mecanismo híbrido en un periodo de 0.5, lo que indica que el mecanismo híbrido desplazó una mayor cantidad de terreno que el mecanismo rimless wheel, esto por el contacto semi continuo que posee el mecanismo híbrido cerrado con el terreno. El mecanismo híbrido posee un desplazamiento vertical negativo máximo en sus velocidades de motor 200 y 400 mayores a las encontradas en las mismas velocidades de motor del mecanismo rimless wheel. En el mecanismo híbrido la velocidad de motor 800 y 1000 logran un desplazamiento vertical negativo mínimo, y en el mecanismo rimless wheel se logra solo con la velocidad de motor 800. En la Gráfica 63a se observa que mientras aumenta la velocidad de motor el punto en el que la trayectoria del desplazamiento vertical empieza a decaer. Este corrimiento se debe a que el mecanismo logra impulsarse más conforme aumenta la velocidad de motor ya que el terreno lo permite por el bajo flujo de los granos. Este comportamiento no se observa en el mecanismo rimless wheel por que posee un punto de contacto semi continuo. El menor tiempo en completar el circuito lo tiene el mecanismo híbrido en todas las velocidades de motor excepto en la velocidad de 200. La diferencia entre los tiempos de ambos mecanismos no difiere por más de 0.4 segundos.

En arena se observa un comportamiento similar al del mecanismo rimless wheel en gravilla, que el punto en el que empieza a decaer el desplazamiento vertical posee un mayor desfase cuando se aumenta la velocidad de motor, exceptuando para la velocidad más alta. El comportamiento es similar, pero el terreno es diferente; el flujo granular de la arena puede ser similar al de gravilla, pero con una velocidad de motor alta el flujo granular aumenta, y por

**Tiempo terreno con agujeros**

Velocidad motor	Dato estadístico	Rimless Wheel	Híbrido cerrado
		Prueba 1	Prueba 1
<b>Tierra</b>			
200	Tiempo (seg)	14.42	N/A
400	Tiempo (seg)	7.79	N/A
600	Tiempo (seg)	4.90	N/A
800	Tiempo (seg)	3.22	N/A
1000	Tiempo (seg)	N/A	N/A
<b>Gravilla</b>			
200	Tiempo (seg)	8.53	8.97
400	Tiempo (seg)	3.81	3.44
600	Tiempo (seg)	2.60	2.00
800	Tiempo (seg)	1.99	1.56
1000	Tiempo (seg)	1.53	1.24
<b>Arena</b>			
200	Tiempo (seg)	7.26	N/A
400	Tiempo (seg)	3.51	N/A
600	Tiempo (seg)	2.33	N/A
800	Tiempo (seg)	1.86	N/A
1000	Tiempo (seg)	1.52	N/A

Cuadro 10: Tabla de tiempo en completar la configuración agujeros para cada terreno

eso para la velocidad más alta el punto en el que empieza a decaer el desplazamiento vertical se encuentra que para una velocidad de motor 200. En este terreno el mecanismo rimless wheel logra un menor tiempo en completar el circuito para todas las velocidades de motor.

Al comparar los tres terrenos se observa que en gravilla el mecanismo rimless wheel se necesita un menor periodo de tiempo para poder salir del agujero, y este logra salir de una manera más rápida. Al observar las gráficas el cambio de desplazamiento vertical (del punto más bajo al punto neutro) es más pronunciado, por lo que en este terreno el flujo granular bajo permite que al encontrar un punto de apoyo estable (un grano estable) el mecanismo logra salir sin resbalar. La diferencia de tiempo entre todas las velocidades de motor para el mecanismo rimless wheel es menor al comparar el terreno de gravilla y arena, dado que estos dos poseen un flujo granular más bajo que la tierra.

El mecanismo rimless wheel presenta ocho puntos de contacto diferentes con el suelo (uno por cada pata), mientras que el mecanismo híbrido abierto presenta dos, y el mecanismo híbrido cerrado presenta un punto de contacto semi continuo. Los puntos de contacto en el mecanismo rimless wheel le brindan una mayor habilidad de sobrepasar obstáculos en terrenos difíciles en comparación al mecanismo híbrido.

El diseño e implementación de los mecanismos de locomoción, la plataforma de montaje y plataforma de pruebas permite evaluar el comportamiento de los mecanismos en los distintos terrenos y situaciones propuestas, así como generar y replicar los ambientes controlados.

Existe una diferencia entre el tiempo (cuadros 5, 8 y 10), velocidad (cuadros 6 y 9) y desplazamiento vertical (figuras 59, 60 y 61) con las velocidades de motor utilizadas entre ambos mecanismos, con el mecanismo híbrido cerrado teniendo la ventaja en la mayoría de pruebas; sin embargo el mecanismo rimless wheel presenta una locomoción efectiva para el desplazamiento de una plataforma robótica en terrenos hostiles al ser el único mecanismo que logró completar el circuito de agujeros (figuras 55 y 56) en dos de los tres terrenos seleccionados (10).

Los mecanismos presentan el desplazamiento del terreno a altas velocidades de motor, 85 y 110 rpm, en terrenos con un elevado flujo granular y reducido tamaño de grano. El mecanismo rimless wheel es capaz de desplazar una menor cantidad de terreno (Figura 4) para lograr superar un obstáculo por los espacios que existen entre cada pata.



Realizar pruebas en una plataforma que representa el diseño de la plataforma robótica a utilizar, con los componentes finales, para observar el comportamiento de toda la plataforma en los ambientes controlados, y realizar ajustes, tales como el número o tamaño de llantas, el peso total del robot, para obtener un mejor desempeño en terrenos hostiles. Componentes como los motores deben ajustarse a las características del robot (tamaño, torque, voltaje, velocidad máxima).

Implementar los prototipos con materiales duraderos y que sean resistentes a las posibles situaciones a las que pueda exponerse la plataforma robótica.

Diseñar e implementar una plataforma de pruebas que permita observar el comportamiento del mecanismo híbrido abierto en las distintas situaciones de terrenos, ya que este requiere de una mayor estabilidad.

Diseñar e implementar una plataforma de pruebas que permita el giro de la plataforma robótica, y analizar el comportamiento de los mecanismos cuando antes, durante y después de realizar un giro.

Realizar pruebas variando la velocidad de motor para obtener un mejor rendimiento en distintas situaciones, basado en el comportamiento observado de los prototipos en los terrenos a distintas velocidades de motor.



- 
- [1] *Wheels and Legs - NASA Mars Curiosity Rover*. dirección: <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/rover/wheelslegs/>.
  - [2] *Rover Wheels*. dirección: <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/rover/wheels/>.
  - [3] *Computer-Design Drawing for NASA's 2020 Mars Rover*. dirección: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA20759>.
  - [4] *RHex*. dirección: <https://www.bostondynamics.com/rhex>.
  - [5] *RHex*. dirección: <https://www.bostondynamics.com/rhex#&gid=1&pid=4>.
  - [6] S.-C. Chen, K.-J. Huang, W.-H. Chen, S.-Y. Shen, C.-H. Li y P.-C. Lin, “Quattroped: A Leg–Wheel Transformable Robot”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, n.º 2, págs. 730-742, 2014. DOI: 10.1109/tmech.2013.2253615.
  - [7] W.-H. Chen, H.-S. Lin, Y.-M. Lin y P.-C. Lin, “TurboQuad: A Novel Leg–Wheel Transformable Robot With Smooth and Fast Behavioral Transitions”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, n.º 5, págs. 1025-1040, 2017. DOI: 10.1109/tro.2017.2696022.
  - [8] M. Perez, *Origami-inspired Robot Can Hitch a Ride with a Rover*, mar. de 2017. dirección: <https://www.nasa.gov/feature/jpl/origami-inspired-robot-can-hitch-a-ride-with-a-rover>.
  - [9] M. Gomes y A. Ruina, “Walking model with no energy cost”, *Physical Review E*, vol. 83, n.º 3, 2011. DOI: 10.1103/physreve.83.032901.
  - [10] A. Chatterjee, R. Pratap, C. Reddy y A. Ruina, “Persistent Passive Hopping and Juggling is Possible Even With Plastic Collisions”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, n.º 7, págs. 621-634, 2002. DOI: 10.1177/027836402322023213.
  - [11] —, “Persistent Passive Hopping and Juggling is Possible Even With Plastic Collisions”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, n.º 7, págs. 621-634, jul. de 2002. DOI: 10.1177/027836402322023213.
  - [12] Redaccion, “¿Cuánto tiempo se puede sobrevivir bajo escombros?”, *BBC News Mundo*, mayo de 2017. dirección: [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/05/130512\\_sobrevivientes\\_terremotos\\_escombros\\_como\\_dc](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/05/130512_sobrevivientes_terremotos_escombros_como_dc).

- [13] “Rescatistas voluntarios encuentran 68 cadáveres cerca del Volcán de Fuego de Guatemala”, *Sputniknews*, jul. de 2018. dirección: <https://mundo.sputniknews.com/america-latina/201807141080421509-busqueda-victimas-erupcion/>.
- [14] Afp, “Se arriesgan rescatistas y continúan búsquedas en Guatemala”, *Jornada*, jun. de 2018. dirección: <https://www.jornada.com.mx/ultimas/mundo/2018/06/07/se-arriesgan-rescatistas-y-continuan-busquedas-en-guatemala-1973.html>.
- [15] R. Siegwart, P. Lamon, T. Estier, M. Lauria y R. Piguet, “Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 40, n.º 2-3, págs. 151-162, 2002. DOI: 10.1016/s0921-8890(02)00240-3.
- [16] *Spot*. dirección: <https://www.bostondynamics.com/spot>.
- [17] *SandFlea*. dirección: <https://www.bostondynamics.com/sandflea>.
- [18] C. Grand, F. Benamar, F. Plumet y P. Bidaud, “Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, n.º 10-11, págs. 1041-1058, 2004. DOI: 10.1177/0278364904047616.
- [19] T. Estier, Y. Crausaz, B. Merminod, M. Lauria, R. Piguet y R. Siegwart, “An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities”, *Robotics 2000*, 2000. DOI: 10.1061/40476(299)44.
- [20] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh y D. Scaramuzza, *Introduction to autonomous mobile robots*. The MIT Press, 2011.
- [21] T. McGeer, “Passive Dynamic Walking”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, n.º 2, págs. 62-82, 1990. DOI: 10.1177/027836499000900206.
- [22] K. Waldron y R. Mcghee, “The adaptive suspension vehicle”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 6, n.º 6, págs. 7-12, 1986. DOI: 10.1109/mcs.1986.1105145.
- [23] V. Kumar y K. J. Waldron, “Actively Coordinated Vehicle Systems”, *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, vol. 111, n.º 2, pág. 223, 1989. DOI: 10.1115/1.3258987.
- [24] S. V. Sreenivasan y K. J. Waldron, “Displacement Analysis of an Actively Articulated Wheeled Vehicle Configuration With Extensions to Motion Planning on Uneven Terrain”, *Journal of Mechanical Design*, vol. 118, n.º 2, pág. 312, 1996. DOI: 10.1115/1.2826886.
- [25] S. V. Sreenivasan, P. K. Dutta y K. J. Waldron, “The Wheeled Actively Articulated Vehicle (WAAV): An Advanced Off-Road Mobility Concept”, *Advances in Robot Kinematics and Computational Geometry*, págs. 141-150, 1994. DOI: 10.1007/978-94-015-8348-0\_14.
- [26] S. Vardhan y M. Gomes, “67-1 Dynamic Analysis of a Rimless Wheel on Randomly Generated Rough Terrain”, *Proceedings of the International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics*, vol. 67, págs. 1-7, mayo de 2014.
- [27] T. McGeer, “Dynamics and Control of Bipedal Locomotion”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 163, n.º 3, págs. 277-314, 1993. DOI: 10.1006/jtbi.1993.1121.
- [28] T. McGeer, “Passive Bipedal Running”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 240, n.º 1297, págs. 107-134, 1990. DOI: 10.1098/rspb.1990.0030.
- [29] B.-Z. Sandler, *Robotics: designing the mechanisms for automated machinery*. Academic, 1999.

- [30] A. D. Ryck y O. Louisnard, “Dense annular flows of granular media”, 2013. DOI: 10.1063/1.4812152.
- [31] D. HILLEL, *FUNDAMENTALS OF SOIL PHYSICS*. ACADEMIC PRESS, 2013.
- [32] F. Asano, “Stability principle underlying passive dynamic walking of rimless wheel”, *2012 IEEE International Conference on Control Applications*, 2012. DOI: 10.1109/cca.2012.6402345.
- [33] J. Charmant y contributors, *Kinovea*, 2018. dirección: <http://www.kinovea.org>.



## 15.1. Código

Los códigos utilizados de MATLAB y Arduino se encuentran en el repositorio

<https://github.com/KevinMunoz19/Codigo-Trabajo-de-Graduacion.git>

## 15.2. Tablas

		Tiempo terreno plano					
		Rimless Wheel			Híbrido cerrado		
Velocidad motor	Dato estadístico	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
		Tierra					
200	Tiempo (seg)	8.67	7.63	9.10	7.47	7.30	7.70
400	Tiempo (seg)	3.90	4.10	3.73	4.00	3.50	3.23
600	Tiempo (seg)	2.97	2.77	2.90	2.20	2.00	2.20
800	Tiempo (seg)	2.77	3.10	3.10	1.40	1.67	1.37
1000	Tiempo (seg)	2.13	2.23	2.20	1.27	1.23	1.17
		Piedrin					
200	Tiempo (seg)	7.97	7.90	7.67	6.70	6.90	6.77
400	Tiempo (seg)	3.47	3.47	3.30	2.30	2.53	4.60
600	Tiempo (seg)	2.20	2.43	2.97	1.87	1.43	1.77
800	Tiempo (seg)	1.70	1.67	1.53	1.13	1.50	1.43
1000	Tiempo (seg)	1.53	1.50	1.50	1.30	1.30	1.37
		Arena					
200	Tiempo (seg)	7.13	7.33	6.90	8.00	6.77	8.33
400	Tiempo (seg)	3.33	3.50	2.87	3.20	3.10	3.40
600	Tiempo (seg)	2.27	2.30	2.07	1.93	2.03	2.07
800	Tiempo (seg)	1.53	1.30	1.80	1.50	1.53	1.53
1000	Tiempo (seg)	1.73	1.70	1.70	1.30	1.40	1.07

Cuadro 11: Tabla de tiempo en completar la configuración plana para cada terreno

Velocidad terreno plano							
Velocidad motor	Dato estadístico	Rimless Wheel			Híbrido cerrado		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tierra							
200	Media (m/s)	0.0285	0.0315	0.0289	0.0391	0.0321	0.0352
	Desviación Estándar (m/s)	0.0136	0.0156	0.0158	0.0435	0.0313	0.0415
400	Media (m/s)	0.0629	0.0630	0.0600	0.0587	0.0746	0.0838
	Desviación Estándar (m/s)	0.0356	0.0453	0.0370	0.0584	0.0552	0.0528
600	Media (m/s)	0.0885	0.0877	0.0747	0.1080	0.1269	0.1098
	Desviación Estándar (m/s)	0.0513	0.0472	0.0387	0.0823	0.0632	0.0877
800	Media (m/s)	0.0900	0.0787	0.0864	0.1755	0.1362	0.1683
	Desviación Estándar (m/s)	0.0489	0.0401	0.0447	0.0987	0.0883	0.0779
1000	Media (m/s)	0.1088	0.0979	0.1118	0.1775	0.2075	0.1803
	Desviación Estándar (m/s)	0.0756	0.0670	0.0652	0.1048	0.0692	0.1196
Piedrin							
200	Media (m/s)	0.0308	0.0283	0.0310	0.0315	0.0305	0.0341
	Desviación Estándar (m/s)	0.0197	0.0231	0.0184	0.0327	0.0316	0.0298
400	Media (m/s)	0.0670	0.0777	0.0742	0.0721	0.0794	0.0509
	Desviación Estándar (m/s)	0.0298	0.0314	0.0256	0.0583	0.0676	0.0625
600	Media (m/s)	0.1123	0.1059	0.0960	0.1056	0.1204	0.1029
	Desviación Estándar (m/s)	0.0450	0.0501	0.0521	0.0864	0.0445	0.0638
800	Media (m/s)	0.1531	0.1531	0.1607	0.1511	0.1391	0.1511
	Desviación Estándar (m/s)	0.0533	0.0548	0.0604	0.0870	0.1001	0.0866
1000	Media (m/s)	0.1962	0.1790	0.1855	0.1815	0.1750	0.1712
	Desviación Estándar (m/s)	0.1130	0.0588	0.0941	0.0802	0.0806	0.0832
Arena							
200	Media (m/s)	0.0321	0.0352	0.0384	0.0303	0.0349	0.0283
	Desviación Estándar (m/s)	0.0134	0.0243	0.0169	0.0207	0.0250	0.0221
400	Media (m/s)	0.0762	0.0669	0.0890	0.0813	0.0824	0.0775
	Desviación Estándar (m/s)	0.0382	0.0347	0.0335	0.0517	0.0548	0.0515
600	Media (m/s)	0.1138	0.1075	0.1364	0.1335	0.1259	0.1285
	Desviación Estándar (m/s)	0.0670	0.0427	0.0635	0.0811	0.0788	0.0651
800	Media (m/s)	0.1736	0.1340	0.1320	0.1732	0.1703	0.1698
	Desviación Estándar (m/s)	0.0695	0.0540	0.0700	0.0734	0.0867	0.0791
1000	Media (m/s)	0.1269	0.1415	0.1300	0.1999	0.1927	0.2320
	Desviación Estándar (m/s)	0.0551	0.0808	0.0712	0.0938	0.0793	0.0857

Cuadro 12: Tabla de media y desviación estándar de la velocidad de tres pruebas realizadas configuración plana para cada terreno

### 15.3. Planos

Profundidad máxima en terreno con agujeros			
Velocidad motor	Dato estadístico	Rimless Wheel	Híbrido cerrado
		Prueba 1	Prueba 1
Tierra			
200	Desplazamiento vertical (cm)	1.6752	N/A
400	Desplazamiento vertical (cm)	1.7343	N/A
600	Desplazamiento vertical (cm)	1.8944	N/A
800	Desplazamiento vertical (cm)	1.9618	N/A
1000	Desplazamiento vertical (cm)	N/A	N/A
Gravilla			
200	Desplazamiento vertical (cm)	1.38	1.57
400	Desplazamiento vertical (cm)	1.46	1.71
600	Desplazamiento vertical (cm)	1.44	1.36
800	Desplazamiento vertical (cm)	0.98	1.17
1000	Desplazamiento vertical (cm)	1.45	1.02
Arena			
200	Desplazamiento vertical (cm)	1.16	N/A
400	Desplazamiento vertical (cm)	1.51	N/A
600	Desplazamiento vertical (cm)	1.09	N/A
800	Desplazamiento vertical (cm)	1.05	N/A
1000	Desplazamiento vertical (cm)	0.82	N/A

Cuadro 13: Tabla de profundidad máxima en la configuración agujeros para cada terreno

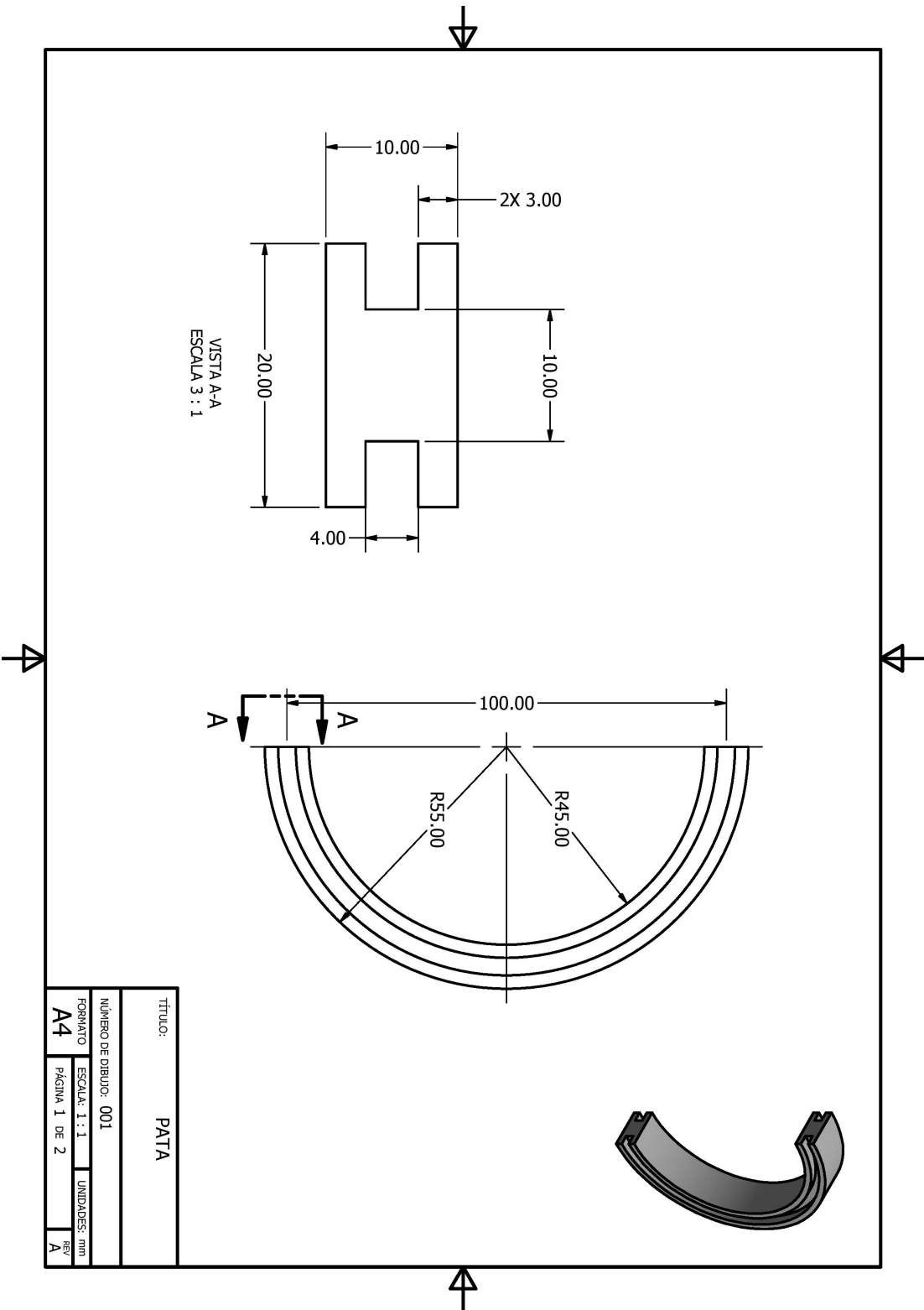


Figura 65: Plano de primera iteración de pata para mecanismo híbrido

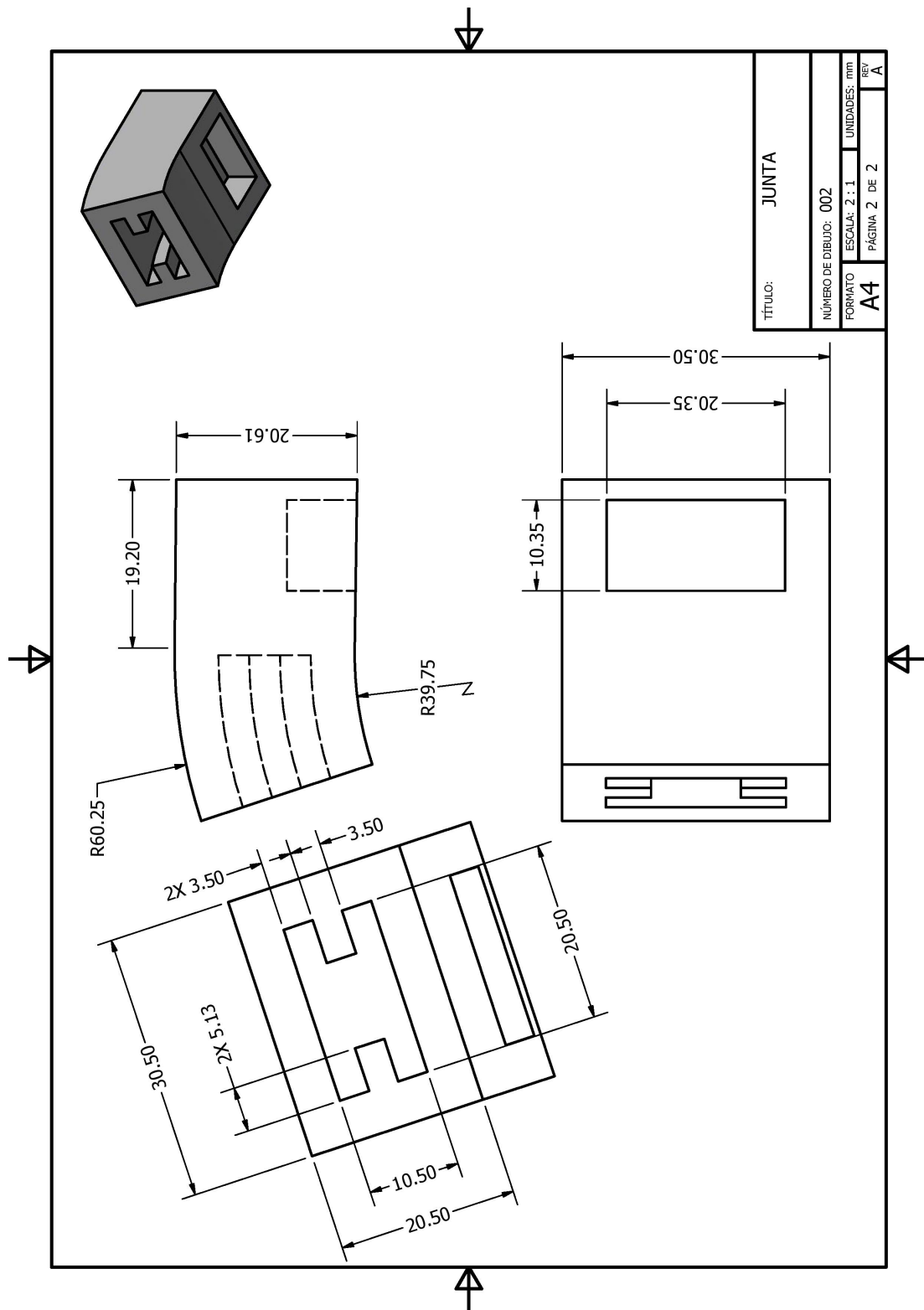


Figura 66: Plano de segunda iteración de junta para mecanismo híbrido





Figura 68: Plano de segunda iteración de junta para mecanismo híbrido

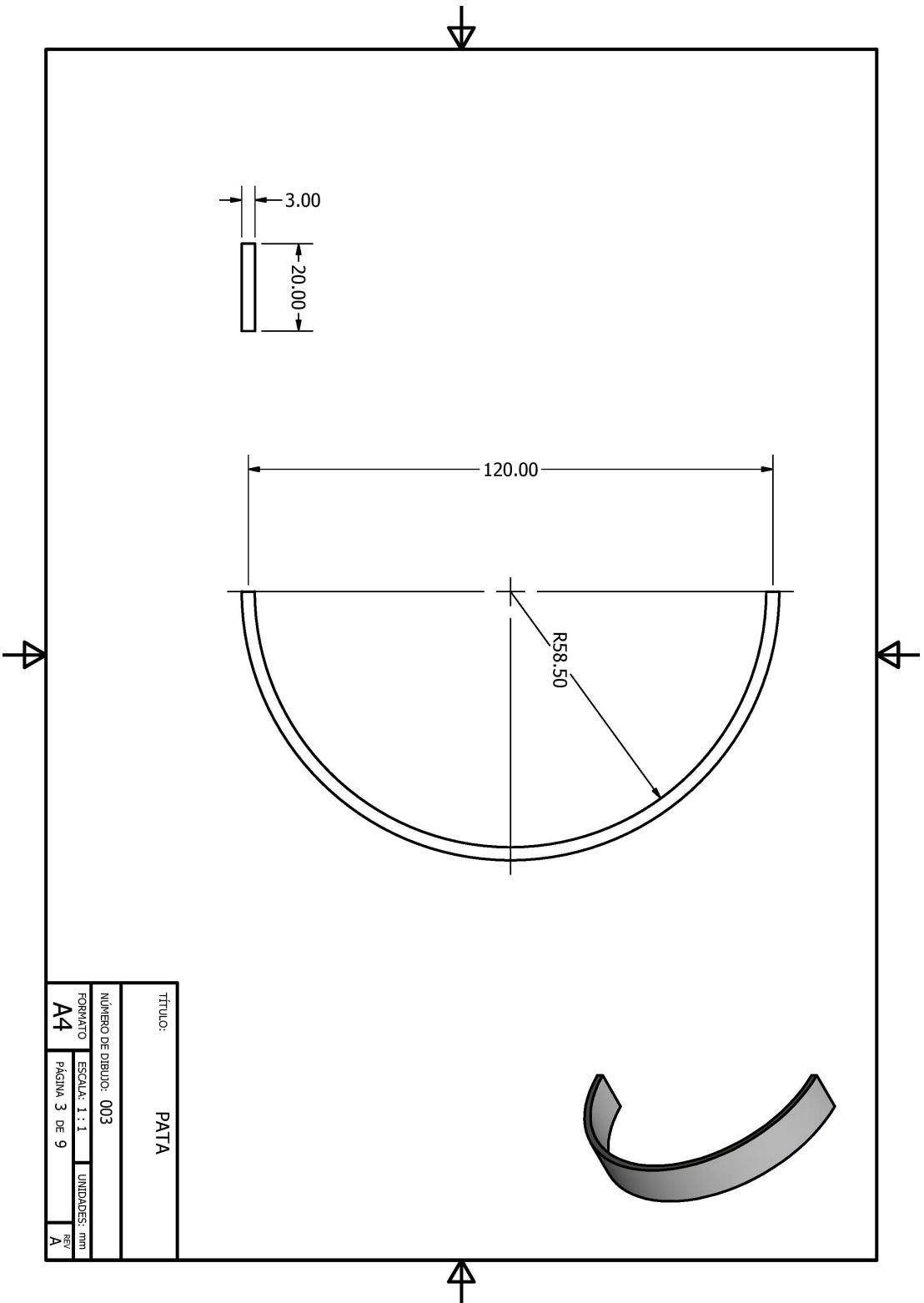


Figura 69: Plano de segunda iteración de pata para mecanismo híbrido

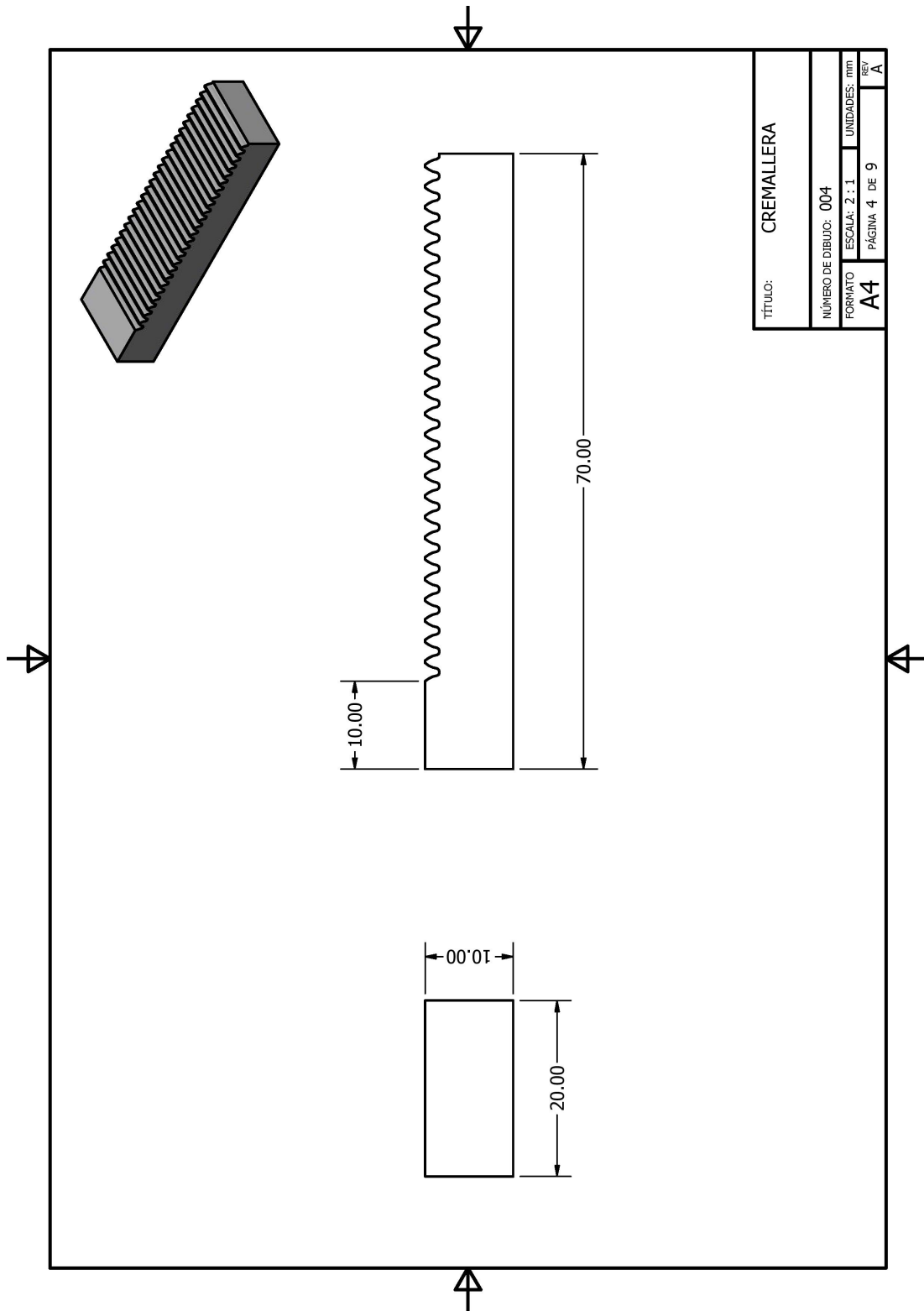


Figura 70: Plano de cremallera para mecanismo híbrido

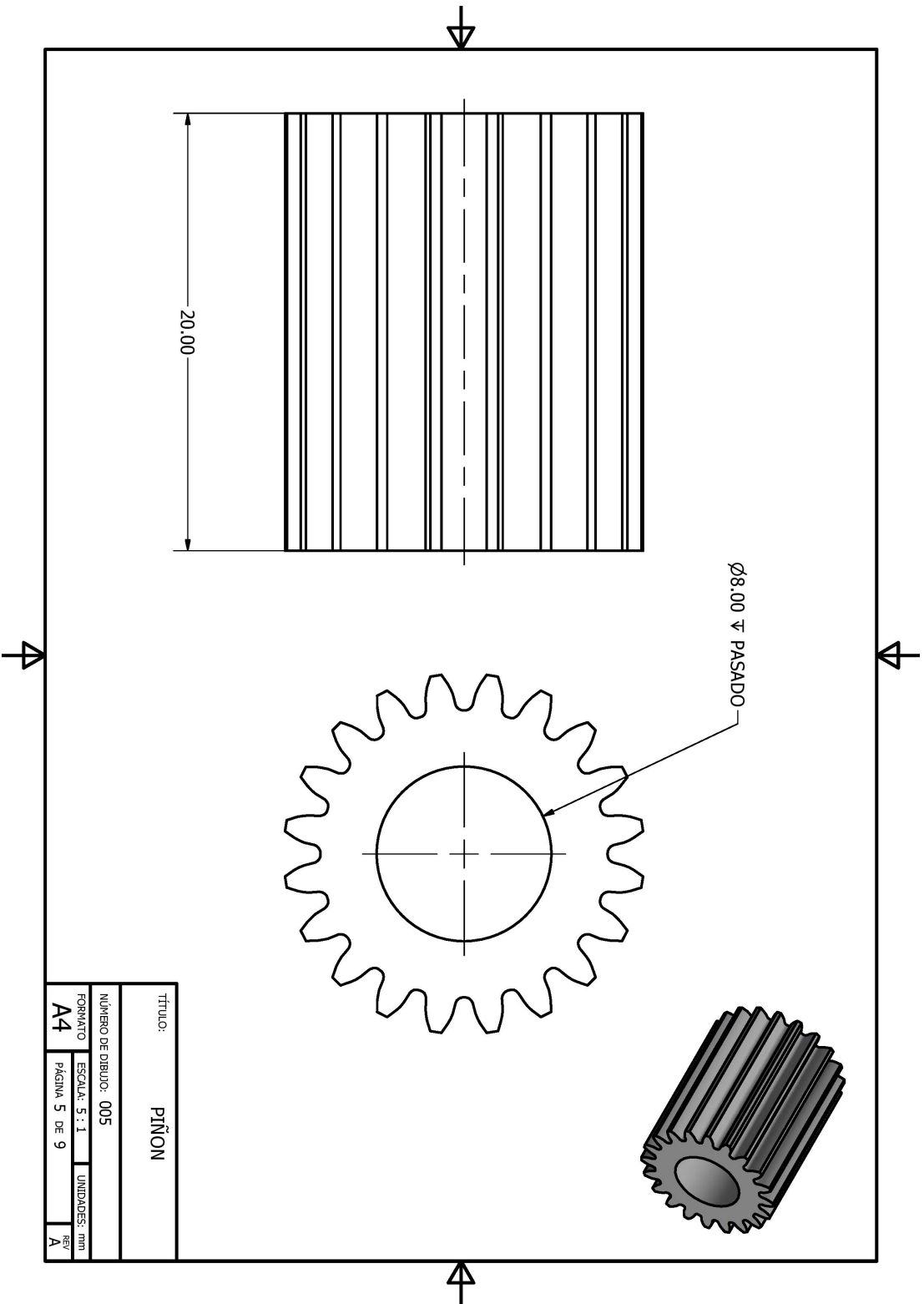


Figura 71: Plano de piñón para mecanismo híbrido

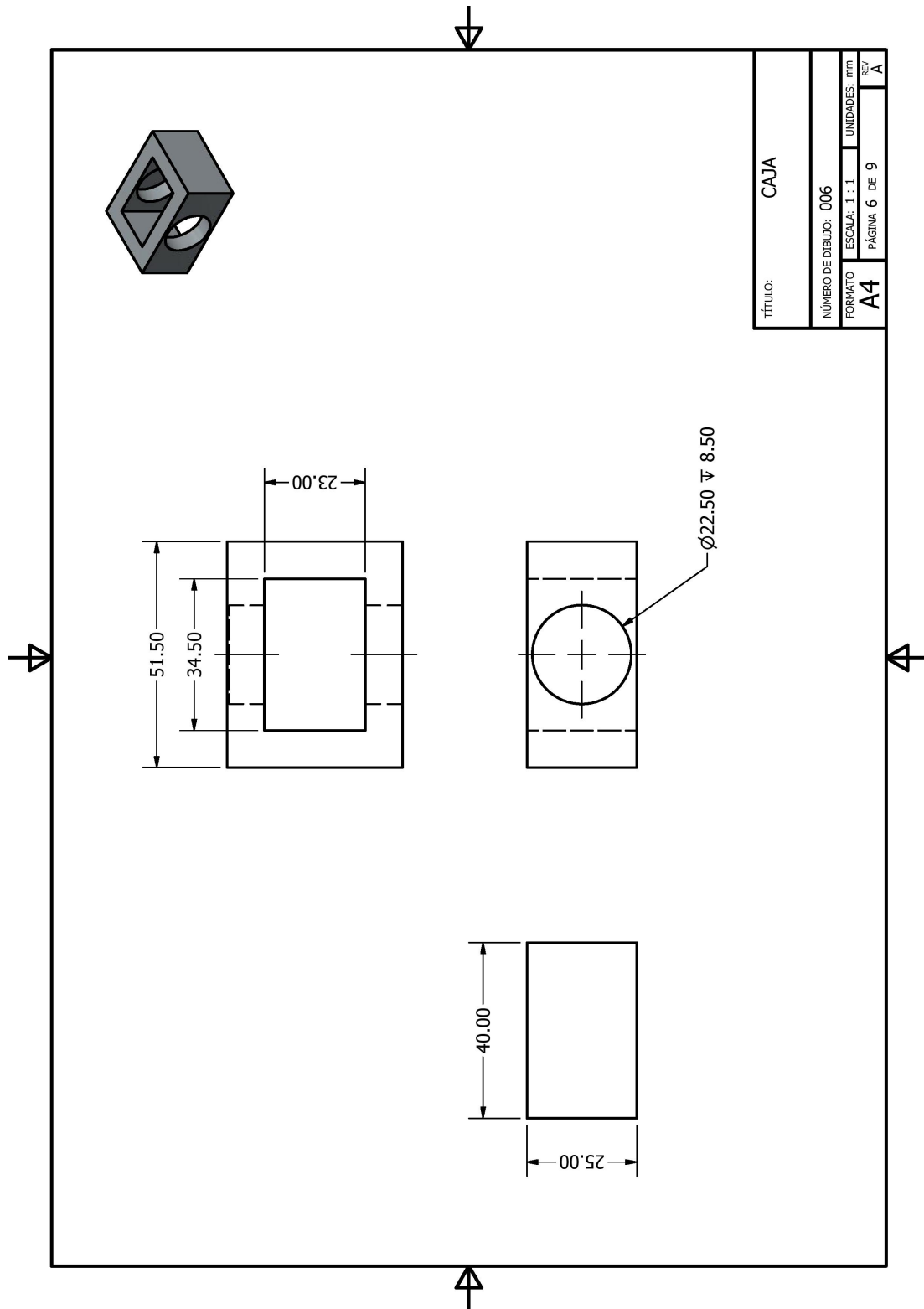


Figura 72: Plano de caja para mecanismo híbrido

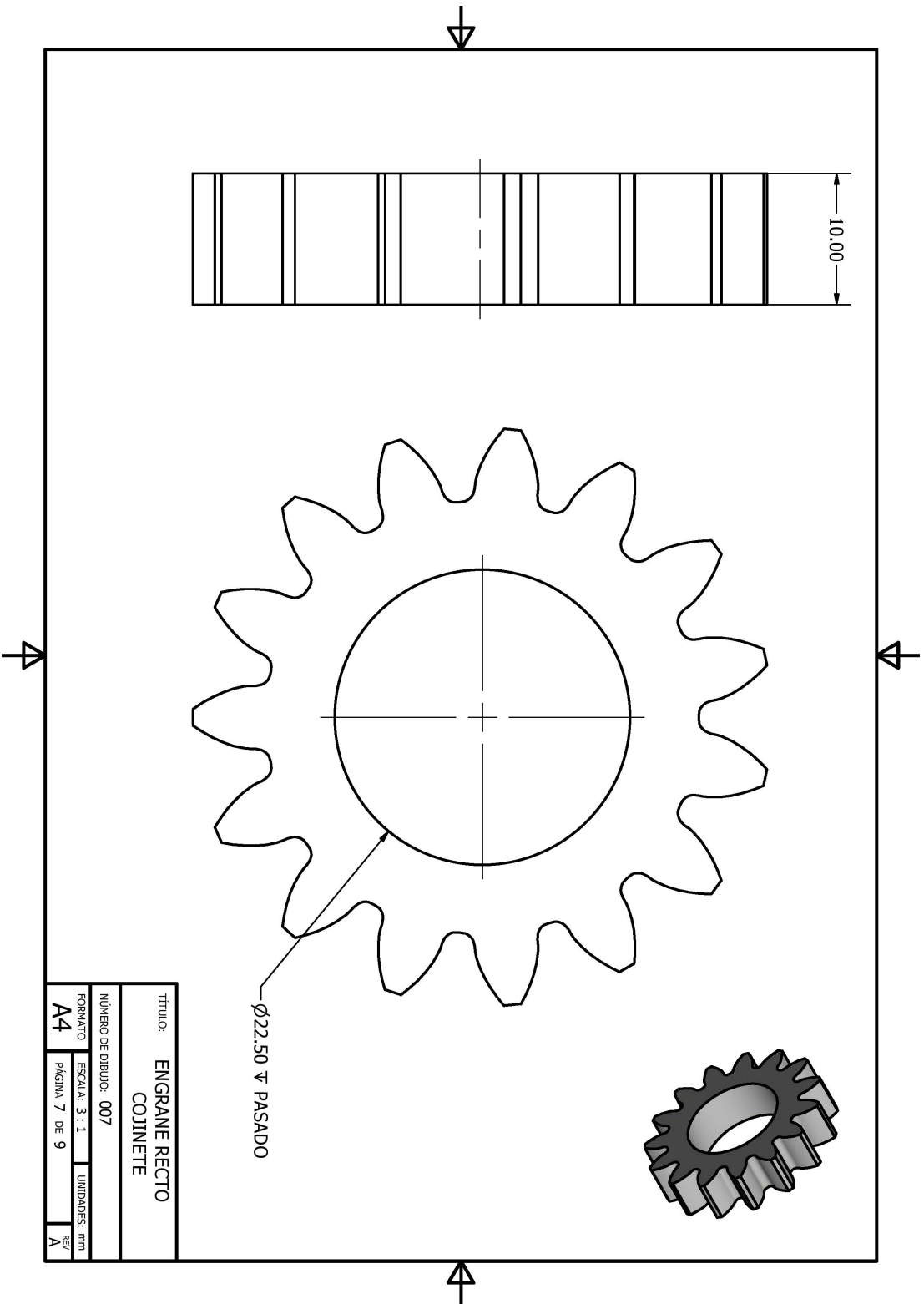


Figura 73: Plano de engrane recto con cojinete para mecanismo híbrido

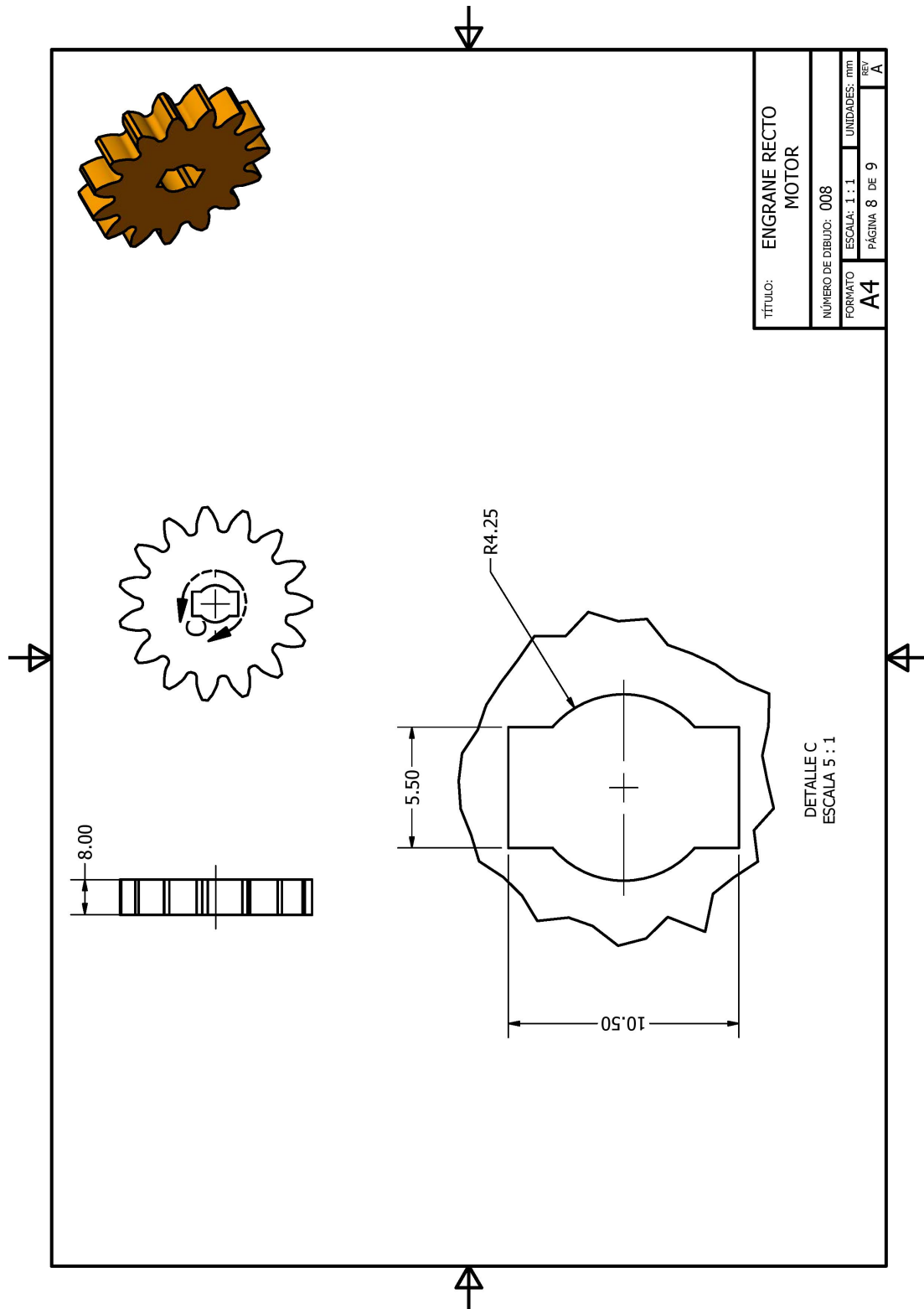


Figura 74: Plano de engrane recto motor para mecanismo híbrido

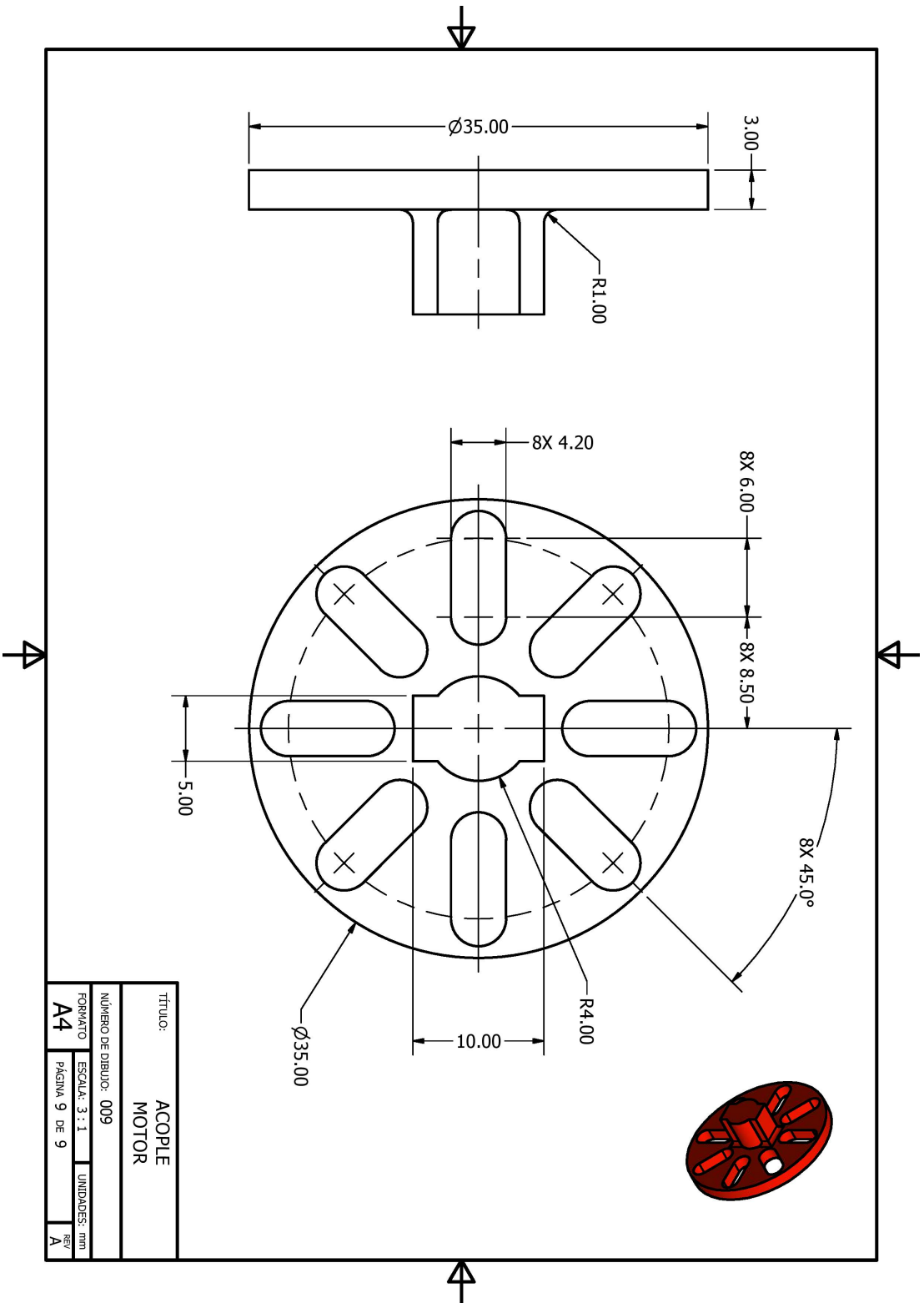


Figura 75: Plano de acople de motor del engrane recto para mecanismo híbrido



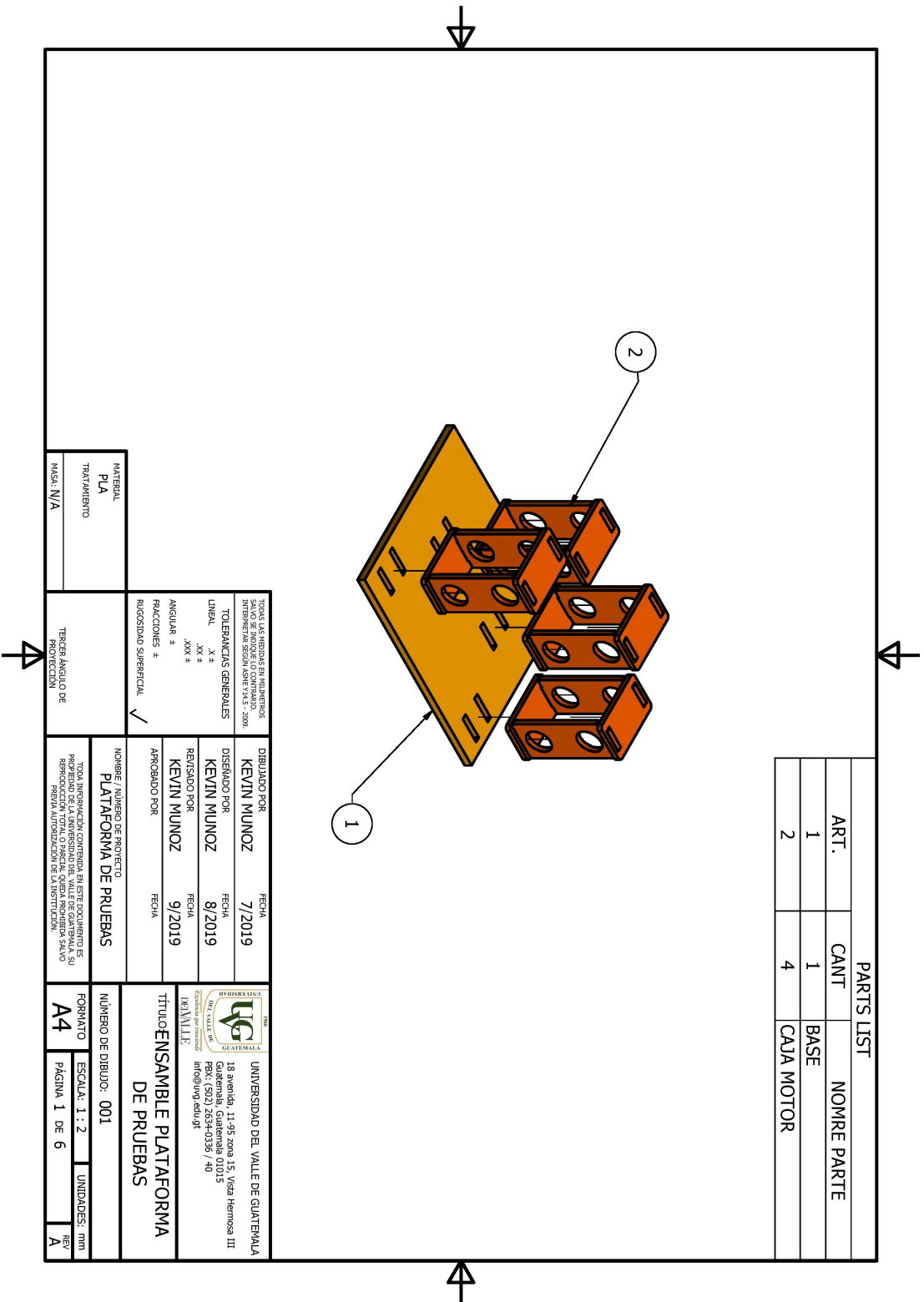


Figura 77: Plano de explosión de ensamble de plataforma de montaje

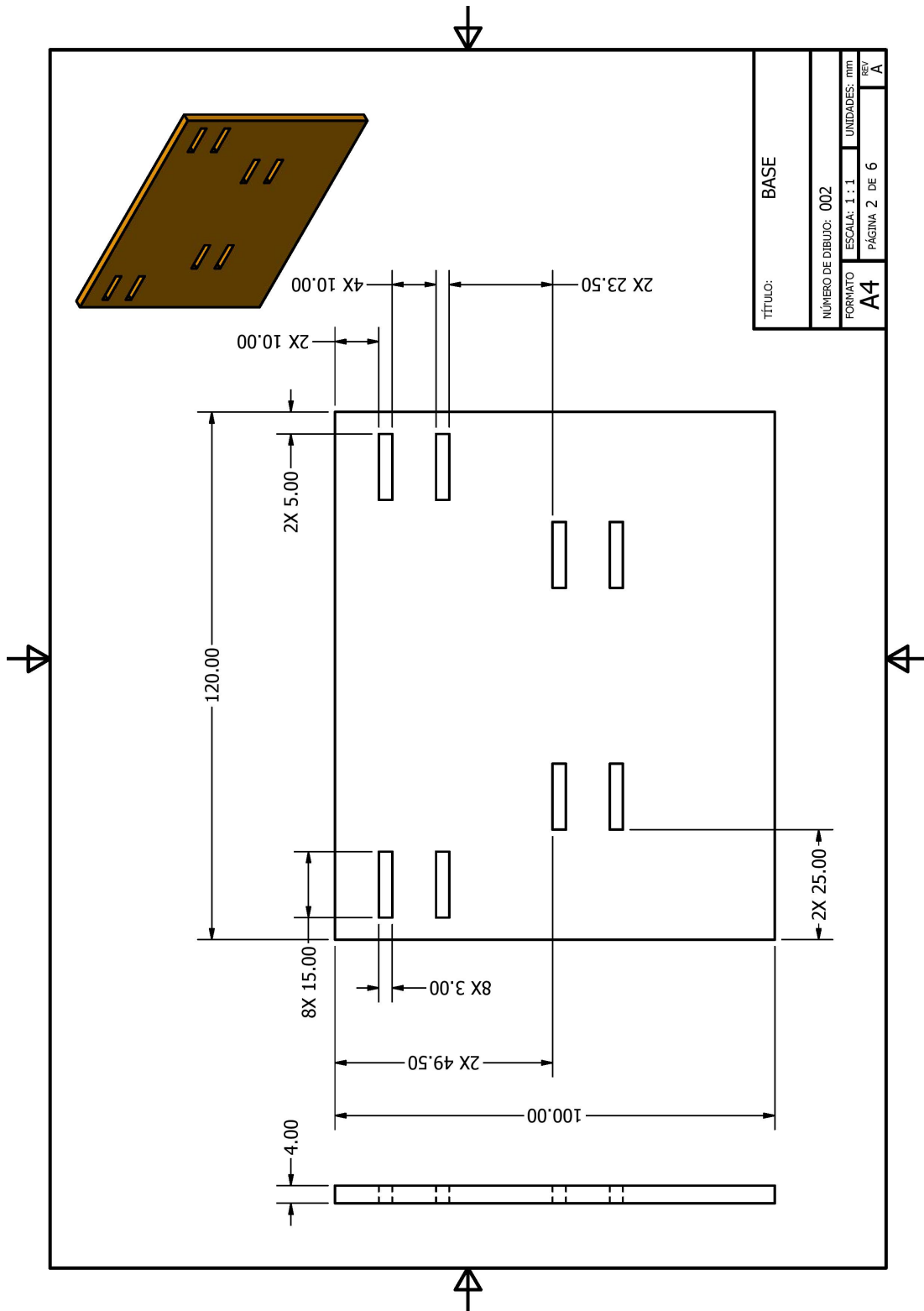


Figura 78: Plano de base de plataforma de montaje

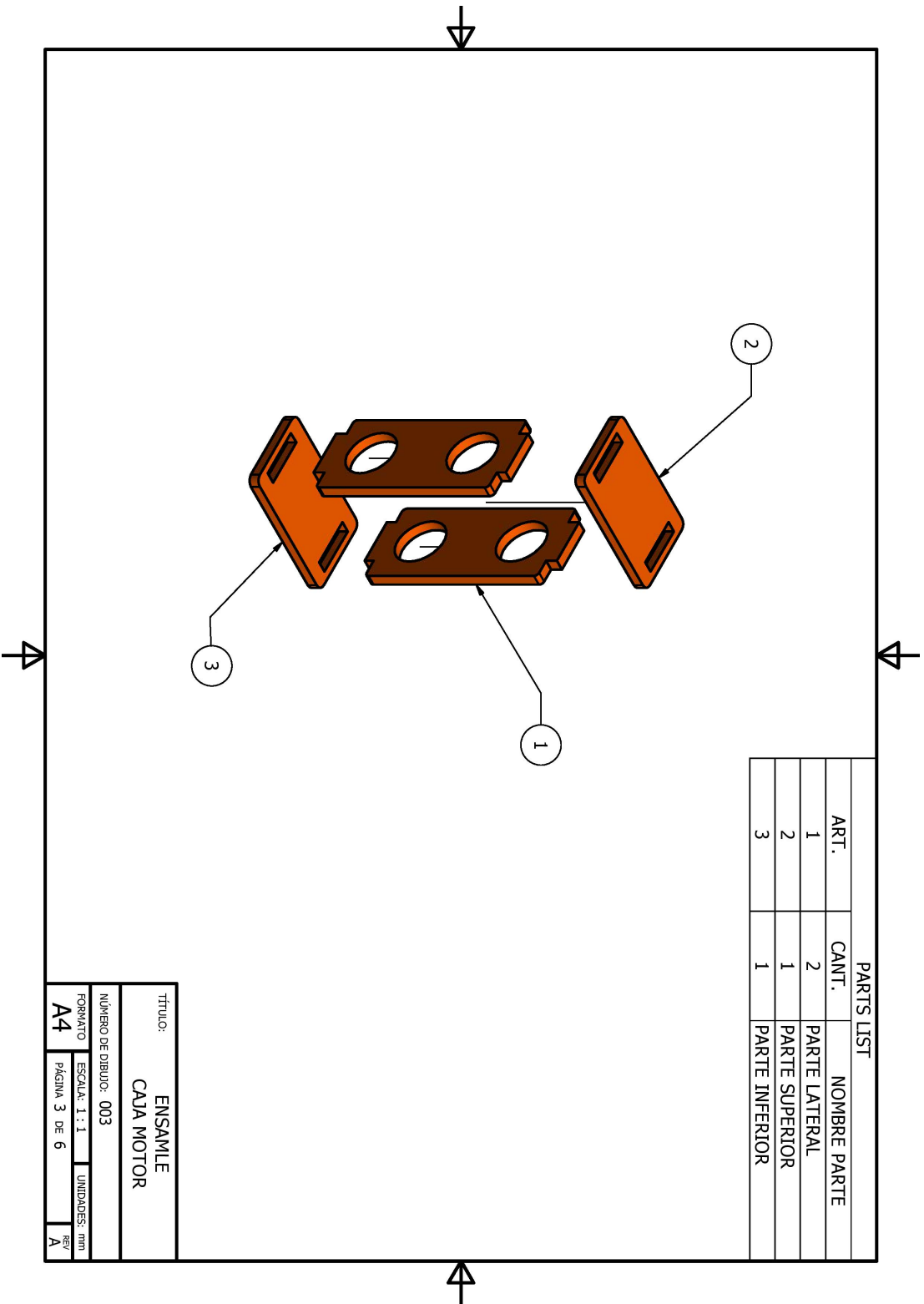


Figura 79: Plano de explosión de ensamble de caja para acople de motor a base

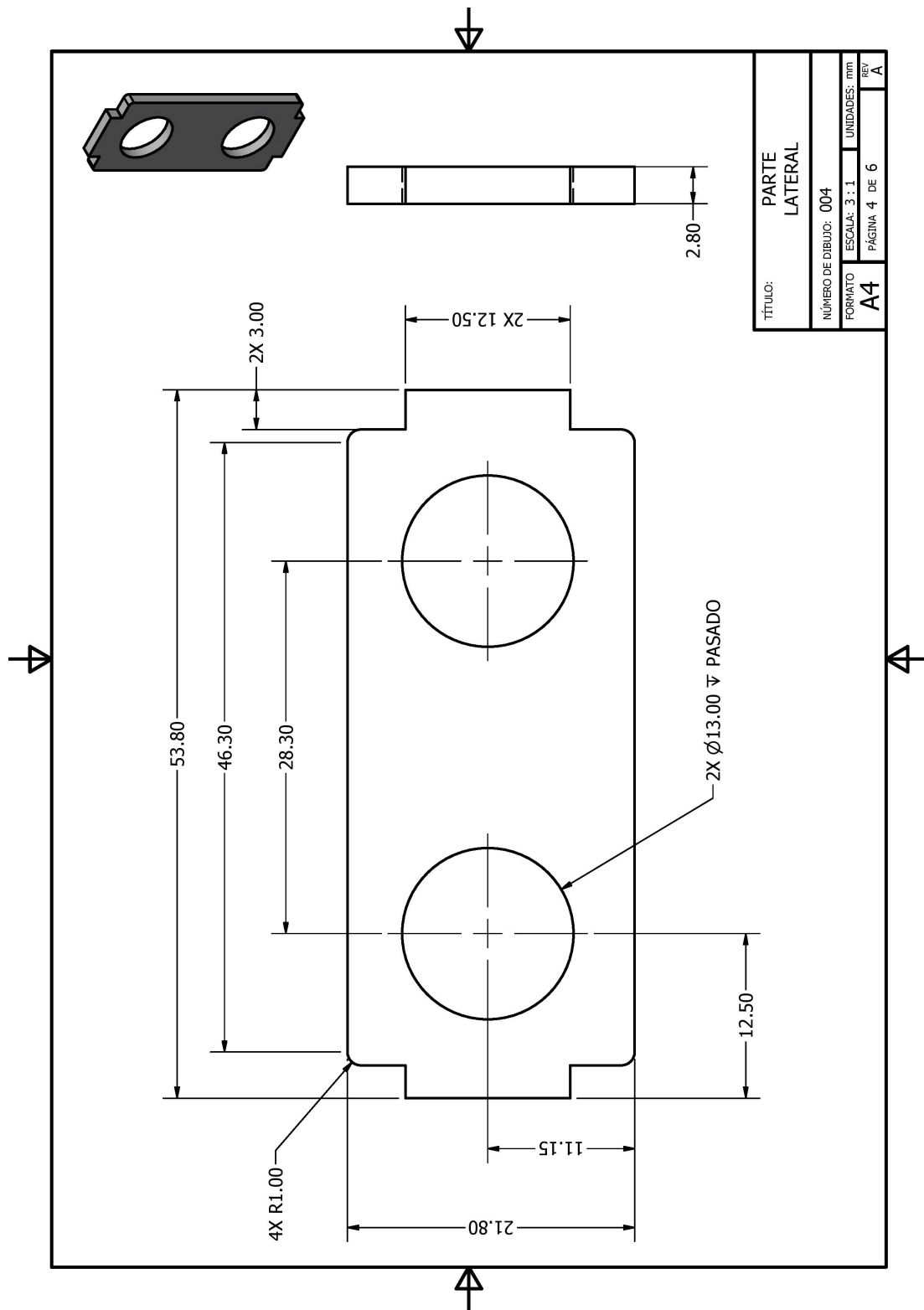


Figura 80: Plano de parte lateral de caja para acople de motor a base

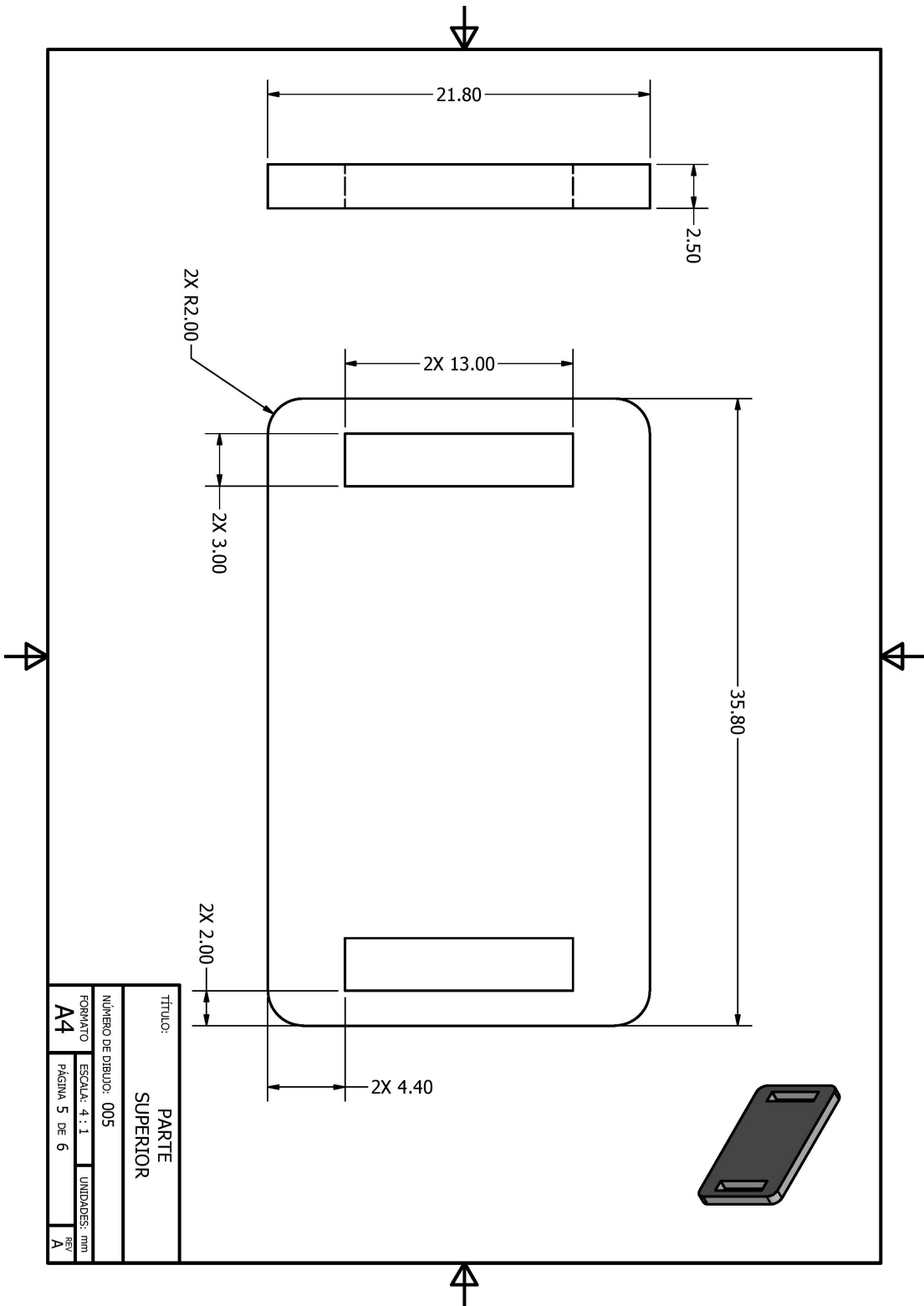


Figura 81: Plano de parte superior de caja para acople de motor a base

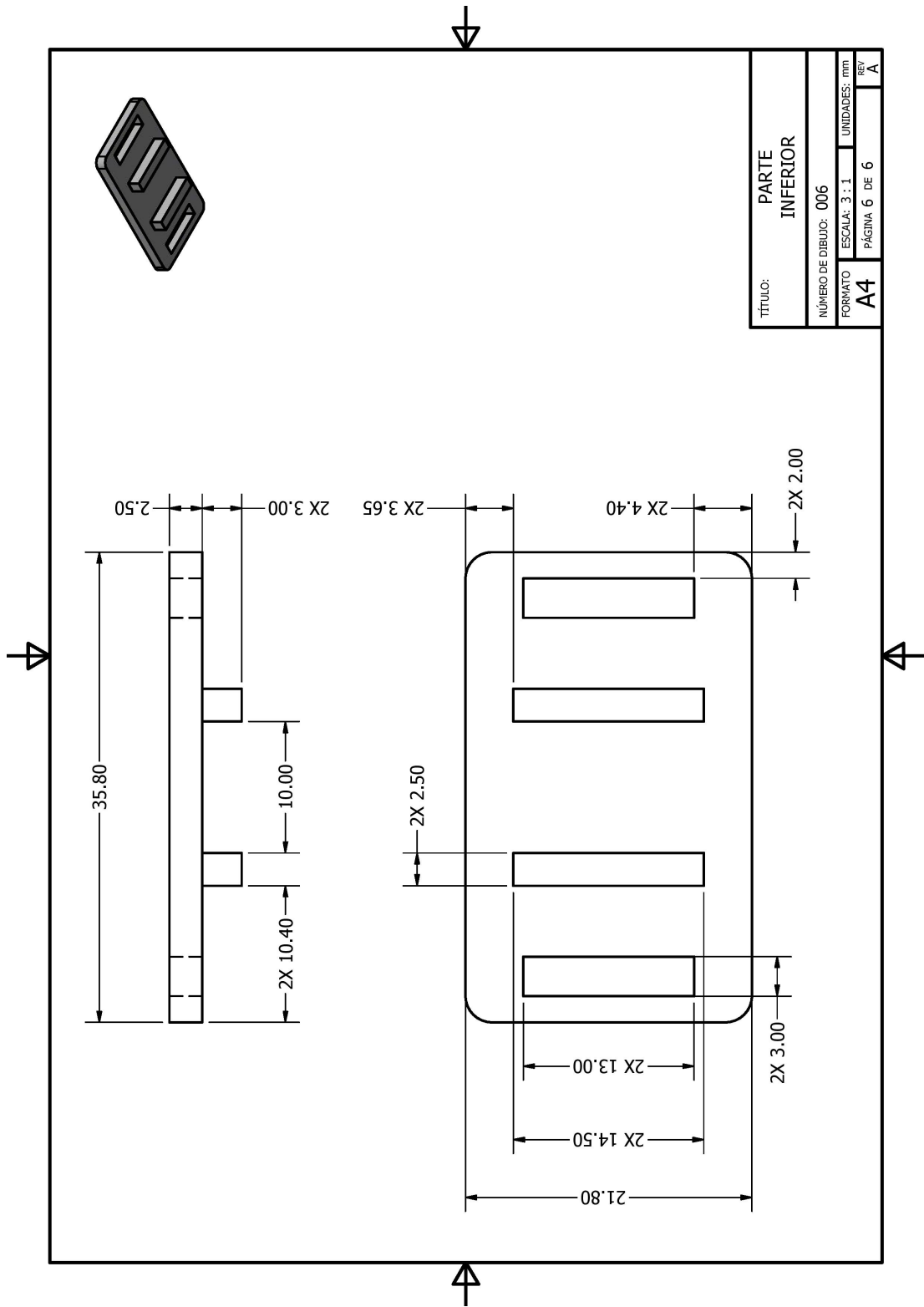


Figura 82: Plano de parte inferior de caja para acople de motor a base

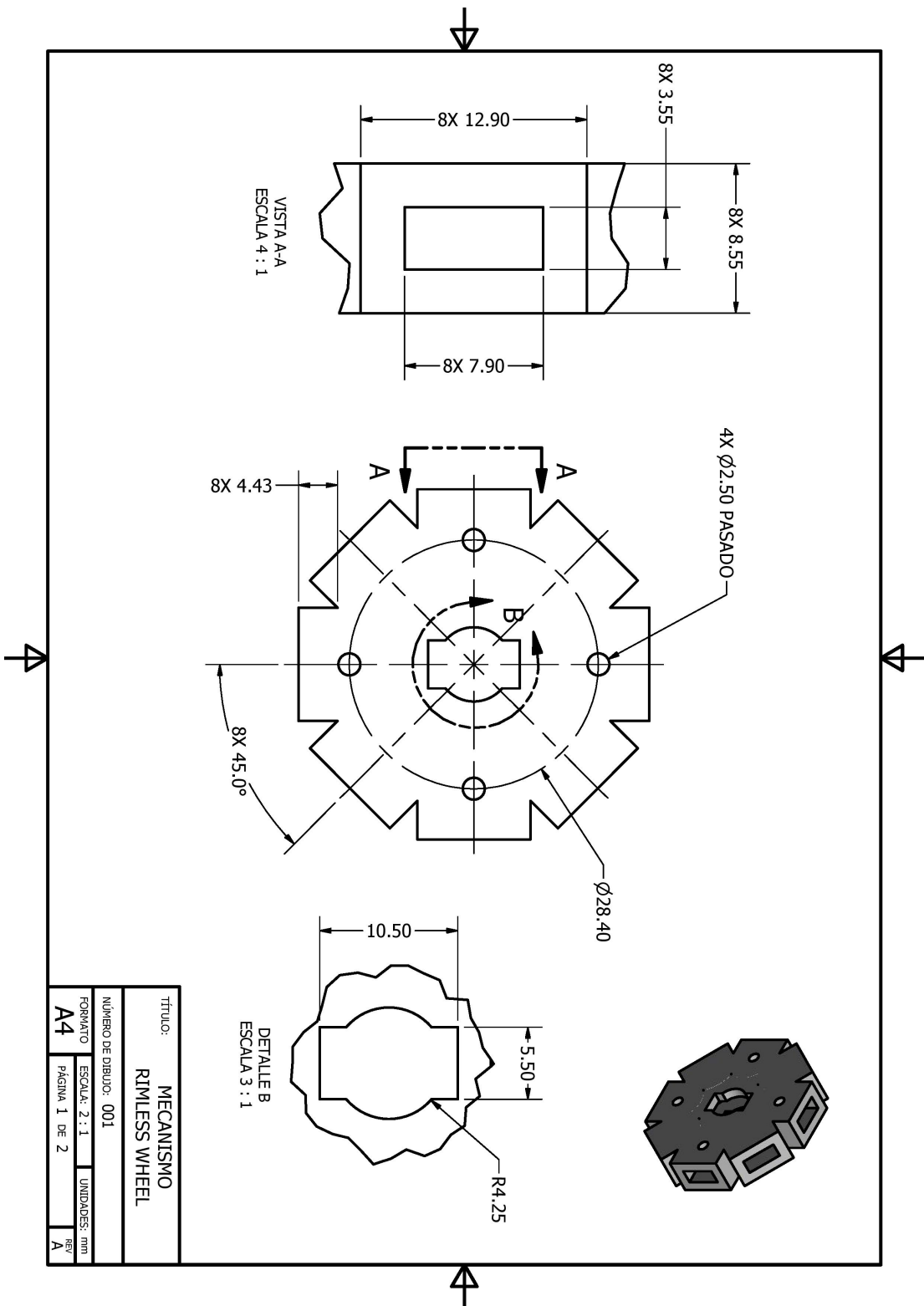
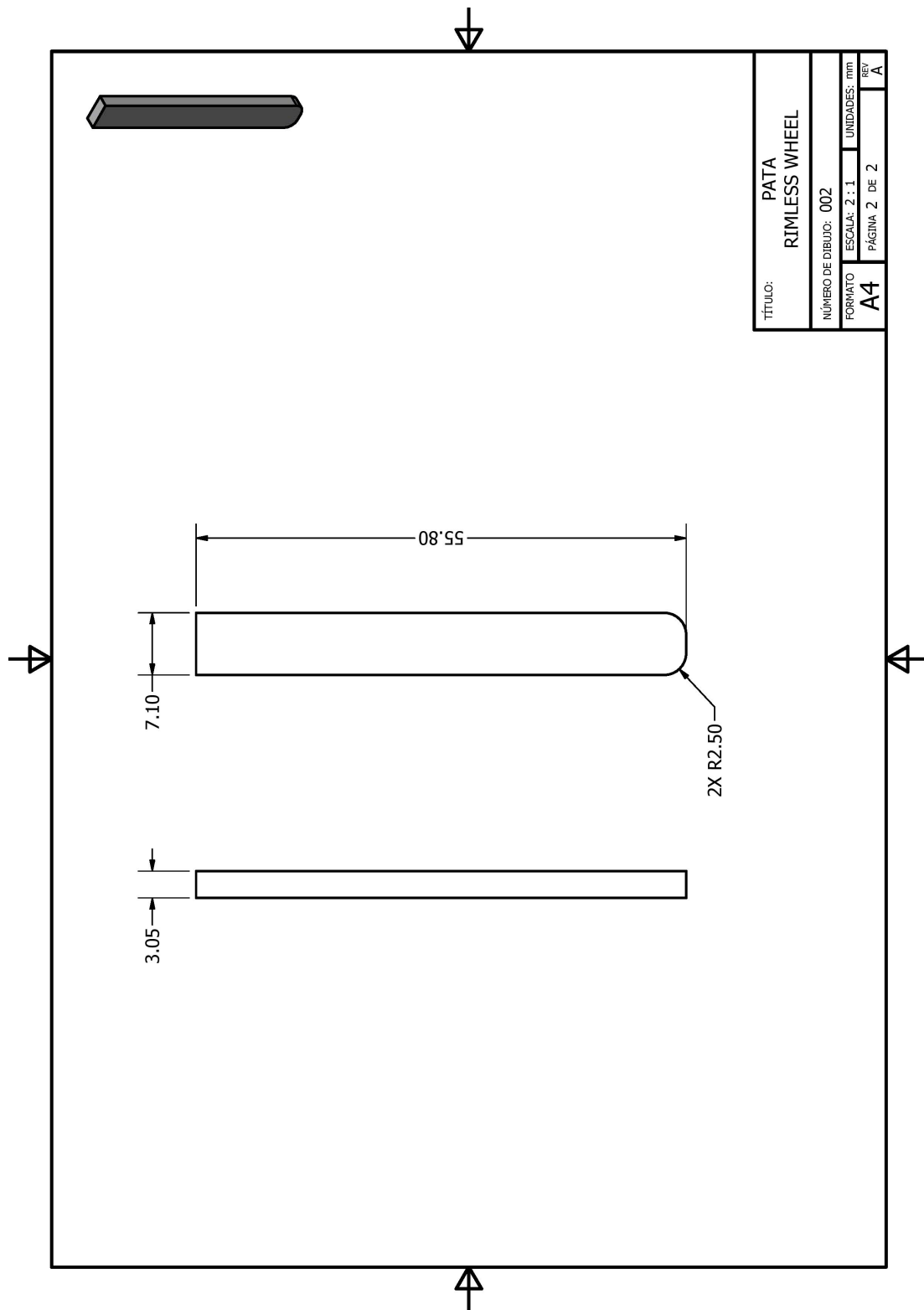


Figura 83: Plano de parte central de mecanismo rimless wheel



TÍTULO:		PATA RIMLESS WHEEL	
NÚMERO DE DIBUJO:		002	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	REV
A4	2:1	mm	A
PÁGINA 2 DE 2			

Figura 84: Plano de pata de mecanismo rimless wheel

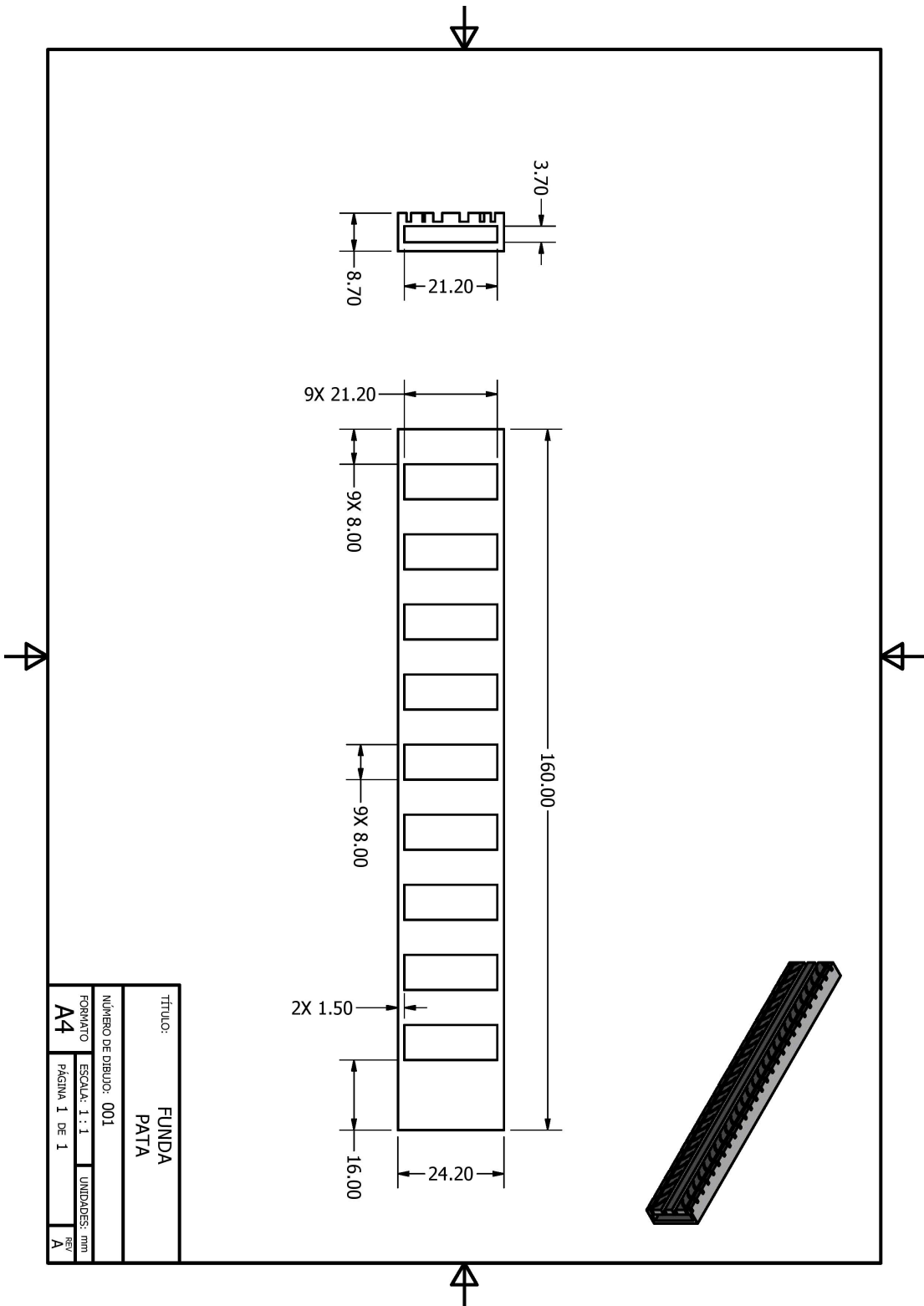


Figura 85: Plano de funda para llanta de mecanismo híbrido

**Arduino:** Placa de desarrollo de hardware que utiliza diversos microcontroladores y microprocesadores. 22, 23, 39

**HWLV:** Vehículos híbridos llanta-pata (por sus siglas en inglés Hibrid Wheel-Leg Vehicules ). 16

**Kinovea:** Software para análisis de video. 11, 42–45, 47

**Matlab:** Sistema de computo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. 11, 45

**MDF:** Fibropanel de densidad media (por sus siglas en inglés Medium Density Fibreboard), es un producto de madera reconstruida que se obtiene al descomponer residuos de madera dura o blanda en fibras y combinándolo con cera y resina, formando paneles mediante la aplicación de alta temperatura y presión. 40, 41

**PLA:** Ácido Poliláctico (por sus siglas en inglés Polylactic Acid), es un polímero construido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes al PET. Se obtiene a partir de almidón de maíz. 11

**TPU:** Poliuretano termoplástico (por sus siglas en inglés Thermoplastic Polyurethane), es un polímero elastómero lineal. 11, 29, 30

**WAAV:** Vehículos de llantas activamente articulados (por sus siglas en inglés Wheeled Actively Articulated Vehicles). 16, 17