

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Construcción de un mecanismo bio-inspirado para auto volteo  
de vehículos terrestres**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Joaquín Castillo Coronado  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2018







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Construcción de un mecanismo bio-inspirado para auto volteo  
de vehículos terrestres**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Joaquín Castillo Coronado  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

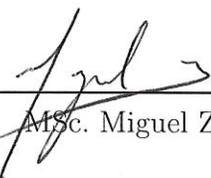
2018



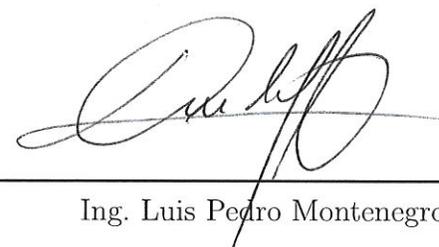
Vo.Bo.:

(f)   
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Miguel Zea

(f)   
MSc. Pablo Oliva

(f)   
Ing. Luis Pedro Montenegro

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2018.



Quiero aprovechar este espacio para honrar y agradecer a las personas que me apoyaron durante este proceso. Muchas gracias desde el corazón; sin ustedes este proyecto no hubiera sido posible.

- A mis padres, Rony y Marta, quienes siempre me han brindado todo lo que he necesitado y más. Su amor y apoyo han logrado levantar mi espíritu en los momentos más difíciles. Los amo y admiro infinitamente.
- A mis hermanas, Ana Lucía y Luz Mariana. Gracias por ser mis confidentes y consoladoras. Los abrazos recibidos siempre me llenan de energía. Las amo.
- A mi abuela, Alicia Coronado. Mi amada Ipa, te nos fuiste muy pronto. Aún así, sé que estarías orgullosa. Gracias por mostrarme que el amor incondicional no viene de la cantidad de recursos que tengamos o el título que ostentemos, sino de un corazón humilde y generoso. Te llevo en mi corazón para toda la vida. Te amo.
- A mi abuelo, Gilberto Coronado. Gracias por el amor, sabiduría y recuerdos, Papabeto. Lo llevo en mi corazón.
- A mis abuelos, Antonia y Alfonso. Gracias por sus oraciones y bendiciones. Siempre logran alegrar mi corazón. Los amo.
- A Miguel Zea, por todo lo que me ha enseñado y el apoyo ofrecido a lo largo de este proceso. Sé que a veces puedo ser un estudiante difícil, pero siempre me apoyaste en todo momento.
- A Diana, mi ayuda idónea. Tu amor fue un pilar importante en la construcción de este logro. Tu vida ha sostenido mi corazón en los momentos más oscuros y estoy infinitamente agradecido por ello. Te amo, mi colochita.
- A mis amigos del colegio, la universidad y de la iglesia. Siempre me han apoyado en todo lo que hago. Gracias por sus buenos deseos y sus oraciones. Siempre son bien recibidas.
- A Jesús, el hijo de Dios, el camino, la verdad y la vida. Gracias por darme identidad y un propósito para vivir. A ti me debo todo.



<b>Prefacio</b>	v
<b>Lista de figuras</b>	XIII
<b>Lista de cuadros</b>	XV
<b>Resumen</b>	XVII
<b>Abstract</b>	XIX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Estudio de Universidad de Illinois (E.E.U.U)	3
2.2. Robot <i>SandFlea</i> (Boston Dynamics)	3
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>11</b>
6.1. El Escarabajo Clic	11
6.1.1. Acerca del Escarabajo Clic	12
6.1.2. El salto del Escarabajo Clic	12
6.1.3. Modelo bio-mecánico de Ribak	14
6.2. Cinemática de mecanismos	17
6.2.1. Definición de mecanismo	18
6.2.2. Elementos presentes en mecanismos	18
6.2.3. Grados de libertad (GDL) o movilidad de un mecanismo plano	19
6.3. Centro de masa	20

6.3.1. Posición del centro de masa . . . . .	20
6.4. Dinámica de cuerpos rígidos . . . . .	21
6.4.1. Traslación . . . . .	21
6.4.2. Rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo . . . . .	22
6.4.3. Ecuaciones que definen la rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo . . . . .	26
6.4.4. Movimiento plano general . . . . .	26
6.4.5. Ecuaciones de movimiento de un cuerpo rígido . . . . .	27
6.4.6. Cantidad de movimiento angular de un cuerpo rígido en movimiento plano . . . . .	28
6.4.7. Movimiento plano de un cuerpo rígido . . . . .	30
6.5. Resortes . . . . .	32
6.5.1. Ley de Hooke . . . . .	32
6.5.2. Tipos de resortes: Tracción, compresión y torsión . . . . .	32
6.6. Solenoides . . . . .	33
<b>7. Un mecanismo bio-inspirado</b>	<b>35</b>
7.1. El salto del Escarabajo Clic: Conceptos fundamentales . . . . .	36
7.1.1. Elementos para almacenamiento de energía mecánica . . . . .	36
7.2. El modelo de Evans y primera propuesta de mecanismo . . . . .	37
7.2.1. Mecanismo de Evans . . . . .	37
7.2.2. Primera propuesta: Diseño, prototipo y dificultades . . . . .	38
7.3. Segunda propuesta: Una mejor aproximación . . . . .	42
7.3.1. Pruebas del mecanismo . . . . .	43
<b>8. Buscando similitudes</b>	<b>47</b>
8.1. Parámetros del salto del Escarabajo Clic . . . . .	47
8.1.1. Ángulo de despegue . . . . .	48
8.1.2. Perfil del escarabajo en el despegue . . . . .	48
8.2. Poniendo a prueba el mecanismo . . . . .	48
8.2.1. Desarrollo de la plataforma de pruebas . . . . .	48
8.2.2. Pruebas controladas . . . . .	50
8.2.3. Resultados de las pruebas . . . . .	51
8.2.4. Conclusiones de pruebas . . . . .	52
8.2.5. ¿Es el mecanismo funcional? . . . . .	53
8.2.6. Limitaciones de la plataforma de pruebas . . . . .	54
<b>9. Mejorando los diseños</b>	<b>65</b>
9.1. Un nuevo diseño para el mecanismo . . . . .	65
9.1.1. Comparación de las propuestas . . . . .	66
9.2. Automatización de la plataforma de pruebas . . . . .	66
9.2.1. Selección de elementos de automatización . . . . .	68
9.2.2. Plataforma de pruebas automatizada . . . . .	68
<b>10. Caracterización del mecanismo</b>	<b>73</b>
10.1. Masas e inercias . . . . .	73
10.2. Modificación del mecanismo . . . . .	73
10.2.1. Masas Pasco . . . . .	73

10.2.2. Porta masas Pasco . . . . .	74
10.2.3. Modificación a dimensiones y diseño del mecanismo . . . . .	74
10.3. Pruebas realizadas . . . . .	76
10.3.1. Relación 1:1 . . . . .	76
10.3.2. Relación 2:1 . . . . .	77
10.4. Análisis cualitativo del mecanismo . . . . .	77
10.4.1. Modelo de Ribak . . . . .	80
10.4.2. Análisis del centro de masa . . . . .	81
10.4.3. Conclusión de las pruebas . . . . .	84
<b>11. Plataforma robótica</b>	<b>85</b>
11.1. Diseño del vehículo . . . . .	85
11.1.1. Mecanismo de carga y liberación . . . . .	86
11.2. Pruebas realizadas . . . . .	88
11.2.1. Primeras pruebas . . . . .	88
11.2.2. Pruebas exitosas . . . . .	88
11.2.3. Observaciones de las pruebas . . . . .	89
<b>12. Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>13. Recomendaciones</b>	<b>93</b>
<b>14. Bibliografía</b>	<b>95</b>
<b>15. Anexos</b>	<b>97</b>
15.1. Planos de construcción de mecanismo . . . . .	97
15.2. Planos de construcción de mecanismo con masas variables . . . . .	97
15.3. Planos de construcción de plataforma de pruebas . . . . .	97
15.4. Planos de construcción de plataforma robótica . . . . .	97



1. Modelo de etapa de pre-salto [1]	4
2. Modelo despegue [1]	4
3. Modelo en vuelo [1]	4
4. Robot SandFlea [2]	4
5. Escarabajo Clic ( <i>Elateridae</i> ) [5]	11
6. Morfología del Escarabajo Clic [1]	12
7. Etapas del salto del Escarabajo Clic [1]	13
8. Anatomía de la bisagra	13
9. Etapa de despegue	14
10. Bocetos del despegue	15
11. Velocidades y ángulos de despegue	15
12. Modelo mecánico del escarabajo propuesto por Ribak [6]	16
13. Función de velocidad angular del Escarabajo Clic	18
14. Tipos de eslabones [7]	19
15. Algunos ejemplos de juntas [7]	20
16. Posición de partículas en un cuerpo rígido [10]	21
17. Rotación de un cuerpo rígido [10]	22
18. Rotación de un cuerpo rígido [10]	23
19. Placa representativa de un cuerpo rígido en rotación [10]	25
20. Componentes de la aceleración en placa representativa en rotación [10]	25
21. Movimiento plano de rueda [10]	26
22. Caso general del movimiento plano [10]	27
23. Fuerzas actuando sobre un cuerpo rígido [10]	27
24. Cuerpo rígido como un sistema de partículas [10]	28
25. Sistemas equivalentes [10]	28
26. Cantidad de movimiento angular en placa representativa [10]	29
27. Placa bajo fuerzas externas [10]	30
28. Placa en traslación [10]	31
29. Placa en rotación centroidal [10]	31
30. Placa en movimiento plano [10]	32
31. Resortes comunes	33
32. Resorte de torsión [14]	33

33. Campo magnético en un solenoide [15]	34
34. Diagrama de timbre simple [15]	34
35. Click Beetle, en su posición arqueada, a punto de ejecutar el salto	35
36. Mecanismo propuesto por Evans [4]	37
37. Modelo de propuesta de mecanismo 1	38
38. Propuesta de mecanismo en Working Model 2D	39
39. Simulación de comportamiento de propuesta 1 en Working Model 2D	40
40. Trayectoria del COM de mecanismo	40
41. Prototipo de mecanismo, propuesta 1	41
42. Prototipo de mecanismo, propuesta 2	43
43. Dimensiones del mecanismo	43
44. Diagrama de funcionamiento del mecanismo	44
45. Fotograma de prueba realizada	45
46. Mecanismo en acción	46
47. Mecanismo en acción	46
48. Plataforma de pruebas	49
49. Pieza de liberación de la plataforma de pruebas	49
50. Mecanismo cargado en la plataforma de pruebas	50
51. Diagrama de grabación de pruebas	51
52. Posición del centro de masa asumida para las pruebas	51
53. Resultados de prueba: Resorte 1	55
54. Resultados de prueba: Resorte 2	56
55. Resultados de prueba: Resorte 3	57
56. Resultados de prueba: Resorte 4	58
57. Resultados de prueba: Resorte 5	59
58. Resultados de prueba: Resorte 6	60
59. Resultados de prueba: Resorte 7	61
60. Resultados de prueba: Resorte 8	62
61. Resultados de prueba: Resorte 9	63
62. Nueva propuesta de diseño del mecanismo	66
63. Altura máxima con diseño anterior	67
64. Altura máxima con diseño nuevo	67
65. Solenoide utilizado para la automatización de la plataforma de pruebas [16]	68
66. Soporte de Solenoide	69
67. Pieza para punta de solenoide	69
68. Plataforma con solenoides implementados	70
69. Plataforma de pruebas automatizada	71
70. Interruptor de dos polos con doble tiro [17]	72
71. Diagrama esquemático de circuito de control	72
72. Masas Pasco [18]	74
73. Porta masas Pasco	74
74. Mecanismo con porta masas Pasco	75
75. Centro de masa de eslabón	75
76. Prueba con relación 1:1; 20g	78
77. Prueba con relación 1:1; 40g	78

78. Prueba con relación 2:1: Derecho 40g; Izquierdo: 20g	79
79. Prueba con relación 2:1: Derecho: 20g; Izquierdo: 40g	79
80. Modelo de mecanismo	81
81. Centro de masa: Posición inicial	82
82. Centro de masa: Posición final	83
83. Centro de masa: Posición inicial	84
84. Centro de masa: Posición final	84
85. Plataforma robótica implementada	86
86. Mecanismo leva-seguidor modificado	87
87. Mecanismo leva-seguidor liberado	87
88. Plataforma en posición de prueba	88
89. Prueba fallida de plataforma	90
90. Prueba exitosa de plataforma	90



---

Lista de cuadros

---

1. Características de resortes	50
2. Resultados de pruebas	52
3. Masa de la plataforma	86



Los escarabajos de la familia *Elateridae* son insectos capaces de ejecutar un movimiento de *auto-volteo* cuando se encuentran en una posición invertida. Este comportamiento ha despertado gran interés debido a que el salto es ejecutado sin la intervención de las patas del insecto. La implementación de este comportamiento de auto-volteo en plataformas robóticas y vehículos terrestres puede presentar una gran ventaja al momento en que éstos se desplacen sobre un terreno agreste y escarpado.

En el presente trabajo se implementó un mecanismo de eslabones rígidos *saltador* que replica el comportamiento observado en los Escarabajos Clic. Este mecanismo fue evaluado y puesto a prueba para determinar, cualitativamente, similitudes entre el salto del escarabajo y el ejecutado por el modelo propuesto. Para realizar esta comparación se desarrolló una plataforma de pruebas, la cual permitía manipular y liberar el mecanismo bajo condiciones ideales y de forma controlada.

Estas pruebas determinaron que el movimiento del mecanismo no coincide directamente con lo observado en los escarabajos pero que la bio-inspiración detrás del diseño de la propuesta continúa siendo válida para la aplicación deseada.

A partir del primer modelo, se realizó una iteración del diseño del mecanismo, el cual mejoró el desempeño del mismo y se modificó el diseño de la plataforma de pruebas con el fin de mejorar las condiciones de liberación del prototipo. Utilizando el nuevo modelo del mecanismo y plataforma se realizaron pruebas con el fin de comprender el concepto detrás del comportamiento del mecanismo. Estas pruebas comprobaron que las masas e inercias de los eslabones del mecanismo son un factor importante para determinar el movimiento del mismo.

Finalmente, se construyó una plataforma robótica en la cual fue implementado el mecanismo propuesto, con el fin de demostrar la viabilidad del mecanismo para el auto-volteo de plataformas y vehículos terrestres. A partir de esto se concluyó que el mecanismo permite el auto-volteo pero su eficiencia será mayor en elementos a pequeña escala.



The beetles from the *Elaeteride* family are insects capable of performing a *self-righting* movement when they find themselves on an inverted position. This behavior has awoken great interest because the jump is executed without the intervention of the legs of the insect. The implementation of this self-righting behavior on robotic platforms and land vehicles could represent a great advantage when moving on steep terrain.

In the present work a *jumping* rigid link mechanism which emulates the behavior observed in the Click Beetle was implemented. This mechanism was evaluated and tested to determine, qualitatively, similarities between the jump of the beetle and the one executed by the mechanism. To perform this comparison, a test bed was developed. This test bed allowed to handle and release the mechanism under ideal conditions and in a controlled form.

These tests determined that the movement performed by the mechanism doesn't match directly with the one observed on the beetles but the bio-inspiration behind the design of it is valid for the desired application.

The model of the mechanism was iterated, which improved the performance of it. The test bed was also modified to enhance the release conditions. Using the new mechanism and test bed model tests were made in order to understand the notion behind the mechanism behavior. These tests proved that the masses and inertia of the links of the mechanism are an important element to determine its movement.

Finally, a robotic platform that implemented the proposed mechanism was built to show the viability of the mechanism for the self-righting of platforms and land vehicles. From this it was concluded that the mechanism allows the self-righting but its efficiency would be better in small scale.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La robótica es una de las ramas de la ingeniería con mayor desarrollo en los últimos tiempos. Sus aplicaciones van desde pequeños vehículos terrestres hasta grandes brazos robóticos en líneas de ensamblaje. La robótica está presente en todas partes, en todo el mundo.

A pesar de que la robótica puede considerarse una disciplina *moderna*, una de sus ramas ha sentado sus bases en el estudio de elementos y sistemas con millones de años de antigüedad. Esta rama es la robótica *bio-inspirada*, la cual toma *inspiración* de organismos biológicos para el desarrollo de sistemas dedicados a resolver problemas de la ingeniería.

Hay una gran ventaja en el desarrollo de sistemas inspirados en organismos biológicos: Estos seres han desarrollado y perfeccionado sus características durante miles de años. La selección natural los ha hecho los más capaces en cada una de sus áreas. Los topos son excelentes excavadores, las mantis religiosas son excelentes cazadoras y los guepardos son los animales más rápidos de la tierra. Años de evolución han dado como resultado capacidades asombrosas.

Un organismo con una característica interesante es el Escarabajo Clic. Este insecto, al encontrarse en una posición invertida, ejecuta un potente salto con el fin de buscar caer nuevamente sobre sus patas. Este comportamiento de *auto-volteo* ha llamado la atención de muchos debido a que se lleva a cabo sin la intervención de las patas del insecto.

Este comportamiento de auto-volteo sería ideal para vehículos terrestres que se mueven sobre terreno escarpado e irregular, con altas probabilidades de perder el equilibrio y perder su orientación funcional.

El presente trabajo expone la primera fase de desarrollo de un mecanismo *saltador* inspirado en el Escarabajo Clic con el fin de buscar su implementación en plataformas robóticas o vehículos terrestres.



El Escarabajo Clic ha sido el objeto de estudio de varios investigadores, quienes han descrito detalladamente la morfología y características de los elementos involucrados en el mecanismo encargado de ejecutar el salto. Sin embargo, pocos de estas investigaciones han sido orientados al desarrollo de modelos o prototipos que busquen implementar lo descubierto en otras aplicaciones.

## 2.1. Estudio de Universidad de Illinois (E.E.U.U)

Una excepción a esto fue la investigación llevada a cabo por Bolmin *et. al* [1] en año 2017. Este grupo de investigación está conformado por estudiantes de ingeniería mecánica y biología de la Universidad de Illinois (E.E.U.U). La principal motivación de esta investigación fue comprender el salto del Escarabajo Clic y los principios por los cuales se rige con el objetivo de formular técnicas de auto-volteo para aplicaciones en robótica.

La primera fase de su trabajo consistió en la descripción detallada de las etapas del salto del Escarabajo Clic (presentado en su mayoría en la Sección 6.1), la propuesta de modelos para cada uno de las etapas y la evaluación de los mismos. En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los modelos propuestos.

Para el tiempo en el que se escribe este documento, los trabajos futuros consistirán en la validación de los modelos a través de la implementación de prototipos físicos.

## 2.2. Robot *SandFlea* (Boston Dynamics)

A pesar de que no hay más investigación alrededor del Escarabajo Clic en aplicaciones de robótica, se han desarrollado una gran variedad de robots saltadores bio-inspirados.

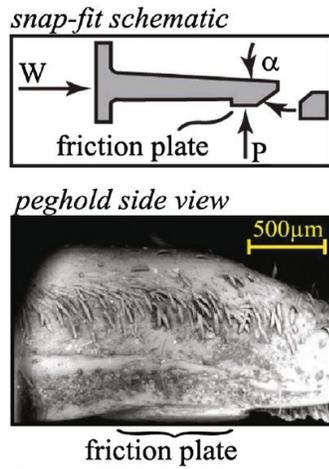


Figura 1: Modelo de etapa de pre-salto [1]

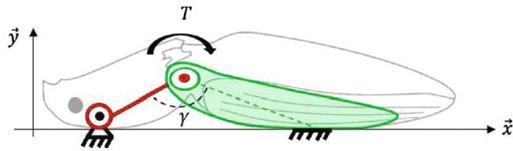


Figura 2: Modelo despegue [1]



Figura 3: Modelo en vuelo [1]

Entre estos se encuentra el robot *Sandflea*, desarrollado por la empresa Boston Dynamics, inspirado en el salto ejecutado por la pulga de mar. El robot se muestra en la Figura 4.

Este robot es un vehículo capaz de efectuar un salto de 10 metros de altura por medio de un mecanismo de catapulta accionado por medio de gas propano. Fue diseñado principalmente para evadir obstáculos que pueda encontrar en su camino.

Esta plataforma robótica demuestra los impresionantes resultados que se pueden obtener por medio de la bio-inspiración.



Figura 4: Robot SandFlea [2]

El desplazamiento a lo largo de un ambiente agreste y escarpado es una de las mayores dificultades para cualquier vehículo terrestre. Los automóviles todo-terreno poseen una gran cantidad de elementos que otorgan estabilidad al vehículo y, sin embargo, es necesario una conducción muy cuidadosa para evitar que el vehículo pierda el equilibrio y vuelque.

Ahora, si se considera un vehículo o robot de exploración terrestre simple atravesando por un terreno irregular y empinado. En estas condiciones hay una gran posibilidad de que el robot vuelque y requiera de intervención humana para recuperar su orientación regular. Esta situación puede presentarse periódicamente mientras el vehículo se encuentre desplazándose sobre este terreno. La participación humana en este proceso empobrece la tarea de exploración del vehículo y elimina por completo el concepto de automatización.

El desarrollo del mecanismo propuesto en este trabajo permitirá que pequeñas plataformas robóticas terrestres sean capaces de recuperar su orientación funcional de forma automática. Esto permitirá que robots de exploración o de rescate terrestres sean más independientes del usuario que los controla.

La observación, investigación y caracterización del salto del Escarabajo Clic permitirá conocer en mayor medida el comportamiento de este insecto y los fundamentos físicos detrás del mismo. Además, la información y resultados obtenidos de las pruebas efectuadas pueden servir de base para la expansión de la investigación o el desarrollo de nuevas soluciones al problema. Nuevos investigadores pueden buscar mejorar el mecanismo con el fin de que el movimiento de auto-volteo sea estable y sea capaz de equilibrar robots cada vez más grandes y pesados.

Como se mencionó en el capítulo anterior, en el año 2017 la Universidad de Illinois (E.E.U.U.) inició una investigación sobre el Escarabajo Clic. Su objetivo es observar y modelar el salto del escarabajo para el desarrollo de exploradores terrestres robustos bio-inspirados. Su investigación ha consistido en la documentación del salto del escarabajo, análisis de la cinemática del salto, cálculo de la fricción en el *mecanismo interno* del escarabajo, modelado de la dinámica del salto, simulación de la trayectoria aérea del insecto

y diseño de prototipos. Actualmente, el equipo de investigadores planea implementar los prototipos en un robot móvil (Yoksoulian, 2017) [3].

La investigación propuesta en el presente trabajo permitirá colocar a Guatemala junto a Estados Unidos en la línea de investigación de vehículos auto-volteantes bio-inspirados en el Escarabajo Clic. Esto permite que la investigación científica en Guatemala sea cada vez más relevante y, por consiguiente, inspire nuevas líneas de investigación o desarrollo de proyectos con gran impacto en la comunidad científica y social.

Finalmente, al ser esta una nueva línea de investigación, se requerirá de la construcción de varios prototipos sencillos y poco robustos. La universidad cuenta con impresoras 3D, cortadora láser, fresadora de placas de circuitos, fresadora CNC y otras herramientas ideales para la construcción de estos prototipos. La disponibilidad de estas herramientas permite un avance ininterrumpido de la investigación.

### 4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un mecanismo de auto-volteo para plataformas robóticas móviles terrestres bio-inspirado en la familia de escarabajos *Elateriade*.

### 4.2. Objetivos específicos

- Proponer y caracterizar un mecanismo de eslabones rígidos que reproduzca la mecánica de auto-volteo observado en los Escarabajos Clic.
- Diseñar y construir una plataforma de pruebas para la evaluación del funcionamiento del mecanismo bajo condiciones controladas.
- Comparar cualitativamente los datos obtenidos a través del mecanismo propuesto contra la información disponible del comportamiento del Escarabajo Clic.
- Diseñar y construir una plataforma robótica de pruebas que implemente el mecanismo de auto-volteo desarrollado.



El presente trabajo tiene como objetivo comprender los conceptos básicos detrás del salto ejecutado por el Escarabajo Clic (*Elateridae*) y utilizar dichos conceptos para el desarrollo de un mecanismo *saltador* que replique el comportamiento observado en los escarabajos.

El mecanismo propuesto será evaluado utilizando una plataforma de pruebas, la cual permitirá analizar el comportamiento del mecanismo bajo condiciones controladas y óptimas para la recolección de información y datos. La información obtenida en estas pruebas será utilizada para buscar similitudes entre el mecanismo y el salto de los escarabajos. Estas similitudes serán exclusivamente cualitativas y en base a ellas se determinará si el mecanismo reproduce el movimiento deseado.

Además, se utilizará esta información para intentar deducir las fuerzas que actúan sobre el mecanismo y cómo éstas generan el movimiento observado. Esta deducción será principalmente cualitativa, es decir, no se desarrollará un modelo matemático del sistema capaz de determinar las fuerzas resultantes que actúan sobre el mecanismo ni se tratará de determinar las fuerzas internas del sistema.

Finalmente, el mecanismo desarrollado se implementará en una plataforma robótica de pruebas para demostrar el concepto de auto-volteo. Esta plataforma será construida únicamente con fines *ilustrativos*. Esto se refiere a que el diseño de la plataforma robótica no deberá cumplir con requerimientos de eficiencia energética, movilidad ni autonomía. Esta se utilizará únicamente para demostrar cómo es posible implementar el mecanismo desarrollado y sus limitantes. También permitirá evaluar su desempeño y buscar fuentes de mejora.



## 6.1. El Escarabajo Clic

Los escarabajos de la familia *Elateridae*, comúnmente conocidos como Escarabajos Clic, son una familia del orden *Coleoptera*. Estos escarabajos se caracterizan por su mecanismo de auto-volteo, el cual es utilizado para ponerse de pie cuando quedan patas arriba y, en otros casos, para escapar de depredadores.

Según Evans [4], un Escarabajo Clic invertido es capaz de realizar una acción de plegamiento que desencadena un salto casi vertical de 0.3 m. Este salto es de particular interés para muchos investigadores debido a que la ejecución del mismo se lleva a cabo sin la intervención de las patas del insecto. A pesar de que existen otros organismos capaces de ejecutar saltos sin utilizar sus patas, entre los que se destaca el orden *Collembola*, el mecanismo presente en los Escarabajos Clic es único.

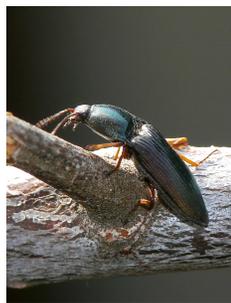


Figura 5: Escarabajo Clic (*Elateridae*) [5]

### 6.1.1. Acerca del Escarabajo Clic

Muchos insectos efectúan saltos para su desplazamiento o para escapar de posibles depredadores. Sin embargo, la investigación llevada a cabo por Ribak [6] demostró que el salto del Escarabajo Clic es generalmente vertical, por lo que la distancia longitudinal recorrida es muy pequeña en comparación con la altura del salto. De esto es posible deducir de que el salto efectuado por el Escarabajo Clic es utilizado principalmente para el auto-volteo.

### 6.1.2. El salto del Escarabajo Clic

Evans [4] describió en detalle la morfología del Escarabajo Clic y la mecánica de su salto.

El Escarabajo Clic realiza su salto desde una posición invertida al arquear su cuerpo mientras almacena energía potencial en músculos alojados en el protórax, exoesqueleto y tendones. Esta energía es liberada súbitamente para ejecutar el salto.

#### La morfología del Escarabajo Clic

En general, es posible dividir el cuerpo del Escarabajo Clic en tres partes principales: Dos unidades de masa y una pequeña bisagra o eje que las conecta (Figura 6).

La cabeza y el protórax conforman la primera unidad de masa, mientras que el mesotórax, metatórax y el abdomen constituyen la segunda unidad de masa. La bisagra se conforma de un *labio mesosternal* y una pequeña *clavija*.

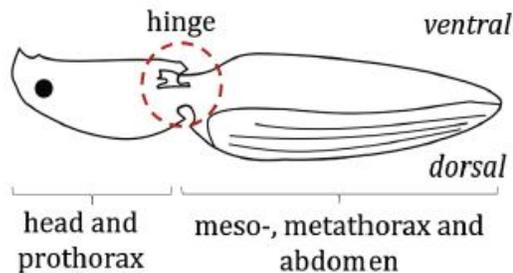


Figura 6: Morfología del Escarabajo Clic [1]

#### Las etapas del salto del Escarabajo Clic

En la investigación realizada por la Universidad de Illinois, Bolmin *et.al.* [1] dividieron el salto del Escarabajo Clic en tres distintas etapas: Pre-salto, despegue y en vuelo (Figura 7).

El análisis de cada una de estas etapas permite deducir la mecánica del salto.

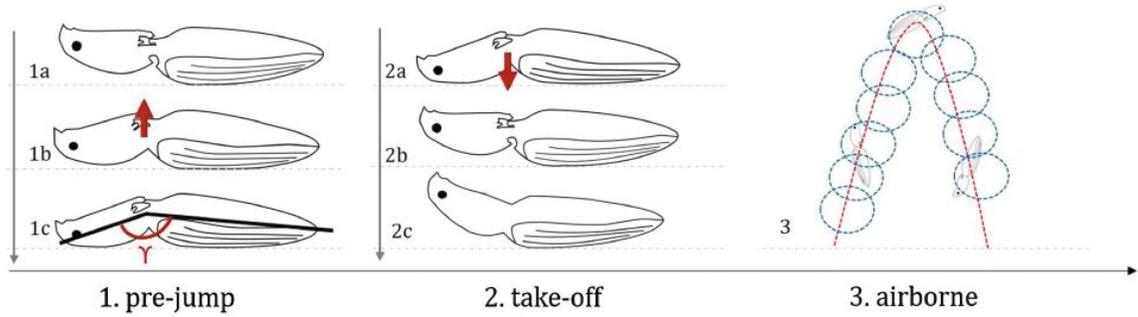


Figura 7: Etapas del salto del Escarabajo Clic [1]

### Etapa de pre-salto

La bisagra del Escarabajo Clic está compuesta por una clavija y un labio mesosternal. La forma en la que estos se encuentran posicionados en el cuerpo del escarabajo les permite deslizarse uno respecto al otro o mantener su posición (Figura 8-1).

Las investigaciones realizadas por Evans [4] demostraron que la remoción o el daño a estas estructuras resulta en la incapacidad del escarabajo de realizar el salto. De esto es posible deducir que la clavija y el labio mesosternal conforman el mecanismo encargado de la carga y liberación de la energía.

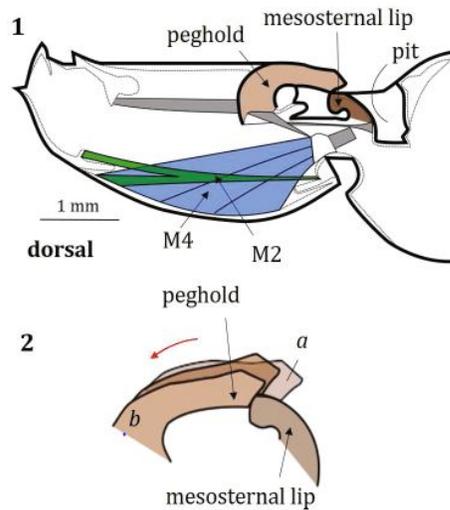


Figura 8: 1: Anatomía de la bisagra basado en los bosquejos realizados por Evans [4]. El escarabajo se encuentra patas arriba. Los músculos señalados como M4 y M2 almacenan energía mecánica antes del salto. 2: En la etapa de Pre-salto, la clavija se desliza sobre el labio mesosternal y se detiene cuando cae en la cavidad semi-esférica del labio mesosternal (posición b). [1]

Durante esta etapa, la clavija se desliza sobre el labio mesosternal desde la posición a, hacia la posición b (Figura 8-2). Al finalizar esta etapa, la clavija se detiene en una cavidad semiesférica ubicada en el extremo del labio mesosternal. Esta posición se mantiene por medio de la fricción entre los dos elementos, mientras se transfiere energía a los músculos M4 y M2, la cutícula y otros elementos de almacenamiento de energía biológicos.

Cuando se ha almacenado la energía suficiente para realizar el salto, el escarabajo se libera de su posición arqueada: La clavija se desliza sobre el labio mesosternal y regresa a su cavidad (la clavija se mueve desde la posición b a la posición a como se muestra en la Figura 8-2). Bolmin *et. al.* [1] asumieron que el deslizamiento de la clavija sobre el labio mesosternal es lo que provoca el particular sonido de 'clic' cuando el escarabajo despega.

## Etapa de despegue

Bolmin *et. al.* [1] definieron que esta etapa la conforma el movimiento del escarabajo desde que la energía es liberada (cuando se escucha el *clic*) hasta el momento en que el escarabajo abandona el suelo.

El movimiento de la bisagra hacia abajo, causando la rotación de las dos unidades de masa alrededor de él mismo, es el factor representativo de esta etapa (Figura 9).

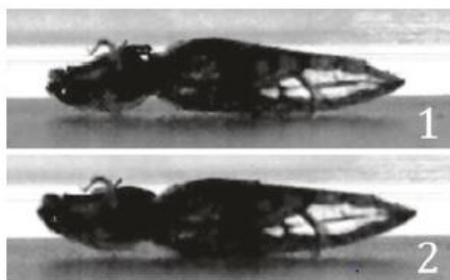


Figura 9: Imágenes tomadas por Bolmin *et.al.* [1] de la etapa de despegue. 1: Posición arqueada inicial. 2: Momento en que el abdomen abandona el suelo.

## Etapa en vuelo

Esta etapa se lleva a cabo desde que el escarabajo abandona el suelo hasta que vuelve a entrar en contacto con el mismo. Evans [4] realizó bocetos de la forma en que el escarabajo despega del suelo, los cuales pueden observarse en la Figura 10. Esta etapa fue estudiada tanto por Ribak [6] y por Bolmin *et. al.* [1] de donde obtuvieron resultados acerca del ángulo y velocidad de despegue. En ambos casos, los ejemplares observados mostraron ángulos de despegue entre  $82^\circ$  y  $89^\circ$  y velocidades de despegue entre 1.4 a 1.9 m/s (Figura 11). La investigación realizada por Ribak [6] demostró que los escarabajos tienen una probabilidad del 50% de aterrizar sobre sus patas. Esto se ve reflejado en las observaciones de Bolmin *et. al.* [1] en donde los escarabajos caían derechos o patas arriba de forma aleatoria; si era necesario, los escarabajos repetían el salto para caer sobre sus patas.

### 6.1.3. Modelo bio-mecánico de Ribak

Ribak propuso un modelo mecánico para describir el movimiento del escarabajo Clic en la etapa de despegue.

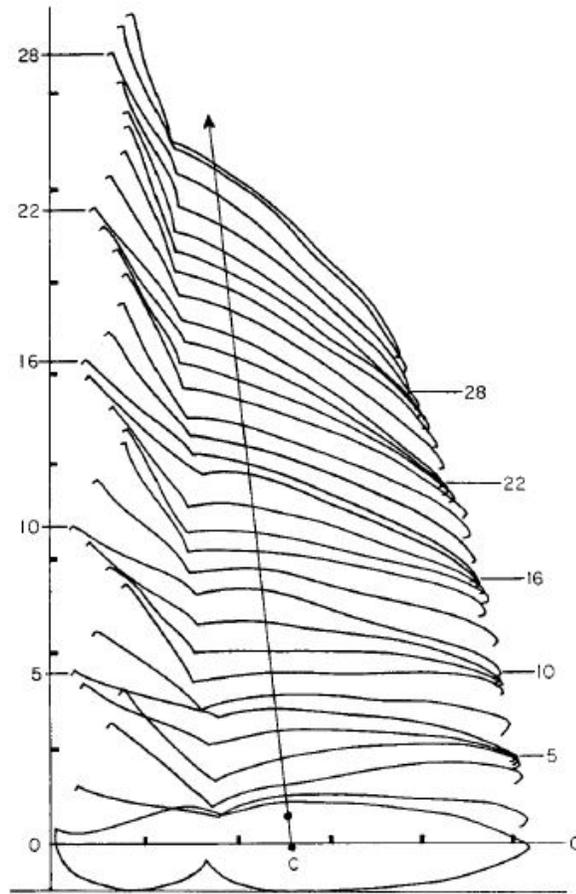


Figura 10: Boceto del despegue del Escarabajo Clic realizado por Evans [4]

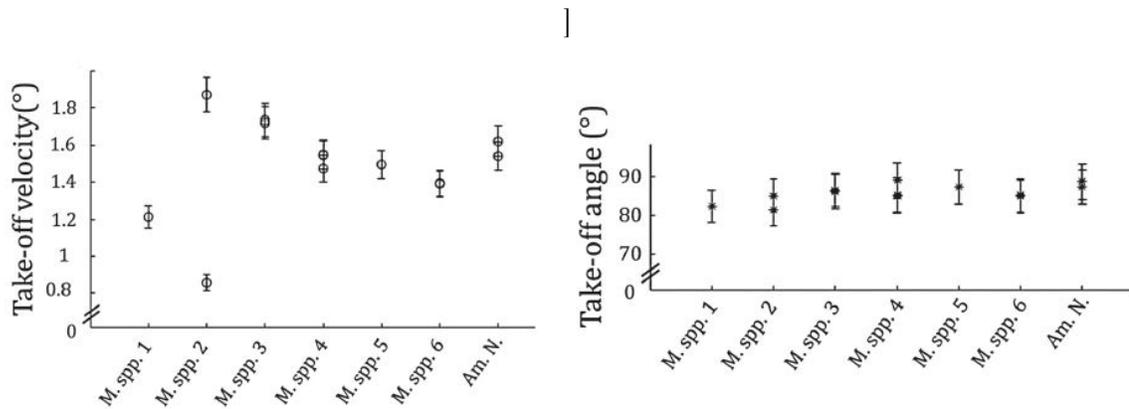


Figura 11: Velocidad de despegue (Izquierda) y ángulo de despegue (Derecha) de los escarabajos observados por Bolmin *et. al.* [1]

Este modelo presenta el cuerpo del escarabajo como dos unidades rígidas que rotan sobre una bisagra sin fricción. El modelo del escarabajo se muestra en la Figura 12. En este diagrama  $\alpha$  y  $\beta$  representan el desplazamiento angular, respecto a la horizontal, de las dos masas (cabeza y cuerpo);  $\theta$  es la flexión total del cuerpo y es igual a la suma de  $\alpha$  y  $\beta$ .

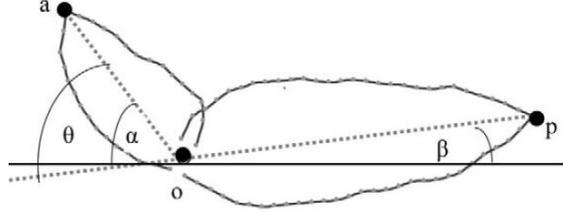


Figura 12: Modelo mecánico del escarabajo propuesto por Ribak [6]

En el momento en el que el escarabajo hace la transición de la etapa de pre-salto a la de despegue, la energía elástica almacenada en los músculos se convierte en un par de momento  $M$  que causa que las dos unidades roten una respecto a la otra. Se asume que el momento  $M$  no varía en el periodo que dura la flexión del cuerpo y, por lo tanto,  $dM/dt = 0$ . De esta forma, la aceleración angular de cada una de las unidades resulta ser constante y cada unidad gira de acuerdo a la ecuación:

$$M = I_o \dot{\omega} \quad (1)$$

Donde  $\dot{\omega}$  es la aceleración angular de la unidad de masa y  $I_o$  es el momento de inercia de la unidad respecto a la bisagra.

Como las dos unidades de masa rotan bajo el efecto del mismo momento  $M$  pero en sentidos opuestos, se tiene que:

$$I_{(A)o} \dot{\omega}_A = I_{(P)o} \dot{\omega}_P \quad (2)$$

Los subíndices  $A$  y  $P$  corresponden a cada una de las unidades, de acuerdo con lo mostrado en el modelo de la Figura 12.

Al reordenar los términos, se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{\omega}_P = \frac{I_{(A)o}}{I_{(P)o}} \dot{\omega}_A = B \dot{\omega}_A \quad \text{donde} \quad B = \frac{I_{(A)o}}{I_{(P)o}} \quad (3)$$

Ahora, las ecuaciones de aceleración angular constante para  $\alpha$  y  $\beta$  para el periodo de duración de la flexión  $t_f$  están dadas por las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{1}{2} \dot{\omega}_A t_f^2 \quad (4a)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \dot{\omega}_A t_f^2 B \quad (4b)$$

A partir de estas expresiones se obtiene la siguiente igualdad:

$$\beta = \alpha B \quad (5)$$

Finalmente, recordando que  $\theta = \alpha + \beta$ , es posible obtener expresiones para  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\theta}{1 + B} \quad (6a)$$

$$\beta = \frac{B\theta}{1 + B} \quad (6b)$$

La Ecuación (6) muestra que los desplazamientos angulares de las dos unidades de masa alrededor de la bisagra dependen únicamente del ángulo de flexión del escarabajo ( $\theta$ ) y la relación de momentos de inercia de las unidades ( $B$ ).

### Punto de contacto con el suelo

Otro descubrimiento realizado por Ribak [6] fue el de que si la fuerza de despegue que impulsa al escarabajo por los aires no se encuentra alineada con el punto de contacto del escarabajo con el suelo, se genera un momento que impone una velocidad angular al escarabajo. Esta es la razón por la cual el escarabajo ejecuta varias revoluciones en el aire.

Ribak desarrolló una función que retorna la velocidad angular adquirida por el escarabajo en función al desfase de la fuerza de despegue con el punto de contacto con el suelo. El modelo se muestra en la Figura 13. Como se observa, la velocidad angular transferida puede ser positiva o negativa dependiendo de si el punto de contacto con el suelo se encuentra a la derecha o izquierda de la fuerza de despegue.

## 6.2. Cinemática de mecanismos

Es importante separar los conceptos de *cinemática* y *cinética*. La cinemática se refiere al estudio del movimiento sin considerar las fuerzas que lo generan y la cinética se refiere al estudio de las fuerzas sobre sistemas en movimiento.

Es importante tener en mente que estos conceptos no son independientes; esta división se realiza con propósitos didácticos y de clasificación. El diseño y análisis de un mecanismo requiere tanto de un estudio cinemático como cinético.

Uno de los objetivos fundamentales de la cinemática es el de diseñar el movimiento o comportamiento requerido de las partes mecánicas involucradas y luego calcular las posiciones, velocidades y aceleraciones que se generarán a partir del movimiento propuesto.

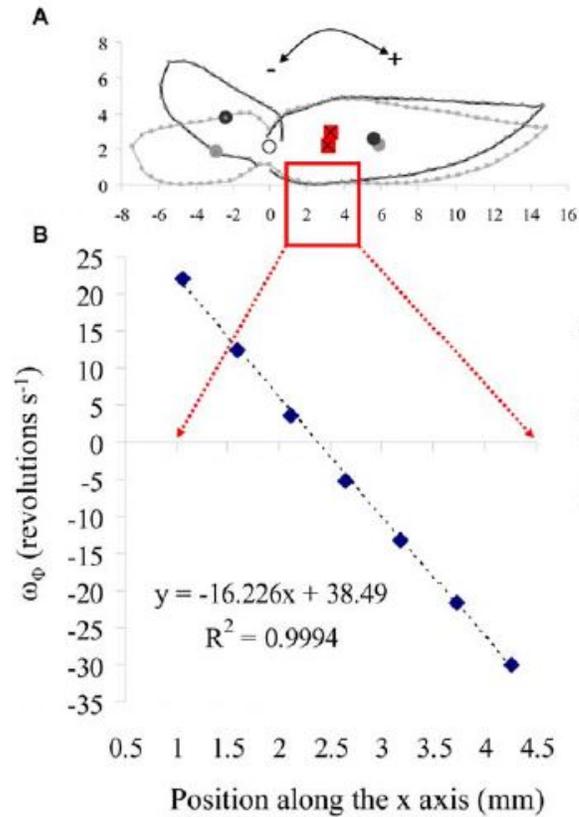


Figura 13: Función de velocidad angular adquirida por el Escarabajo Clic respecto a su punto de contacto con el suelo [6].

### 6.2.1. Definición de mecanismo

Norton [7] define un mecanismo como *un dispositivo que transforma el movimiento en un patrón deseable y, por lo general, desarrolla fuerzas muy bajas y transmite poca potencia.*

Otra definición de mecanismo dada por Norton es la de *un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada.*

### 6.2.2. Elementos presentes en mecanismos

Los mecanismos están compuestos de eslabones y juntas.

#### Eslabón

Un eslabón es un cuerpo rígido que posee por lo menos dos nodos, los cuales son los puntos en los cuales el eslabón se uno a otros eslabones (Figura [14]).

Existen distintos tipos de eslabones, los cuales se clasifican de acuerdo a la cantidad de nodos que poseen:

- **Eslabón binario:** Posee dos nodos
- **Eslabón ternario:** Posee tres nodos
- **Eslabón cuaternario:** Posee cuatro nodos
- Y así sucesivamente

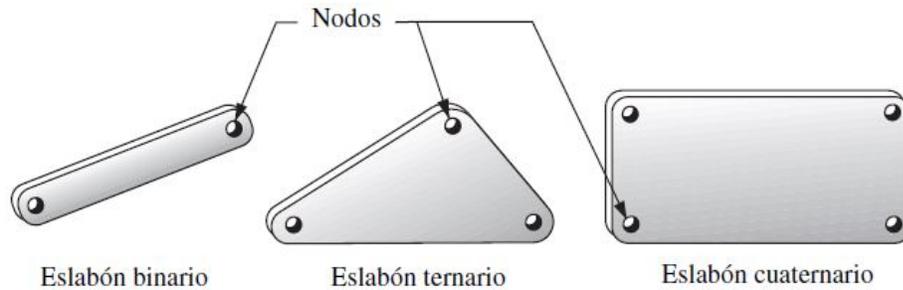


Figura 14: Tipos de eslabones [7]

## Juntas

Una junta es una conexión entre dos o más eslabones, la cual permite que exista algún tipo de movimiento entre ellos. Estas se pueden ser clasificadas tomando en cuenta distintos criterios:

1. Por el tipo de contacto entre los eslabones
2. Número de grados de libertad permitidos/restringidos por la junta
3. Por el tipo de cierre físico de la junta
4. Por el número de eslabones que une la junta

Algunos ejemplos de juntas se muestran en la Figura [15]

### 6.2.3. Grados de libertad (GDL) o movilidad de un mecanismo plano

La movilidad de un sistema mecánico ( $M$ ) puede clasificarse de acuerdo al número de grados de libertad que posee. Norton [7] define los grados de libertad de un mecanismo como *el número de parámetros independientes que se requieren para definir de manera única su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo*. Otra definición proporcionada por Norton es la de *el número de entradas que se necesita proporcionar para crear una salida predecible*. Un aspecto importante es que los grados de libertad se definen con respecto a un marco de referencia seleccionado.

Para determinar los grados de libertad de un mecanismo deben de tomarse en cuenta el número de eslabones que lo conforman, los tipos de juntas y la relación que existen entre estos dos elementos.

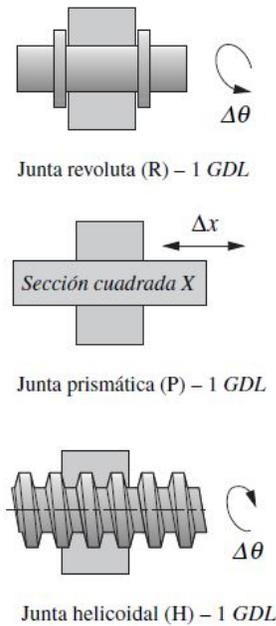


Figura 15: Algunos ejemplos de juntas [7]

Los grados de libertad (GDL) de un mecanismo con movimiento planar se obtienen utilizando la ecuación de Grueber-Kutzbach:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (7)$$

En donde:

$M =$  GDL

$L =$  número de eslabones

$J_1 =$  número de juntas de 1 GDL

$J_2 =$  número de juntas de 2 GDL

### 6.3. Centro de masa

El centro de masa de un sistema de partículas es el punto geométrico único que se mueve como si en él estuviera concentrada toda la masa del sistema y si sobre él se aplicaran todas las fuerzas externas que actúan sobre el sistema [8]. Su posición depende de la distribución de masa dentro del sistema de partículas.

#### 6.3.1. Posición del centro de masa

Se supone un sistema plano compuesto de muchas partículas con masas  $m_1, m_2, m_3$ , etcétera. Las coordenadas de cada una de las partículas se denota con el par  $(x_i, y_i)$  con  $i = 1, 2, 3, \dots$ . La posición del centro de masa, denotado por  $(x_{cm}, y_{cm})$ , está dada por

$$x_{cm} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} \quad (8)$$

$$y_{cm} = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots} = \frac{\sum_i m_i y_i}{\sum_i m_i}$$

La Ecuación 8 es utilizada para el cálculo de centros de masa de cuerpos o sistemas de partículas planos.

La posición de centro de masa de cuerpos tridimensionales se denota con el vector de posición  $\mathbf{r}_{cm}$  y se expresa en términos de los vectores de posición de las partículas  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots$

$$\mathbf{r}_{cm} = \frac{m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2 + m_3\mathbf{r}_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots} = \frac{\sum_i m_i \mathbf{r}_i}{\sum_i m_i} \quad (9)$$

En términos estadísticos, el centro de masa es una *posición media ponderada por la masa* de las partículas 9.

## 6.4. Dinámica de cuerpos rígidos

### 6.4.1. Traslación

Se considera un cuerpo rígido en traslación. Esta traslación puede ser tanto rectilínea como curvilínea. Ahora, se seleccionan dos partículas dentro del cuerpo y se nombran como  $A$  y  $B$ . Si se denotan los vectores de posición de estos puntos como  $\mathbf{r}_A$  y  $\mathbf{r}_B$ , respectivamente, respecto a un sistema de coordenadas fijo y al vector que une  $A$  con  $B$  se define como  $\mathbf{r}_{B/A}$ , se obtiene:

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A + \mathbf{r}_{B/A} \quad (10)$$

Esta relación se ejemplifica en la Figura 16.

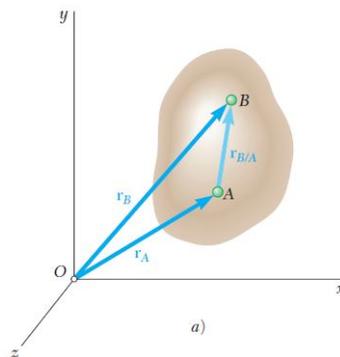


Figura 16: Posición de partículas en un cuerpo rígido 10

Ahora, al derivar la ecuación [10](#) respecto al tiempo se obtiene la expresión:

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{v}_A \quad (11)$$

Se debe recordar que, por la definición de un cuerpo rígido en traslación, el vector  $\mathbf{r}_{B/A}$  debe mantener una distancia constante en todo momento. Por lo tanto, tasa de cambio respecto al tiempo es cero.

Al derivar una vez más respecto al tiempo se obtiene:

$$\mathbf{a}_B = \mathbf{a}_A \quad (12)$$

A través de las expresiones obtenidas en la Ecuación [\(11\)](#) y [\(12\)](#) es posible concluir que *cuando un cuerpo rígido está en traslación todas las partículas que conforman al cuerpo poseen la misma velocidad y aceleración en todo momento.*

#### 6.4.2. Rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo

Se considera un cuerpo rígido que rota alrededor de un eje fijo  $AA'$ . Se selecciona un punto  $P$  dentro del cuerpo y se denota como  $\mathbf{r}$  su vector de posición respecto a un marco de referencia inercial. Para la simplificación de la deducción, se asumirá que este marco de referencia inercial está centrado en el punto  $O$ , el cual se encuentra sobre  $AA'$ . También se asumirá que el eje  $AA'$  está alineado con el eje  $z$ . La representación de este sistema se muestra en la Figura [17](#)

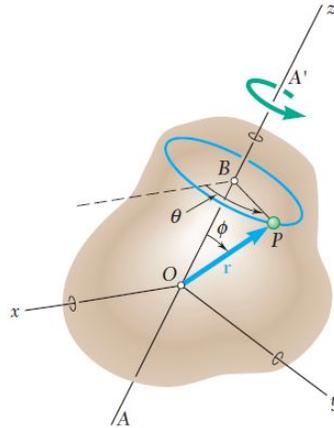


Figura 17: Rotación de un cuerpo rígido [10](#)

Sea  $B$  la proyección de  $P$  sobre el eje de rotación. Debido a que  $P$  debe permanecer a una distancia constante de  $B$ , éste describe un círculo de centro  $B$  y de radio  $r \sin \phi$ , donde  $\phi$  es el ángulo entre  $\mathbf{r}$  y  $AA'$ .

La posición de la partícula  $P$  y, en consiguiente, del cuerpo completo, está definido por el ángulo  $\theta$  que forma la línea  $BP$  con el plano  $zx$ . El plano descrito por  $\theta$  se conoce como la *posición angular* del cuerpo, la cual puede ser expresada en grados, radianes o revoluciones.

Ahora, se debe recordar que la velocidad  $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$  de cualquier partícula  $P$  es un vector tangente a la trayectoria de la misma, con magnitud  $v = ds/dt$ . En la Figura 17 se puede observar que la longitud  $\Delta s$  del arco que describe  $P$  cuando el cuerpo rígido rota un ángulo  $\Delta\theta$  es

$$\Delta s = (BP)\Delta\theta = (r \sin \phi)\Delta\theta$$

Si la expresión es dividida entre  $\Delta t$ , y se obtiene en el límite, cuando  $\Delta t$  tiende a cero, se obtiene la expresión:

$$v = \frac{ds}{dt} = r\dot{\theta} \sin \phi \quad (13)$$

De esta ecuación es posible concluir que la velocidad  $\mathbf{v}$  de  $P$  es un vector perpendicular al plano que contiene tanto a  $AA'$  como a  $\mathbf{r}$  y su magnitud está definida por la Ecuación 13).

Con este resultado es posible percatarse de que se obtendría el mismo resultado si se dibuja un vector  $\boldsymbol{\omega} = \dot{\theta}\mathbf{k}$  que sea paralelo al eje  $AA'$  y se formara el producto vectorial  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ , como se muestra en la Figura 18.

A partir de esto, se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (14)$$

El vector  $\boldsymbol{\omega}$  definido por

$$\boldsymbol{\omega} = \omega\mathbf{k} = \dot{\theta}\mathbf{k} \quad (15)$$

se conoce como la *velocidad angular* del cuerpo. La orientación de este vector cumple con la regla de la mano derecha en base al sentido de la rotación del cuerpo rígido.

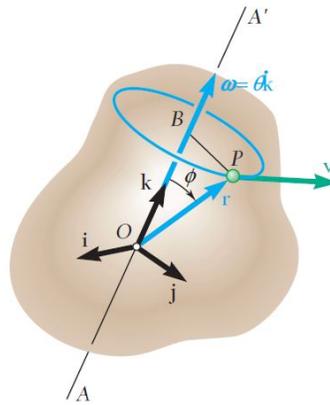


Figura 18: Rotación de un cuerpo rígido 10

La aceleración  $\mathbf{a}$  de la partícula  $P$  se determina al diferenciar la Ecuación (14) respecto al tiempo, con lo cual se obtiene:

$$\begin{aligned}\mathbf{a} &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \\ &= \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \\ &= \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}\end{aligned}\tag{16}$$

El vector  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  se denota con  $\boldsymbol{\alpha}$  y se denomina como *aceleración angular* del cuerpo rígido. Si se sustituye  $\mathbf{v}$  de la Ecuación (14) se obtiene

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})\tag{17}$$

Diferenciando la Ecuación (15) y recordando que  $\mathbf{k}$  es constante en magnitud y dirección se obtiene:

$$\boldsymbol{\alpha} = \alpha \mathbf{k} = \dot{\omega} \mathbf{k} = \ddot{\theta} \mathbf{k}\tag{18}$$

De esta forma, la aceleración angular de un cuerpo rígido en rotación es un vector a lo largo del eje de rotación.

Ahora, analizando detenidamente la Ecuación (17), se puede observar que la aceleración del punto  $P$  es la suma de dos vectores. Estos vectores son la componente tangencial y componente normal de la aceleración, respectivamente.

### Rotación de una placa representativa del cuerpo rígido

La rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje se puede representar por medio de la rotación de una placa representativa, la cual se encuentra en un plano perpendicular al eje de rotación. Para el análisis de este caso, se tomará el plano  $xy$  como el plano de referencia. Se supone que este plano coincide con el plano de la figura y que el eje  $z$  apunta hacia afuera del papel, como se muestra en la Figura 19.

Tomando en cuenta el diagrama de la Figura 19 y recordando la ecuación (14), es posible sustituir  $\omega \mathbf{k}$  por  $\boldsymbol{\omega}$  en dicha ecuación. De esta forma, es posible expresar la velocidad de cualquier punto  $P$  de la placa representativa como:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \mathbf{k} \times \mathbf{r}\tag{19}$$

Al observar la Figura 19 es posible concluir que los vectores  $\mathbf{k}$  y  $\mathbf{r}$  son vectores ortogonales. De esta forma, la magnitud de la velocidad  $\mathbf{v}$  es:

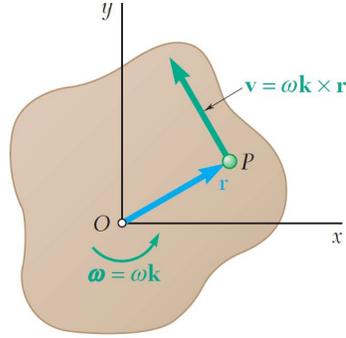


Figura 19: Placa representativa de un cuerpo rígido en rotación [10]

$$v = r\omega \quad (20)$$

La dirección de dicho vector puede obtenerse si se gira  $\mathbf{r}$   $90^\circ$  en el sentido de la rotación de placa.

Ahora, se sustituye  $\boldsymbol{\omega} = \omega\mathbf{k}$  y  $\boldsymbol{\alpha} = \alpha\mathbf{k}$  en la ecuación (17). Con esta sustitución es posible observar de que el doble producto cruz del vector  $\mathbf{r}$  por el vector  $\mathbf{k}$  produce una rotación de  $180^\circ$  del vector  $\mathbf{r}$ . Por lo tanto, la aceleración del punto  $P$  se expresa como:

$$\mathbf{a} = \alpha\mathbf{k} \times \mathbf{r} - \omega^2\mathbf{r} \quad (21)$$

Si se descompone la aceleración en sus dos componentes (normal y tangencial) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_t &= \alpha\mathbf{k} \times \mathbf{r} & a_t &= r\alpha \\ \mathbf{a}_n &= -\omega^2\mathbf{r} & a_n &= r\omega^2 \end{aligned} \quad (22)$$

La representación de estos componentes se muestran en la Figura 20.

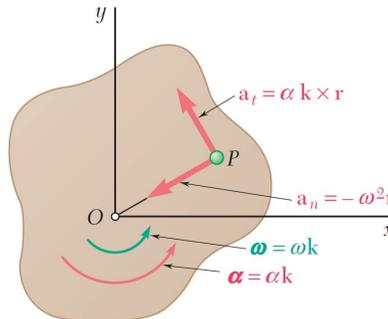


Figura 20: Componentes de la aceleración en placa representativa en rotación [10]

La componente tangencial apunta en dirección antihoraria si el escalar  $\alpha$  es positivo y en dirección horaria si es negativo. La componente normal siempre apunta en dirección opuesta a  $\mathbf{r}$ .

### 6.4.3. Ecuaciones que definen la rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo

Dos casos de rotación son los más frecuentes:

- *Rotación uniforme:* En este caso, la aceleración angular es cero. Esto provoca que la velocidad angular sea constante y la posición angular esté definida por

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (23)$$

- *Rotación uniformemente acelerada:* En este caso, la aceleración angular es constante. Las expresiones dadas para estos casos son las siguientes:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \alpha t \\ \theta &= \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \\ \omega^2 &= \omega_0^2 + 2\alpha(\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (24)$$

### 6.4.4. Movimiento plano general

El movimiento plano general se describe como el movimiento que realiza un cuerpo rígido planar, el cual no es una traslación ni una rotación. Sin embargo, este movimiento puede ser considerado como la suma de una traslación y una rotación.

Para ejemplificar esto se utilizará una rueda que gira sobre una pista recta, como se muestra en la Figura 21. Se seleccionan dos puntos de la rueda y se nombran  $A$  y  $B$ , respectivamente. Luego de que la rueda gira durante un intervalo de tiempo definido, los puntos seleccionados se habrán movido desde  $A_1$  hasta  $A_2$  y desde  $B_1$  hasta  $B_2$ , respectivamente.

Es posible obtener el mismo resultado si, mediante una traslación, se lleva a  $A$  hasta  $A_2$  y a  $B$  hasta  $B'_1$ , manteniendo la línea  $AB$  vertical. Luego, se rota la rueda alrededor de  $A$  para llevar a  $B$  hasta  $B_2$ .

Como se pudo observar, el movimiento plano original puede ser duplicado a través de la combinación de una traslación y rotación.

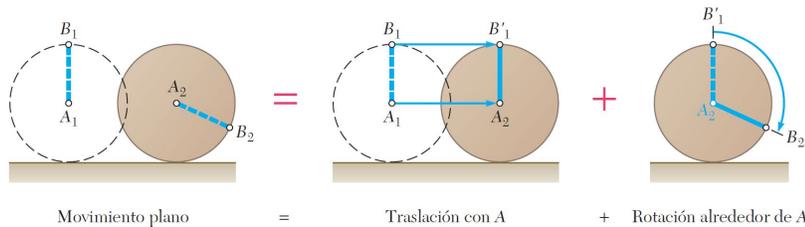


Figura 21: Movimiento plano de rueda 10

Si se analiza el caso general, se considera una placa representativa de un cuerpo rígido (Figura 22). Nuevamente, se seleccionan dos partículas de dicho cuerpo ( $A$  y  $B$ ) y se llevan

desde  $A_1$  y  $B_1$  hasta  $A_2$  y  $B_2$ , respectivamente. El movimiento que se lleva a cabo puede dividirse en dos: una traslación de las partículas hacia  $A_2$  y  $B'_1$ , mientras la línea  $AB$  mantiene la misma dirección, y luego realizar una rotación alrededor de  $A$  para llevar a  $B$  hasta  $B_2$ . La primera parte de este movimiento es una traslación pura y la segunda parte se trata de una rotación sobre un eje fijo que pasa por  $A$ .

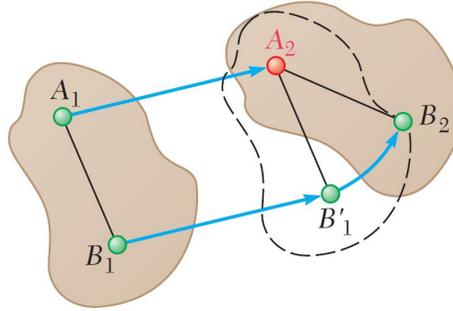


Figura 22: Caso general del movimiento plano [10]

#### 6.4.5. Ecuaciones de movimiento de un cuerpo rígido

Se considera un cuerpo rígido sobre el cual están actuando varias fuerzas *externas*  $\mathbf{F}_1$ ,  $\mathbf{F}_2$ ,  $\mathbf{F}_3$ , ... como se muestra en la Figura [23].

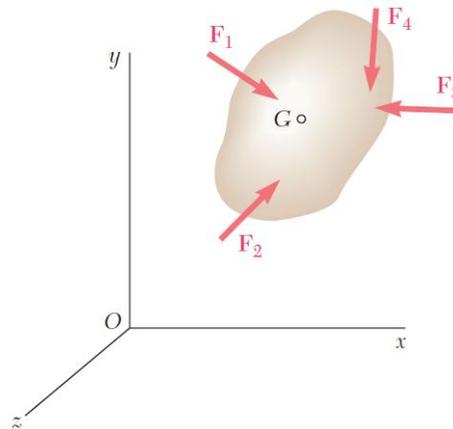


Figura 23: Fuerzas actuando sobre un cuerpo rígido [10]

Se supone que el cuerpo está conformado de un número  $n$  de partículas con masa  $\Delta m_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

Primero, se considera el movimiento del centro de masa  $G$  respecto al sistema de coordenadas inercial  $Oxyz$ . Aplicando la segunda ley de Newton de movimiento se obtiene:

$$\sum \mathbf{F} = m\bar{\mathbf{a}} \quad (25)$$

donde  $m$  es la masa *total* del cuerpo y  $\bar{\mathbf{a}}$  es la aceleración del centro de masa.

Ahora, se analizará el movimiento del cuerpo con respecto al nuevo sistema de coordenadas centroidal  $Gx'y'z'$  (Figura 24). Si se analiza la razón de cambio de la cantidad de movimiento angular alrededor de  $G$  se obtiene:

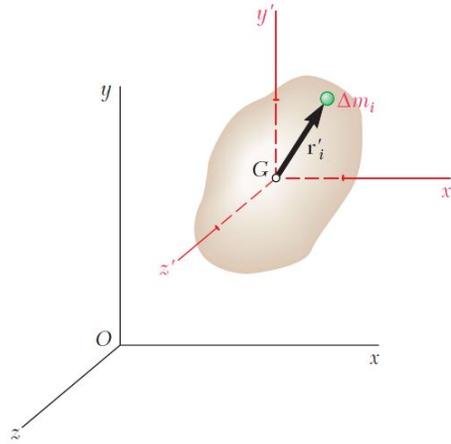


Figura 24: Cuerpo rígido como un sistema de partículas [10]

$$\sum \mathbf{M}_G = \dot{\mathbf{H}}_G \quad (26)$$

La Ecuación (25) y la Ecuación (26) expresan que el sistema de fuerzas externas es equivalente al sistema consistente del vector  $m\bar{\mathbf{a}}$  que pasa por  $G$  y al momento  $\dot{\mathbf{H}}_G$ , como se muestra en la Figura 25.

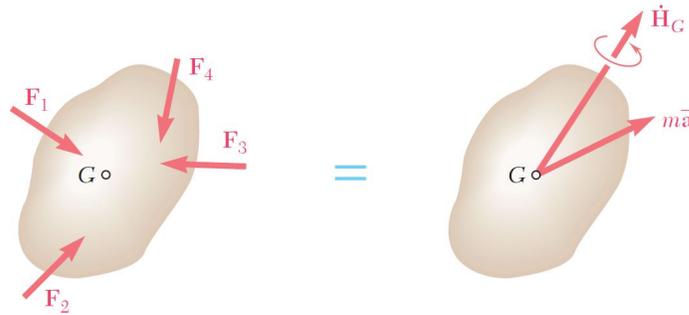


Figura 25: Sistemas equivalentes [10]

#### 6.4.6. Cantidad de movimiento angular de un cuerpo rígido en movimiento plano

Se considera una placa representativa, rígida, en movimiento plano. Si se considera que la placa está compuesta por un gran número ( $n$ ) de partículas  $P_i$  de masa  $\Delta m_i$ , es posible obtener la cantidad de movimiento angular respecto a su centro de masa al calcular los momentos en torno a  $G$  de las cantidades de movimiento de cada partícula del sistema respecto a un sistema de coordenadas  $Oxy$  o  $Gx'y'$ . Esta situación se muestra en la Figura 26.

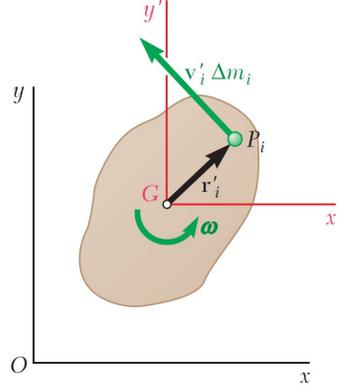


Figura 26: Cantidad de movimiento angular en placa representativa [10]

Si se selecciona el marco de referencia  $Gx'y'$  se obtiene que

$$\mathbf{H}_G = \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}'_i \times \mathbf{v}'_i \Delta m_i) \quad (27)$$

En esta ecuación  $\mathbf{r}'_i$  y  $\mathbf{v}'_i \Delta m_i$  denotan el vector de posición y cantidad de movimiento lineal de la partícula  $P$  respecto al sistema de coordenadas  $Gx'y'$ , respectivamente.

Ahora, como esta partícula pertenece a la placa, es posible definir  $\mathbf{v}'_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i$ , siendo  $\boldsymbol{\omega}$  la velocidad angular de la placa. Sustituyendo la expresión en la ecuación [27] se obtiene:

$$\mathbf{H}_G = \sum_{i=1}^n [\mathbf{r}'_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i) \Delta m_i] \quad (28)$$

Al analizar la Figura [26] es posible verificar que el doble producto vectorial en esta expresión da como resultado un vector perpendicular a la placa, con la misma dirección que  $\boldsymbol{\omega}$  con magnitud  $\omega \sum r_i'^2 \Delta m_i$ . Se reconoce que esta sumatoria representa el momento de inercia  $\bar{I}$  de la placa respecto a un eje centroidal. Así, se concluye que la cantidad de movimiento angular  $\mathbf{H}_G$  de la placa alrededor de su centro de masa es:

$$\mathbf{H}_G = \bar{I} \boldsymbol{\omega} \quad (29)$$

Al derivar esta expresión respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{\mathbf{H}}_G = \bar{I} \dot{\boldsymbol{\omega}} = \bar{I} \boldsymbol{\alpha} \quad (30)$$

De esta forma, la razón de cambio de la cantidad de movimiento angular de la placa representativa, es un vector con la misma dirección que la aceleración angular  $\boldsymbol{\alpha}$  de la placa, con magnitud  $\bar{I} \alpha$ .

### 6.4.7. Movimiento plano de un cuerpo rígido

Una vez más, se considera una placa rígida de masa  $m$  que se mueve bajo la acción de fuerzas externas  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \dots$ , las cuales son efectuadas en el plano que contiene a la placa, como se muestra en la Figura 27.

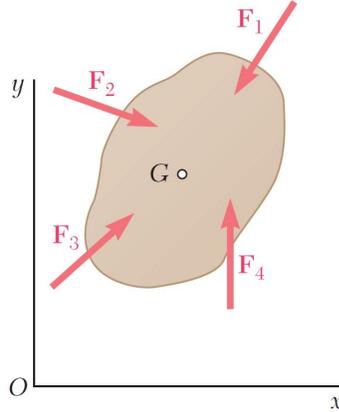


Figura 27: Placa bajo fuerzas externas [10]

Si se sustituye  $\dot{\mathbf{H}}_G$  de la Ecuación (30) en la Ecuación (26) y se descompone la Ecuación (25) en sus componentes rectangulares se obtiene, en forma escalar, lo siguiente:

$$\sum F_x = m\bar{a}_x \quad \sum F_y = m\bar{a}_y \quad \sum M_G = \bar{I}\alpha \quad (31)$$

Estas expresiones demuestran que, una vez determinado todas las fuerzas externas que actúan sobre la placa, es posible determinar la aceleración del centro de masa y la aceleración angular de la placa. Además, si se proveen condiciones iniciales apropiadas, es posible obtener por integración las coordenadas rectangulares del centro de masa y la posición angular de la placa.

De esta forma, *el movimiento de la placa está completamente definido por la fuerza resultante y el momento resultante alrededor de G de las fuerzas externas que actúan sobre ella.*

#### Traslación

Un cuerpo en traslación posee una aceleración angular igual a cero, por lo que la fuerza resultante que actúa sobre ella se reduce al vector  $m\bar{\mathbf{a}}$  que pasa por  $G$ , como se muestra en la Figura 28.

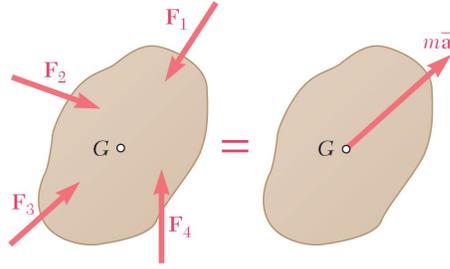


Figura 28: Placa en traslación [10]

### Rotación centroidal

Cuando una placa gira alrededor de un eje fijo perpendicular al plano de referencia, el cual pasa por su centro de masa  $G$ , el cuerpo está en *rotación centroidal*. La aceleración  $\bar{\mathbf{a}}$  del centro de masa es igual a cero, por lo que las fuerzas externas se reducen a un par de momento  $\bar{I}\alpha$ , como se muestra en la Figura 29.

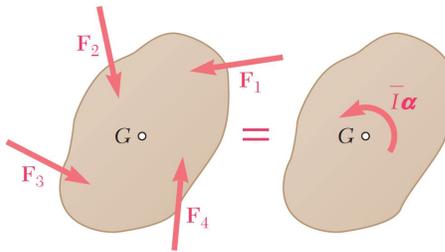


Figura 29: Placa en rotación centroidal [10]

### Movimiento plano general

Observe la Figura 30. Si se compara esta Figura con la Figura 28 y la Figura 29 es posible determinar que, desde el punto de vista cinético, el movimiento plano general de una placa representativa puede reemplazarse por la suma de una traslación y rotación centroidal. Este enunciado es muy parecido al que se hizo en la Sección 6.4.4, solo que esta vez se requiere que el punto de referencia sea el centro de masa del cuerpo.

De las ecuaciones presentadas en 31, se observa que las primeras dos son iguales que las ecuaciones del movimiento de una partícula de masa  $m$  sujeta a fuerzas  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \dots$ . Con esto es posible llegar a la conclusión de que *el centro de masa  $G$  de un cuerpo rígido en movimiento plano se mueve como si la masa total del cuerpo estuviera concentrada en ese punto, y como si todas las fuerzas externas actuaran sobre él.*

Hay que destacar también que, generalmente, el sistema de fuerzas externas no se reduce a un vector  $m\bar{\mathbf{a}}$  que pasa por  $G$ . Por lo tanto, en el movimiento plano de un cuerpo rígido, *la resultante de las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo no pasa por el centro de masa del mismo.*

Finalmente, la última ecuación de (31) seguiría siendo válida si el cuerpo rígido se hubiera restringido a girar alrededor de un eje fijo que pasa por  $G$ . Por lo tanto, *un cuerpo rígido en movimiento plano gira alrededor de su centro de masa como si este punto estuviera fijo*.

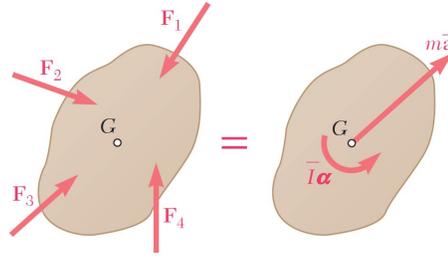


Figura 30: Placa en movimiento plano (10)

## 6.5. Resortes

De la forma más simple posible, los resortes son elementos capaces de almacenar energía mecánica potencial. Aunque los resortes más comunes son los fabricados utilizando alambre en espiral, los resortes pueden presentarse en distintas formas y materiales. Un arco utilizado para disparar flechas es un ejemplo de un resorte no convencional.

### 6.5.1. Ley de Hooke

Robert Hooke, físico británico, determinó que existe una relación proporcional entre la fuerza requerida para estirar o comprimir un resorte y la longitud que el resorte es estirado o comprimido. Esta relación es conocida como la *Ley de Hooke* y se expresa por medio de la expresión:

$$F = kx \quad (32)$$

donde  $F$  es la magnitud de la fuerza aplicada,  $k$  es la rigidez del resorte y  $x$  es la longitud del resorte. La constante elástica del resorte ( $k$ ) es función de las propiedades del material, el grosor del alambre, y número de vueltas en la espiral. La Ley de Hooke puede ser aplicada a una gran cantidad de cuerpos sólidos, mientras que las fuerzas que se aplican sobre el cuerpo no los deformen plásticamente (11).

### 6.5.2. Tipos de resortes: Tracción, compresión y torsión

#### Resortes de tracción y compresión

Los resortes más comunes son los resortes de tracción (Figura 31a) y compresión (Figura 31b). Estos consisten de elementos helicoidales fabricados de metal; aunque pueden cons-

truirse con diferentes materiales. Es posible diferenciar estos dos resortes ya que los resortes de tracción se enrollan de forma más estrecha que los resortes de compresión.

Sus nombres hacen referencia al estado en el cual el resorte contiene la mayor cantidad de energía potencial: Los resortes de tracción almacenan mayor energía al estirarse y los resortes de compresión almacenan mayor energía potencial al ser comprimidos [11].



(a) Resorte de tracción [12]



(b) Resorte de compresión [13]

Figura 31: Resortes comunes

### Resortes de torsión

Los resortes de torsión (Figura 32) se enrollan helicoidalmente, de la misma forma que los resortes de tracción, aunque sus extremos se extienden fuera del resorte de forma perpendicular al eje de la espiral. Estos resortes, en lugar de ser estirados o comprimidos, son retorcidos para almacenar energía potencial.

Los resortes de torsión obedecen la Ley de Hooke pero en su forma angular:

$$\tau = k\theta \quad (33)$$

Para este tipo de resortes, las fuerzas se reemplazan por torques y el desplazamiento angular, medido en radianes, reemplaza el desplazamiento lineal [11].



Figura 32: Resorte de torsión [14]

## 6.6. Solenoides

Una bobina alargada de alambre la cual posee una gran cantidad de vueltas es conocida como **solenoides**. El campo magnético que se genera dentro de un solenoide puede llegar a

ser muy elevado. Esto se debe a que el campo magnético generado es la suma de los campos generados por la corriente en cada una de las vueltas (Figura 33). De esta forma, entre más vueltas tiene un solenoide, mayor será el campo magnético generado.

Un solenoide actúa como un imán: Uno de los extremos puede considerarse el polo norte y el otro extremo el polo sur. La designación de los polos serán determinados por la dirección de la corriente en el alambre (de acuerdo con la regla de la mano derecha) [15].

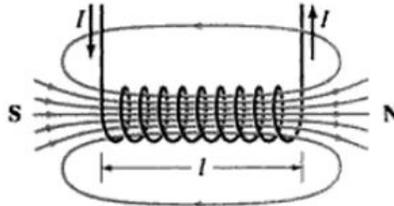


Figura 33: Campo magnético en un solenoide [15]

Un dispositivo útil muy utilizado consiste en un solenoide con una barra de hierro parcialmente insertada. Cuando se hace pasar una corriente por el solenoide, la bobina se convierte en un imán y ejerce una fuerza sobre la barra de hierro. Dependiendo de la dirección de la corriente, la barra se ve atraída o repelida por la bobina, creando así un actuador lineal.

Una aplicación simple de este dispositivo es un timbre, como el que se muestra en la Figura 34. Cuando el circuito se cierra al oprimir el interruptor, la bobina atrae a la barra de hierro, la cual golpea la campana.

Este tipo de solenoides son utilizados como interruptores en muchos dispositivos. Además, son utilizados como actuadores lineales en muchas aplicaciones ya que presentan la ventaja de tener un movimiento rápido y preciso [15].

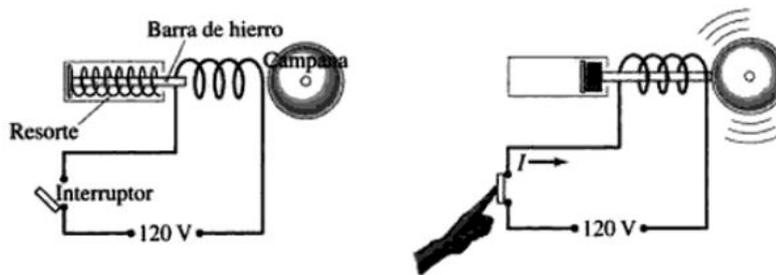


Figura 34: Diagrama de timbre simple [15]

---

## Un mecanismo bio-inspirado

---

La robótica bio-inspirada tiene como objetivo el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en el comportamiento de distintos organismos que se encuentran en la naturaleza. Vehículos terrestres inspirados en el movimiento de insectos, plataformas acuáticas basadas en peces y otros organismos marinos y robots excavadores que replican el patrón de excavación de los topos, son sólo unos ejemplos de esta rama.

Para el desarrollo de este mecanismo de auto-volteo, se usará como base el comportamiento del *Escarabajo Clic*, mejor conocido como *Click Beetle*.

La familia de escarabajos *Elateridae* se caracteriza por su capacidad de *auto-voltearse* al momento en el que se encuentran patas arriba, incapacitados para moverse. En esta posición, el escarabajo arquea su cuerpo (Figura 35) y ejecuta un potente salto que lo lanza por los aires, con la esperanza de que en el aterrizaje, caiga nuevamente sobre sus patas.

El salto del Escarabajo Clic ha sido estudiado buscando desarrollar modelos detallados de la dinámica del salto. Estos modelos involucran un extenso análisis de fuerzas, momentos y energía.

A pesar de que la descripción detallada del salto puede llevar a modelos extensos y complicados, los conceptos fundamentales detrás del salto pueden ser descritos con facilidad. La siguiente sección da un pequeño vistazo a estos conceptos.



Figura 35: Click Beetle, en su posición arqueada, a punto de ejecutar el salto

## 7.1. El salto del Escarabajo Clic: Conceptos fundamentales

Como se estudió en la Sección [6.1](#), el Escarabajo Clic ejecuta su salto gracias a la morfología de su exoesqueleto y sus músculos internos. Al arquearse, los músculos internos se estiran, almacenando energía potencial mecánica. Cuando el escarabajo alcanza su punto máximo de arqueado, este bloquea su cuerpo, por medio de elementos presentes en su exoesqueleto, y mantiene esta posición hasta que está listo para el salto. En ese momento, el mecanismo de sujeción se relaja, liberando la energía potencial almacenada en los músculos internos. Este movimiento se presenta en la Figura [8](#). Cuando el cuerpo del escarabajo retorna a su posición inicial, el exoesqueleto choca contra sí mismo, lo cual desata el salto.

Si se analiza el proceso del salto, es posible llegar a la conclusión (de forma muy simplificada) que el salto se compone de dos momentos fundamentales:

1. Almacenamiento de energía potencial en los músculos internos por medio de la rotación de dos elementos.
2. La liberación y transmisión de energía por medio del golpe del escarabajo contra sí mismo.

Con estos dos conceptos definidos, es posible iniciar con algunas propuestas para el diseño del mecanismo. Pero antes de iniciar con las propuestas, se revisan algunos elementos mecánicos comunes para el almacenamiento de energía mecánica.

### 7.1.1. Elementos para almacenamiento de energía mecánica

La energía puede ser almacenada de muchas formas. Las baterías electroquímicas, los condensadores eléctricos y las centrales hidroeléctricas, son algunos ejemplos. Sin embargo, para los propósitos del presente trabajo, se centra el interés en los elementos *mecánicos*.

Entre los elementos mecánicos más comunes para el almacenamiento de energía están los volantes de inercia, los tanques de aire comprimido y resortes.

Debido a la aplicación para la que se requiere el almacenamiento de energía, la atención se centrará principalmente en los resortes. Como se estudió en la Sección [6.5](#), los resortes son elementos elásticos capaces de almacenar energía cuando son sometidos a fuerzas externas. Cuando estas fuerzas desaparecen, la energía almacenada es liberada de forma abrupta.

Existen tres tipos de resortes:

1. Resortes de tracción
2. Resortes de compresión
3. Resortes de torsión

Estos elementos permitirán imitar los músculos internos del escarabajo, por lo que serán fundamentales para la derivación de la propuesta del mecanismo.

## 7.2. El modelo de Evans y primera propuesta de mecanismo

Ahora que se han definido los conceptos claves detrás del salto del Escarabajo Clic, es momento de iniciar con las propuestas para el diseño del mecanismo.

Para iniciar, se estudiará el mecanismo propuesto por Evans [4] en su investigación *The jump of the click beetle (Coleoptera, Elateridae) - A preliminary study*.

### 7.2.1. Mecanismo de Evans

El mecanismo propuesto por Evans se muestra en la Figura 36. Evans empleó madera plywood para la construcción del cuerpo del escarabajo y utilizó bandas elásticas y resortes para simular los distintos músculos que participan en el salto.

Lamentablemente, Evans no presenta una descripción detallada y completa de la construcción, solamente hace alusión a los materiales utilizados y las pruebas realizadas. A pesar de esto, se procedió con el diseño e implementación del mecanismo, aunque los resultados no fueron los esperados.

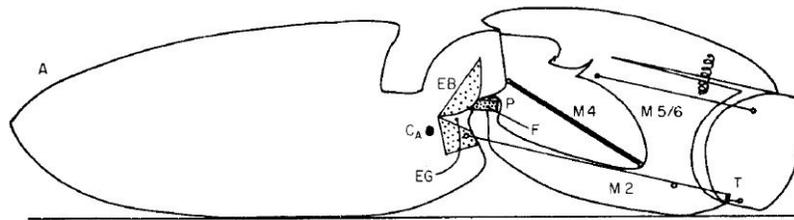


Figura 36: Mecanismo propuesto por Evans [4]

El mecanismo propuesto por Evans es más complicado de lo que se había previsto y al intentar ensamblarlo se presentaron los siguientes problemas:

- El mecanismo de bisagra no se puede replicar usando una junta revoluta; unir los eslabones con este tipo de junta provoca que el movimiento relativo entre piezas sea incorrecto. Se requiere de una descripción más detallada de la unión de las piezas, de forma que el comportamiento del mecanismo sea el correcto.
- La disposición y función de algunos elementos en el diagrama (resortes y bandas elásticas) no están del todo claros.
- La forma en que el mecanismo es cargado y liberado no está descrita e intentar deducirlo directamente del diagrama no proveyó ningún resultado favorable.

Estos problemas de construcción y ensamblaje imposibilitaron la construcción del mecanismo de Evans.

A pesar de las dificultades, el estudio y análisis de la propuesta de Evans sirvió de inspiración para el diseño del mecanismo final, el cual se estudiará en la Sección 7.3.

A continuación, se presenta la primera propuesta y prototipo implementado; así como los problemas presentados por el mismo.

### 7.2.2. Primera propuesta: Diseño, prototipo y dificultades

Hasta este momento, se han definido los conceptos fundamentales detrás del salto del escarabajo Clic, se seleccionaron los elementos para el almacenamiento de energía y se estudió la propuesta de Evans. Con estos elementos en mente, es posible realizar la primera propuesta del mecanismo.

Luego de llevar a cabo un proceso de diseño, se propuso el mecanismo mostrado en la Figura 37. Esta propuesta posee las siguientes características:

- Dos eslabones con forma elíptica, los cuales simulan el cuerpo y la cabeza del Escarabajo Clic
- Un resorte de torsión, en el cual almacena la energía necesaria para el salto, y que también cumple la función de junta revolvente entre los dos eslabones.

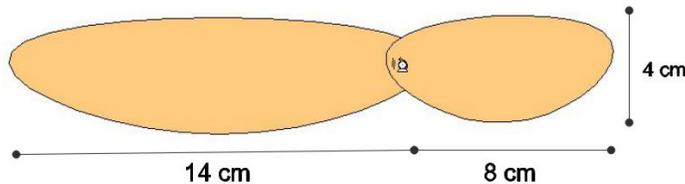


Figura 37: Modelo de propuesta de mecanismo 1

Antes de llevar a cabo la implementación de un prototipo de este diseño, se deseaba poner a prueba la funcionalidad y efectividad de esta propuesta. Para ello se llevaría a cabo una simulación del mecanismo bajo condiciones reales.

Para la simulación del comportamiento del mecanismo se utilizó el software Working Model 2D, programa especializado para el análisis del movimiento de distintas estructuras bajo condiciones *realistas*.

### Simulación con Working Model 2D

El mecanismo propuesto fue implementado en Working Model 2D como se muestra en la Figura 38.

En esta simulación, se colocó un motor en la junta que une a los eslabones. De esta forma, la cabeza del mecanismo rota con respecto al cuerpo, cargando el resorte de torsión. Luego de un periodo de tiempo determinado, el motor es removido para liberar la energía almacenada en el resorte.

Al llevar a cabo las primeras pruebas de simulación se observó que el mecanismo realizaba pequeños saltos, pero no mostraba similitud con el salto del Escarabajo Clic. Sin embargo, al

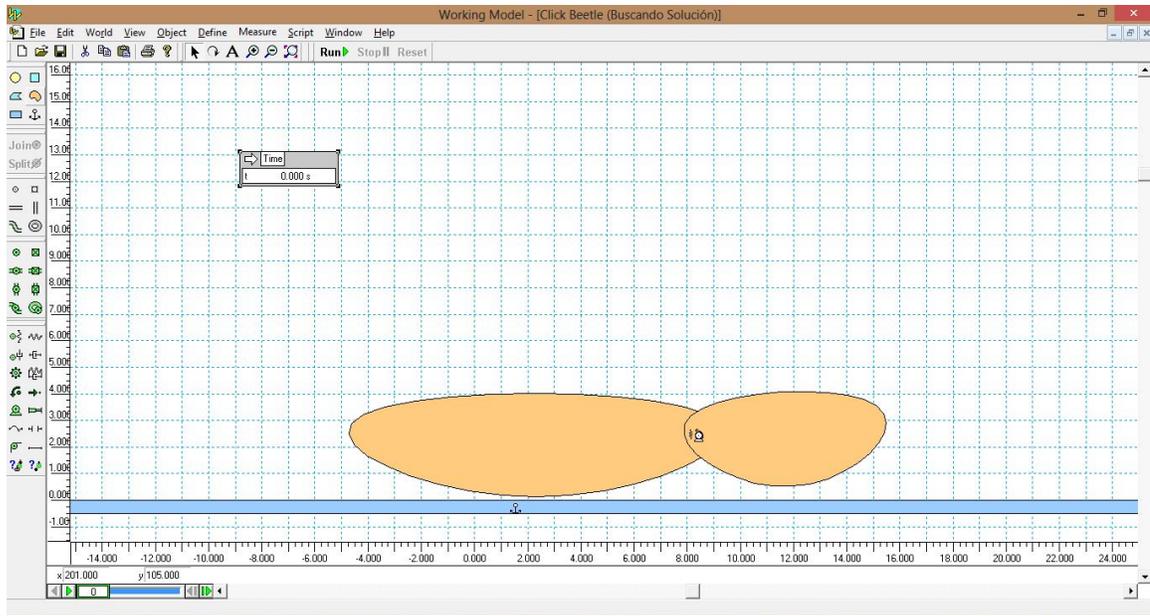


Figura 38: Mecanismo propuesto implementado en Working Model 2D

aumentar la constante elástica del resorte de torsión, se obtuvo una respuesta muy similar a la esperada: El mecanismo realizaba un salto de gran altura mientras rotaba sobre sí mismo. La Figura 39 y la Figura 40 muestran el movimiento del mecanismo y la trayectoria del centro de masa del mecanismo dentro del ambiente de simulación, respectivamente. Estas presentan una gran similitud con el salto del Escarabajo Clic.

Estos resultados parecían favorecer esta propuesta de diseño y todo parecía apuntar a que este sería el mecanismo sobre el cual se iteraría para alcanzar los objetivos propuestos. Sin embargo, como se verá en la siguiente sección, la implementación física del mecanismo requiere consideraciones y cuidados adicionales que no se presentaban en la simulación. Con esta situación surge la interrogante acerca de qué tan confiables y fieles son las simulaciones para este tipo de mecanismos.

### Implementación física del mecanismo

Una vez que se observó, por medio de simulaciones, que la propuesta de mecanismo funcionaba, se procedió a la implementación física del mismo.

En este punto, el mayor problema que se presentaba era cómo cargar y liberar el mecanismo. A diferencia de la simulación, en el mecanismo real no era posible *retirar* el actuador y liberar el mecanismo de forma sencilla.

Se intentó resolver este problema a través de un mecanismo de sujeción utilizando cuerdas pero, como se verá a continuación, los problemas relacionados con el funcionamiento del mecanismo, resultaron aún más relevantes que el mecanismo de liberación.

En la Figura 41 se muestra el prototipo del mecanismo propuesto. El modelado de las piezas se llevó a cabo por medio de software CAD, respetando las dimensiones utilizadas en

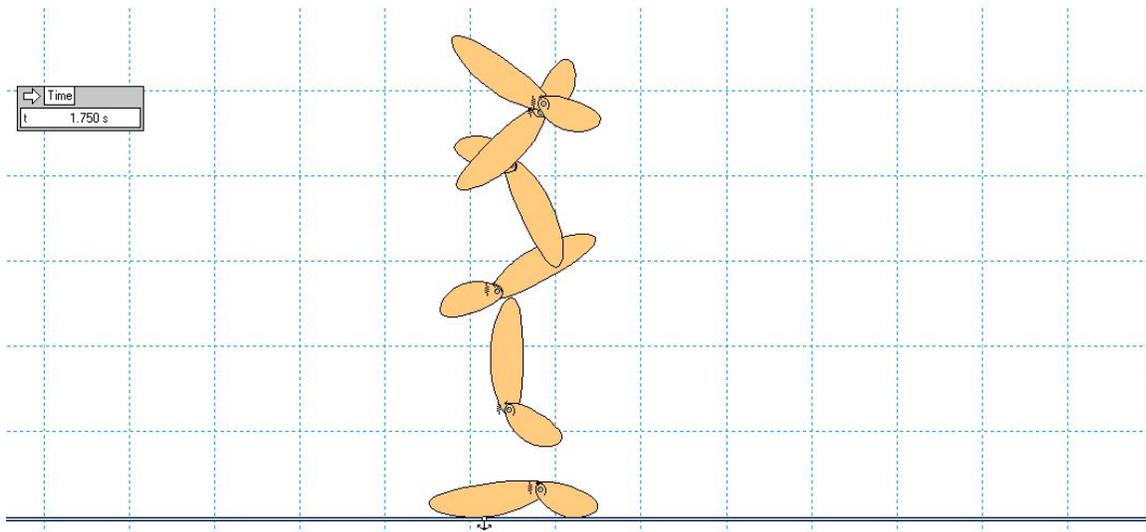


Figura 39: Simulación de comportamiento de propuesta 1 en Working Model 2D

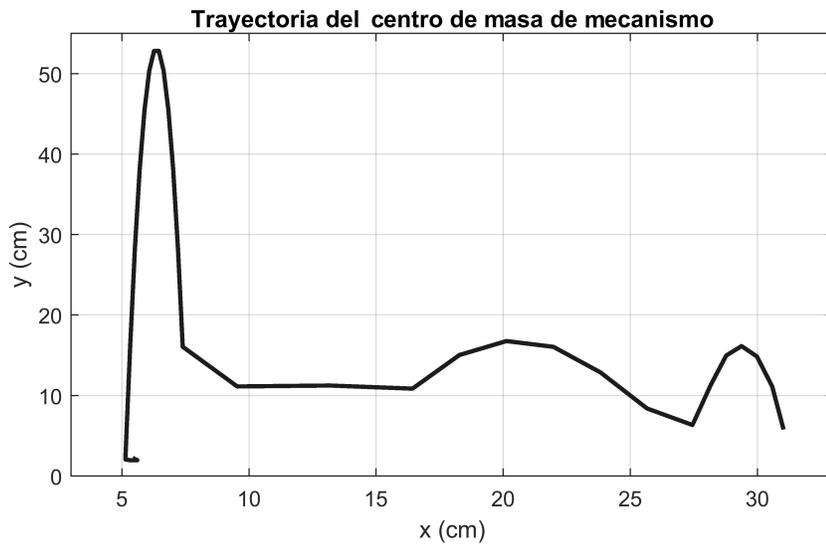


Figura 40: Trayectoria del centro de masa del mecanismo implementado en Working Model 2D

el mecanismo simulado. Los materiales utilizados fueron madera MDF, acrílico, pegamento y un resorte de torsión, el cual se obtuvo de una trampa para ratones.

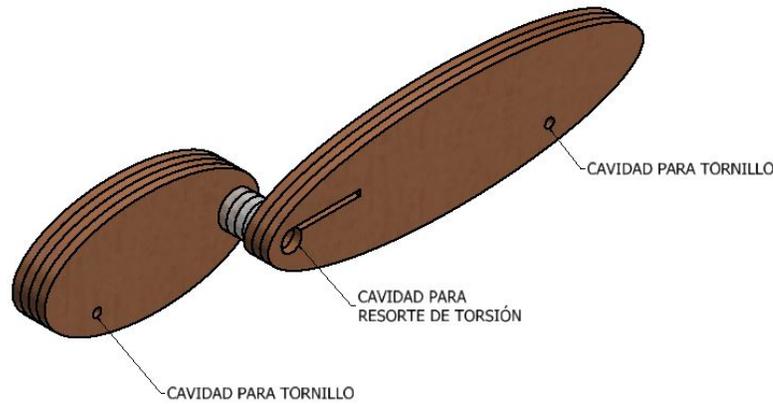


Figura 41: Prototipo de mecanismo, propuesta 1

Una vez construido el mecanismo, se procedió a la realización de pruebas. Luego de unos cuantos intentos, quedó claro que el mecanismo implementado presentaba varios problemas que no fueron considerados en la simulación.

Los problemas que presentó el prototipo son varios, causados principalmente por el resorte de torsión:

1. El resorte de torsión debe ser restringido longitudinalmente para evitar su flexión en planos distintos al deseado. A pesar de que este problema sí fue considerado al cubrir el resorte con anillos de acrílico, estos no son lo suficientemente rígidos para restringir la flexión del resorte.
2. Los resortes de torsión, por su construcción, tienen una longitud axial definida. Por lo tanto, para poder cubrir la longitud total del resorte se requirieron varias capas de material, haciendo que el prototipo se volviera pesado.
3. Debido a la longitud del resorte, los dos eslabones se encuentran separados por una distancia relativamente grande, causando que el mecanismo deje de moverse sobre un sólo plano.

Estos problemas demuestran que el uso de un resorte de torsión como elemento de almacenamiento de energía no es la mejor alternativa para esta aplicación. Para la siguiente iteración, se debía considerar otro elemento de almacenamiento de energía y diseñar el mecanismo con base en él.

A pesar de los problemas presentados por el prototipo, sería erróneo invalidar las simulaciones realizadas e incluso al software. Debemos recordar que Working Model 2D (al igual que muchos simuladores de movimiento) fue diseñado para la simulación y prueba de mecanismos de lazo cerrado con comportamientos predecibles. Aunque este software sea una excelente herramienta para análisis y recopilación de datos, es posible que dentro del ambiente simulado se *idealicen* muchos elementos y condiciones que no pueden ser replicados en el mundo real. El problema presentado con la longitud axial del resorte de torsión es

un buen ejemplo de ello: Mientras el software considera el mecanismo propuesto como un elemento planar, en la realidad esto no es posible, sobre todo si se tiene un resorte de torsión con una constante elástica elevada.

A pesar de que las simulaciones pueden proveer indicios de cómo podría comportarse un mecanismo, en este punto, se optó por la implementación física de las propuestas para la evaluación del funcionamiento de los prototipos y la realización de pruebas.

### 7.3. Segunda propuesta: Una mejor aproximación

Luego de la construcción de la primera propuesta se descubrió que el uso de un resorte de torsión no es la mejor aproximación al problema. De esta forma, la siguiente propuesta debía implementar otro elemento mecánico para almacenar energía.

Tomando inspiración del mecanismo de Evans [4], quien utilizó bandas elásticas como elemento de almacenamiento de energía, se optó por la utilización de un resorte de tracción.

La propuesta de diseño resultante se muestra en la Figura [42]. Esta propuesta de diseño posee las siguientes características:

- Tres eslabones rígidos, dos largos y uno corto, unidos por medio de tornillos. Estos tornillos cumplen la función de junta revoluta.
- El eslabón corto se une a uno de los eslabones largos por medio de un resorte de tracción.

Se debe resaltar que el mecanismo propuesto presenta una gran similitud con una navaja de resorte. Esta observación es importante ya que Evans [4] describió el movimiento ejecutado por el Escarabajo Clic como un movimiento de 'Navaja' (*Jack-Knifing Movement*). Esto sugiere la posibilidad de que el mecanismo propuesto sea una mejor aproximación al comportamiento del escarabajo que la propuesta anterior.

Los eslabones fueron cortados en planchas de madera MDF y se procedió a la construcción del mecanismo. Se debe mencionar que las dimensiones del mecanismo fueron determinadas a partir de la longitud de los resortes utilizados para la realización de las pruebas. Un diagrama con las dimensiones de los eslabones se muestra en la Figura [43]. Los planos detallados de este mecanismo se encuentran en el Anexo [15.1].

El mecanismo funciona de la siguiente forma: El resorte se estira al separar los eslabones uno de otro, almacenando energía potencial elástica e imitando a los músculos internos del escarabajo. El salto se ejecuta cuando el resorte retorna a su longitud inicial, al liberar los eslabones del mecanismo.

Un diagrama del funcionamiento se presenta en la Figura [44].

Una observación que debe hacerse es que el resorte, al retornar a su longitud inicial, *choca* contra sí mismo, lo cual desencadena el salto. Esto fue comprobado con las pruebas realizadas en el Capítulo [8]. La Figura [45] muestra fotogramas de una de las pruebas realizadas. Observe

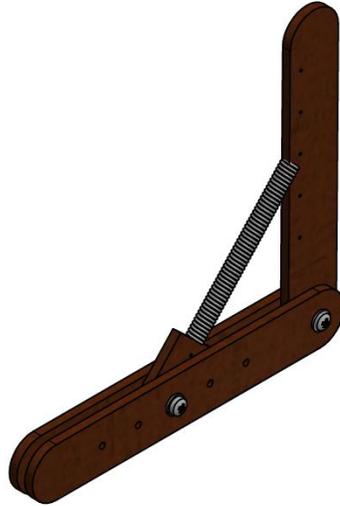


Figura 42: Prototipo de mecanismo, propuesta 2

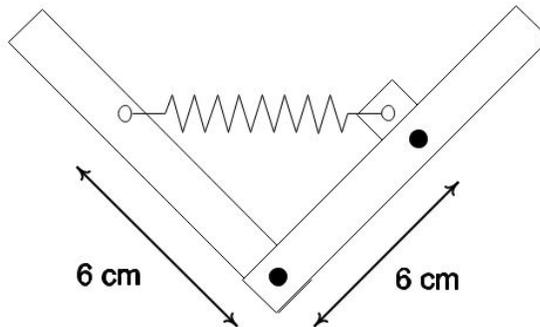


Figura 43: Dimensiones del mecanismo

la posición del mecanismo respecto a la línea roja: El mecanismo se eleva luego de que el resorte retorna a su posición inicial, momento destacado por la deformación del resorte en el último fotograma.

De esta forma, el mecanismo incorpora los dos conceptos fundamentales del salto del Escarabajo Clic, estudiados en la Sección 7.1. Luego de terminar la construcción del mecanismo se procedió a la realización de pruebas preliminares.

### 7.3.1. Pruebas del mecanismo

Las pruebas realizadas con el prototipo del mecanismo fueron simples: Cargar el mecanismo y liberarlo para observar su comportamiento.

Estas pruebas fueron grabadas utilizando una cámara *Nikon Coolpix P7700* a una velocidad de 120 fps (120 cuadros por segundo). La Figura 46 y la Figura 47 muestran algunos fotogramas de las pruebas realizadas.

Como se puede apreciar, el mecanismo al ser liberado ejecuta un salto vertical, girando

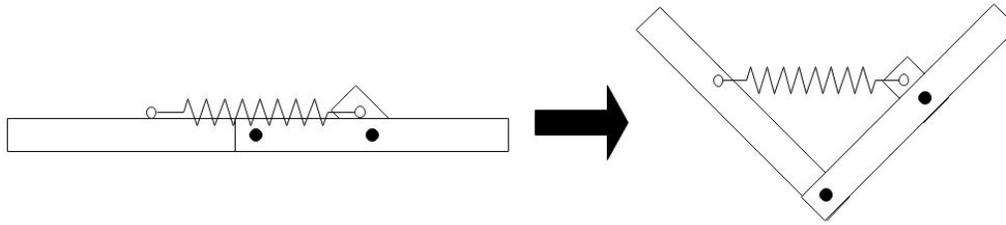


Figura 44: Diagrama de funcionamiento del mecanismo

sobre sí mismo en algunas ocasiones. Este comportamiento es favorable ya que el Escarabajo Clic, además de ejecutar el salto, gira sobre sí mismo.

Una vez realizadas las pruebas preliminares y observado el comportamiento del mecanismo, se procedió a la realización de pruebas controladas para determinar la similitud entre los saltos.

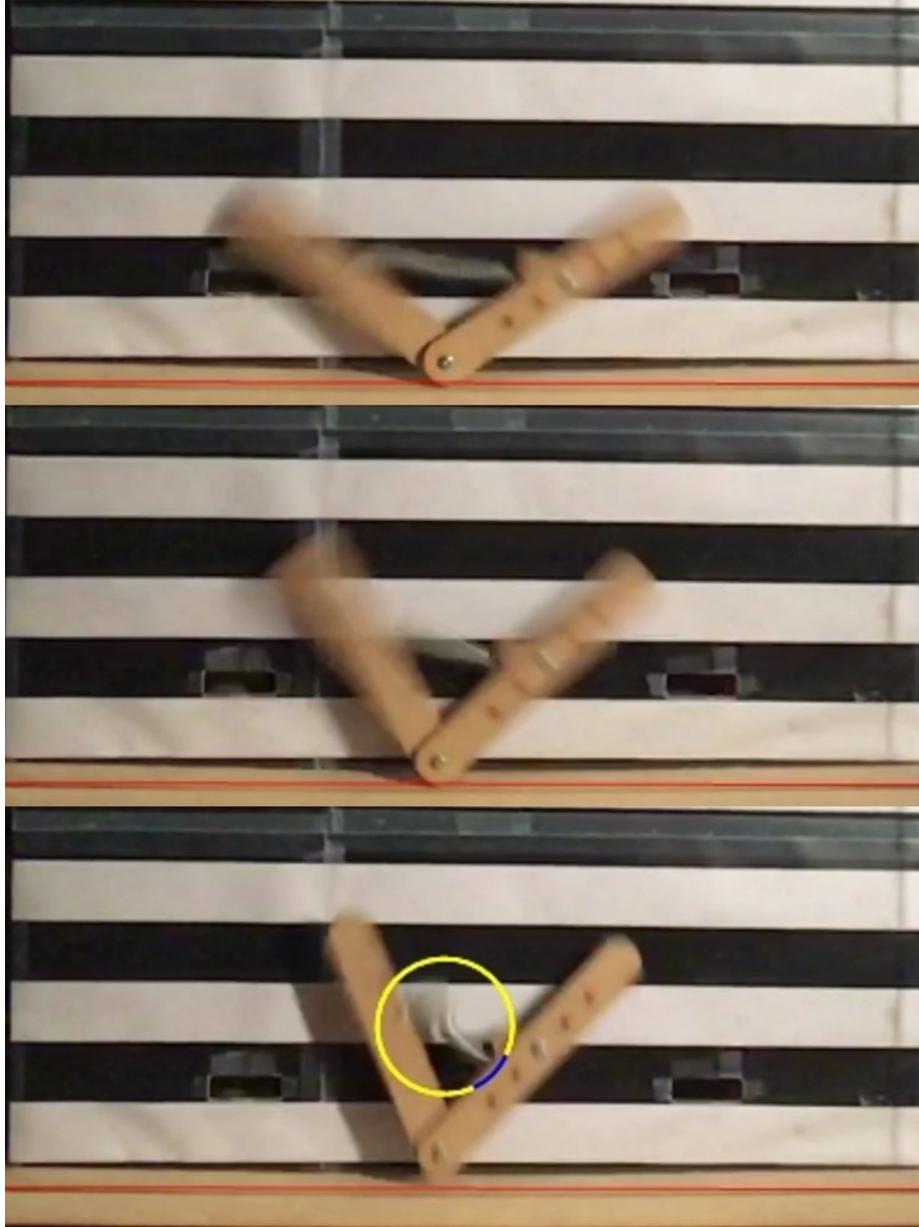


Figura 45: Fotogramas que muestran que el salto se ejecuta en el momento en que el resorte retorna a su posición inicial (Ver posición del mecanismo relativa a la línea roja)



Figura 46: Mecanismo en acción



Figura 47: Mecanismo en acción

En el capítulo anterior se estudiaron las dos propuestas para el diseño del mecanismo. Debido a los problemas presentados por el primer prototipo y las pruebas realizadas con el segundo, se concluyó que este último tenía un comportamiento similar al del Escarabajo Clic. Sin embargo, aunque el comportamiento fue similar, era necesario determinar el grado de similitud entre los dos saltos.

En la siguiente sección se analizan los parámetros del salto del Escarabajo Clic que pueden ser utilizados para realizar una comparación directa.

## 8.1. Parámetros del salto del Escarabajo Clic

De la Sección [6.1](#), en donde se describió las distintas etapas que involucra el salto del escarabajo, es posible recordar que el salto del escarabajo tiene elementos que lo caracterizan y distinguen de saltos ejecutados por otros organismos. La primera característica (y la más obvia) es que el salto es ejecutado sin la utilización de las patas; esto es lo que hace el salto del Escarabajo Clic tan especial.

Sin embargo, se buscaron parámetros que pudieran ser medidos y comparados con el comportamiento del mecanismo. Existen varios parámetros que podemos seleccionar: Ángulo de despegue, perfil de despegue, velocidad de despegue, aceleración de despegue, magnitud de la fuerza de despegue, velocidad angular de despegue, entre otras.

Para la realización de las comparaciones entre el mecanismo propuesto y el comportamiento real de Escarabajo Clic se tomaron en cuenta únicamente dos características:

1. Ángulo de despegue

2. El perfil del escarabajo en el despegue

### 8.1.1. Ángulo de despegue

Como se recuerda, el salto del Escarabajo Clic es aproximadamente vertical. Como se estudió en la Sección 6.1, el rango de valores del ángulo de despegue obtenidos por Bolmin *et al.* [1] oscila entre 82° y 89° respecto a la horizontal. Estos valores fueron los utilizados para realizar la comparación con el mecanismo.

### 8.1.2. Perfil del escarabajo en el despegue

Este parámetro se refiere al comportamiento que tiene el escarabajo luego de ejecutar el salto. Los bocetos del perfil del escarabajo luego del despegue realizados por Evans [4] se muestran en la Figura 10. Se buscó un comportamiento similar para el mecanismo.

Como recordará, Ribak [6] demostró que el ángulo de despegue del escarabajo está determinado únicamente por la morfología del caparazón del insecto. Esto significa que el ángulo de despegue tiene un rango definido en todos los saltos que el escarabajo realiza.

En contraste con el ángulo de despegue, las velocidades, aceleraciones y las fuerzas involucradas en el despegue son variables; controladas por el escarabajo. También son dependientes de la especie de escarabajo *Elateridae* en cuestión debido a que éstos varían en tamaño y peso. Según Ribak, el escarabajo es capaz de controlar la velocidad de despegue al regular la contracción de los músculos utilizados para el almacenamiento de energía [6]. Por lo tanto, no son parámetros controlables o definidos con los cuales se pueda realizar una comparación directa.

## 8.2. Poniendo a prueba el mecanismo

Una vez definido los parámetros de comparación entre el mecanismo y el comportamiento real del Escarabajo Clic, era momento de realizar pruebas. Estas pruebas debían llevarse a cabo en un ambiente controlado para que la medición de los parámetros fuera correcta. Para ello se llevó a cabo el desarrollo de una plataforma de pruebas con la cual fue posible controlar las condiciones en las que se liberaba el mecanismo.

### 8.2.1. Desarrollo de la plataforma de pruebas

La plataforma de pruebas se diseñó para cumplir las siguientes condiciones:

- Restringir el movimiento del mecanismo a un sólo plano.
- Liberación de mecanismo controlada por el usuario.
- Liberación simultánea de los dos eslabones del mecanismo.

Con estos elementos en mente, se procedió con el diseño y construcción de la plataforma de pruebas. El diseño final se presenta en la Figura 48.

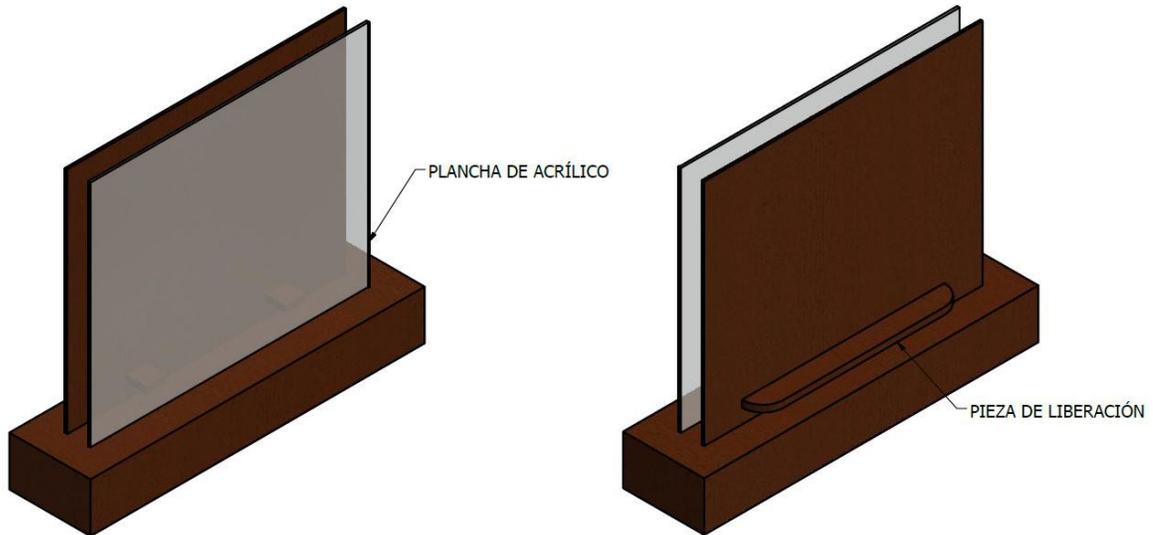


Figura 48: Plataforma de pruebas

La plataforma fue construida utilizando planchas de madera MDF, una plancha de acrílico y pegamento.

Está conformada por una base rectangular sobre la cual se sostienen dos planchas cuadradas, una de MDF y otra de acrílico. Estas planchas dan lugar a un pequeño espacio entre ellas, en el cual se colocaba el mecanismo. Finalmente, la plancha de MDF tiene dos agujeros por los cuales se introduce la *pieza de liberación* (Figura 49). Esta pieza mantenía cargado el mecanismo hasta el momento en el que fuera retirada.

Para utilizar la plataforma de pruebas se debían seguir las siguientes instrucciones:

1. Retirar la plancha de acrílico e insertar la pieza de liberación en su lugar.
2. Cargar el mecanismo y colocarlo debajo de la pieza de liberación, como se muestra en la Figura 50.
3. Colocar nuevamente la plancha de acrílico.
4. Retirar la pieza de liberación.



Figura 49: Pieza de liberación de la plataforma de pruebas

Con la plataforma de pruebas lista, fue posible llevar a cabo las pruebas correspondientes.

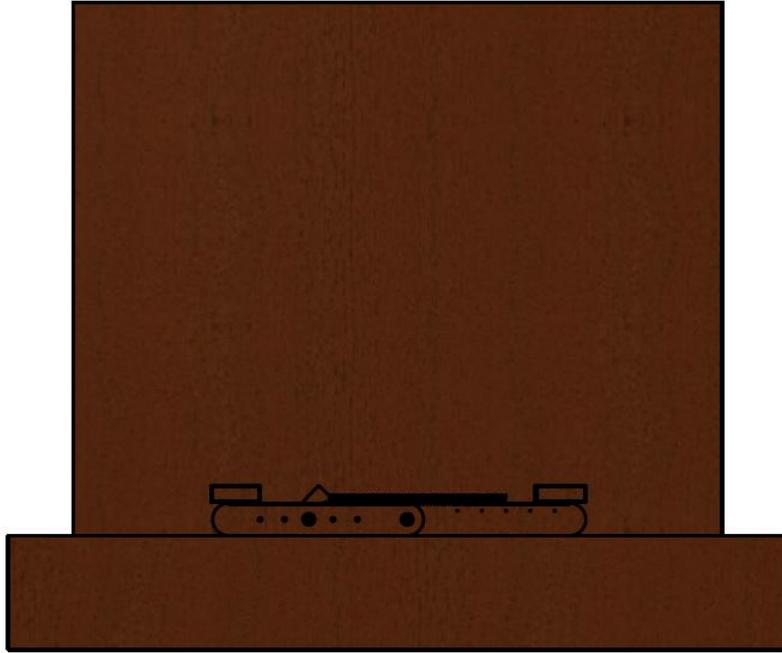


Figura 50: Mecanismo cargado en la plataforma de pruebas

### 8.2.2. Pruebas controladas

El mecanismo fue puesto a prueba utilizando 9 resortes con distintas constantes elásticas  $K$ . Las pruebas fueron registradas en video y, posteriormente, analizadas con software especializado.

Este análisis permitió determinar el ángulo y el perfil de despegue del mecanismo y cómo la variación de la constante elástica del resorte afectaba estos parámetros y el comportamiento del mecanismo en general.

Las especificaciones de los resortes utilizados se muestran en el Cuadro [1](#).

Número de Resorte	Constante Elástica $K$ [N/cm]	Longitud Inicial [cm]
1	1.96	2.8
2	1.30	4.0
3	3.27	4.6
4	1.39	5.0
5	1.96	5.2
6	3.08	4.7
7	1.22	4.7
8	1.44	4.4
9	2.08	3.7

Cuadro 1: Características de resortes

Las pruebas fueron grabadas a una velocidad de 240 fps (240 cuadros por segundo) utilizando una cámara de alta velocidad.

La cámara se colocó de tal forma de que ésta estuviera en un plano paralelo a la plataforma de pruebas. Esto se hizo para evitar la distorsión del plano sobre el cual se mueve el mecanismo y así obtener mediciones correctas. Un diagrama de la situación se muestra en la Figura 51.

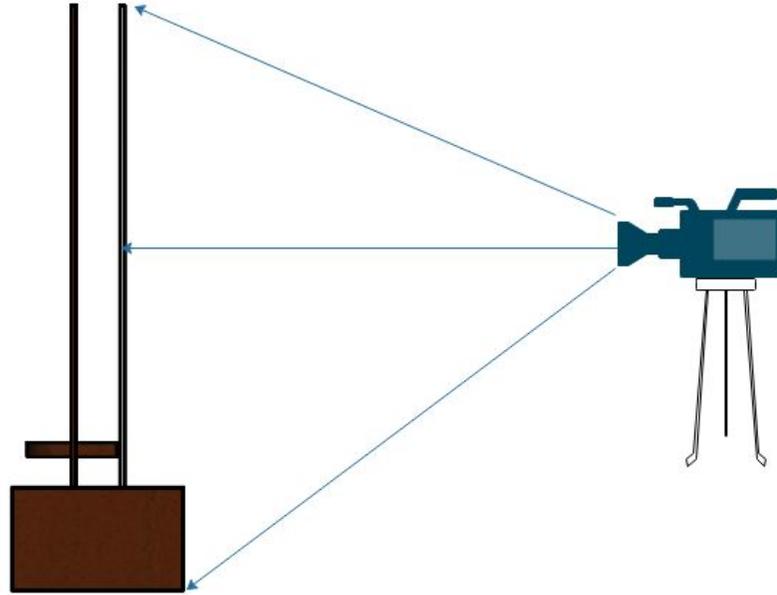


Figura 51: Diagrama de grabación de pruebas

### 8.2.3. Resultados de las pruebas

Los resultados de las pruebas fueron analizados de la siguiente forma:

- El ángulo de despegue fue medido utilizando la trayectoria del centro de masa (COM). Se asumió que el centro de masa se encuentra en la posición mostrada en la Figura 52 en todo momento.
- La altura alcanzada por el mecanismo fue medida utilizando la junta revoluta que une los dos eslabones largos como referencia.

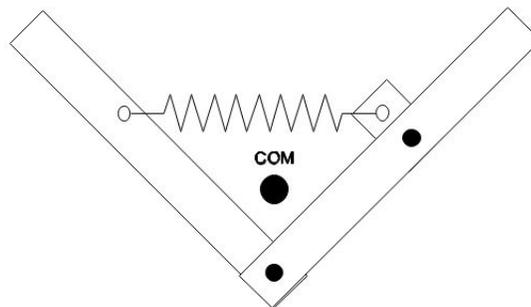


Figura 52: Posición del centro de masa asumida para las pruebas

Desde la Figura 53 hasta la Figura 61 se muestran los resultados de las pruebas realizadas. Las Figuras muestran fotogramas de los videos superpuestos uno sobre otro, con el objetivo de poder observar la trayectoria del mecanismo a lo largo de su despegue.

En la parte superior de las Figuras se muestra el perfil de despegue del mecanismo; en la parte intermedia, la medición del ángulo de despegue y en la parte inferior, la medición de la altura máxima alcanzada por el mecanismo. Los resultados se resumen en el Cuadro 2.

Resorte	Constante Elástica K [N/cm]	Ángulo de Despegue [°]	Altura Máxima [cm]
1	1.96	112	25.71
2	1.30	99	24.86
3	3.27	89	37.29
4	1.39	80	17.60
5	1.96	82	17.14
6	3.08	71	32.80
7	1.22	72	32.81
8	1.44	73	24.00
9	2.08	88	37.63

Cuadro 2: Resultados de pruebas

#### 8.2.4. Conclusiones de pruebas

De las pruebas realizadas y los resultados obtenidos es posible llegar a varias conclusiones.

##### Perfil de despegue del mecanismo

La primera conclusión es que es evidente que el mecanismo imita el perfil de despegue del Escarabajo Clic: Se observa una gran similitud entre los bocetos realizados por Evans 4 (Figura 10) y el despegue ejecutado por el mecanismo.

##### Ángulo de despegue

A diferencia del perfil de despegue, los ángulos de despegue tuvieron valores muy variados entre sí y muy pocos de ellos se encuentran entre el rango deseado (82° a 89°). Esta variación tan grande puede haber sido causado por varios factores, los cuales se examinarán a continuación:

##### Errores de medición

Es posible que se haya introducido error en las mediciones debido a la distorsión del plano de medición en los videos. Esto pudo ser causado por cambios sutiles en la orientación de la cámara, lo cual generó que el plano de grabación no fuera paralelo al plano de la plataforma de pruebas.

El software de análisis pudo haber introducido error en las mediciones debido a las incertidumbres de las herramienta de medición de ángulos.

Aunque es posible que estos factores hayan afectado las medición de los ángulos, es muy probable que estos errores sean despreciables.

## **Liberación del mecanismo**

Uno de los mayores desafíos al momento de realizar las pruebas fue el de garantizar que los dos eslabones del mecanismo se liberaran al mismo tiempo. En repetidas ocasiones, la pieza de liberación se atoraba al intentar liberarla rápidamente. En otras ocasiones, el mecanismo rotaba sobre sí mismo provocando que uno de los eslabones se liberara antes que el otro.

Únicamente cuando se lograba retirar la pieza de liberación con éxito, se podía considerar una prueba exitosa. Hay una gran probabilidad de que los ángulos obtenidos no puedan considerarse *verticales* como producto de una liberación tardía de alguno de los dos eslabones del mecanismo.

## **Diseño del mecanismo**

El Escarabajo Clic efectúa su salto debido a un rápido desplazamiento de su centro de masa. Este desplazamiento es provocado por el retorno rápido de las dos unidades de masa que conforman el cuerpo del escarabajo. La distancia y dirección en la que se mueve el centro de masa está completamente definido por la morfología del escarabajo.

A pesar de que el mecanismo cumple con los conceptos fundamentales detrás del salto del Escarabajo Clic, no presenta las mismas características físicas presentes en el escarabajo: El desplazamiento angular entre la posición inicial y final son distintas y los dos elementos móviles varían en masa e inercia. Estos factores pueden provocar que el centro de masa se mueva una distancia y en una dirección distinta de la presentada por el escarabajo.

## **Altura máxima**

La altura máxima alcanzada por el mecanismo varió dependiendo de la constante elástica del resorte. Como era de esperarse, los resortes con las constantes elásticas más altas alcanzaron una altura máxima mayor.

Estos resultados demuestran que la constante elástica del resorte influye en la magnitud de la fuerza de despegue del mecanismo.

### **8.2.5. ¿Es el mecanismo funcional?**

Pese a que los resultados obtenidos en las pruebas no demuestran un comportamiento idéntico del mecanismo con el del escarabajo, estos validan la bio-inspiración ya que el

mecanismo produce un comportamiento equivalente y es lo suficientemente bueno para la aplicación deseada. Teniendo presente las posibles causas de las variaciones en el comportamiento, es posible trabajar con el prototipo, hacer iteraciones y realizar nuevas pruebas.

### **8.2.6. Limitaciones de la plataforma de pruebas**

Como se mencionó en la Sección [8.2.4](#), la plataforma de pruebas presentó problemas a causa de mecanismo de liberación y el factor humano.

Dada la naturaleza de las siguientes pruebas a realizarse con el prototipo, es necesario corregir estos problemas. En el próximo capítulo se describen los cambios realizados a la plataforma de pruebas, para lograr una liberación del mecanismo automatizada.

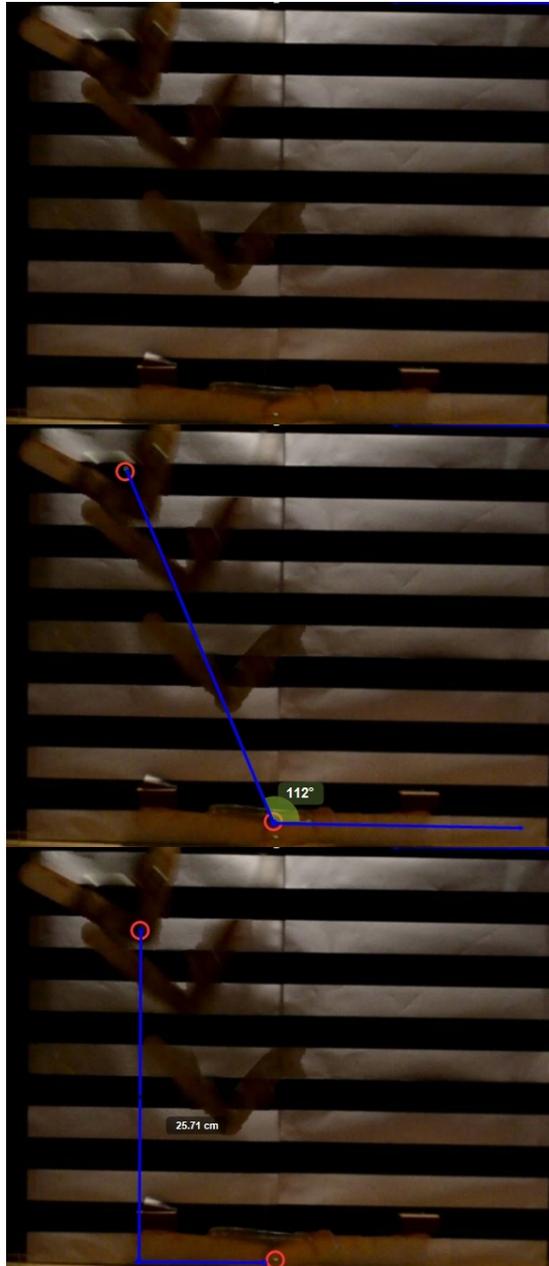


Figura 53: Resultados de prueba con Resorte 1, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

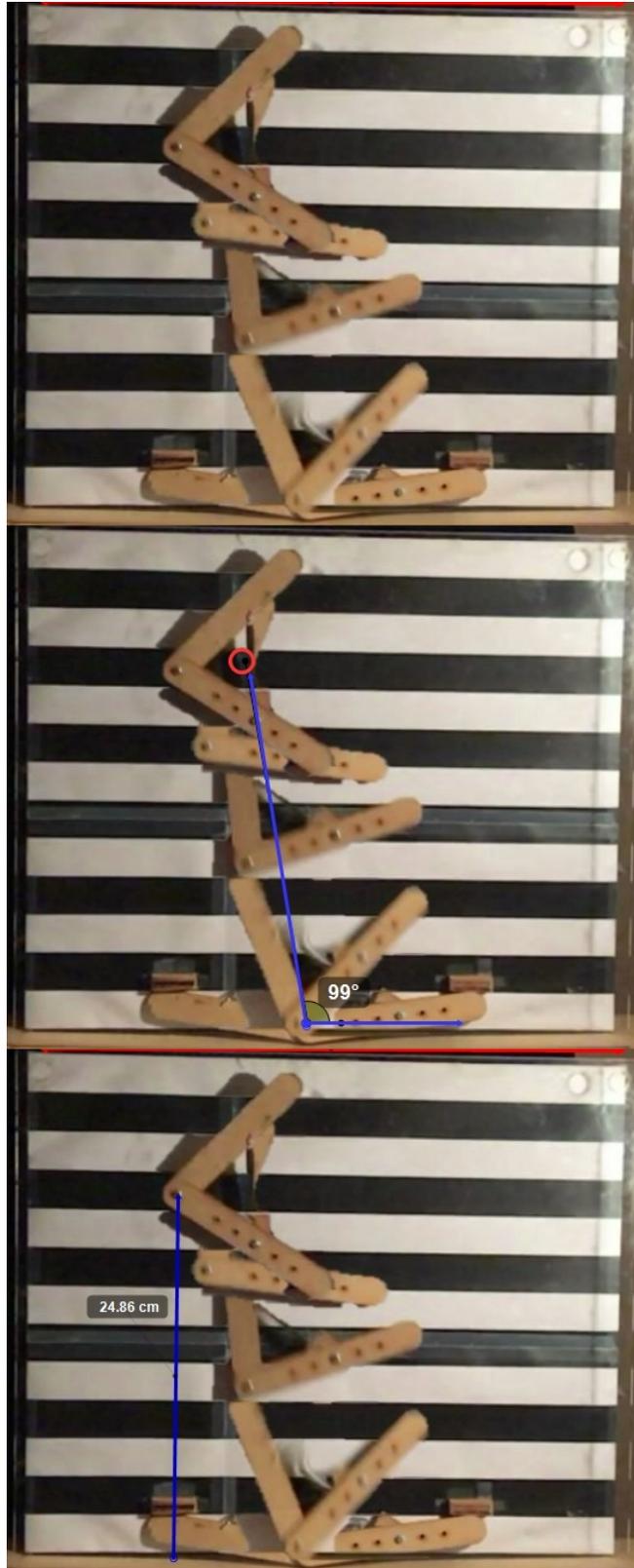


Figura 54: Resultados de prueba con Resorte 2, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

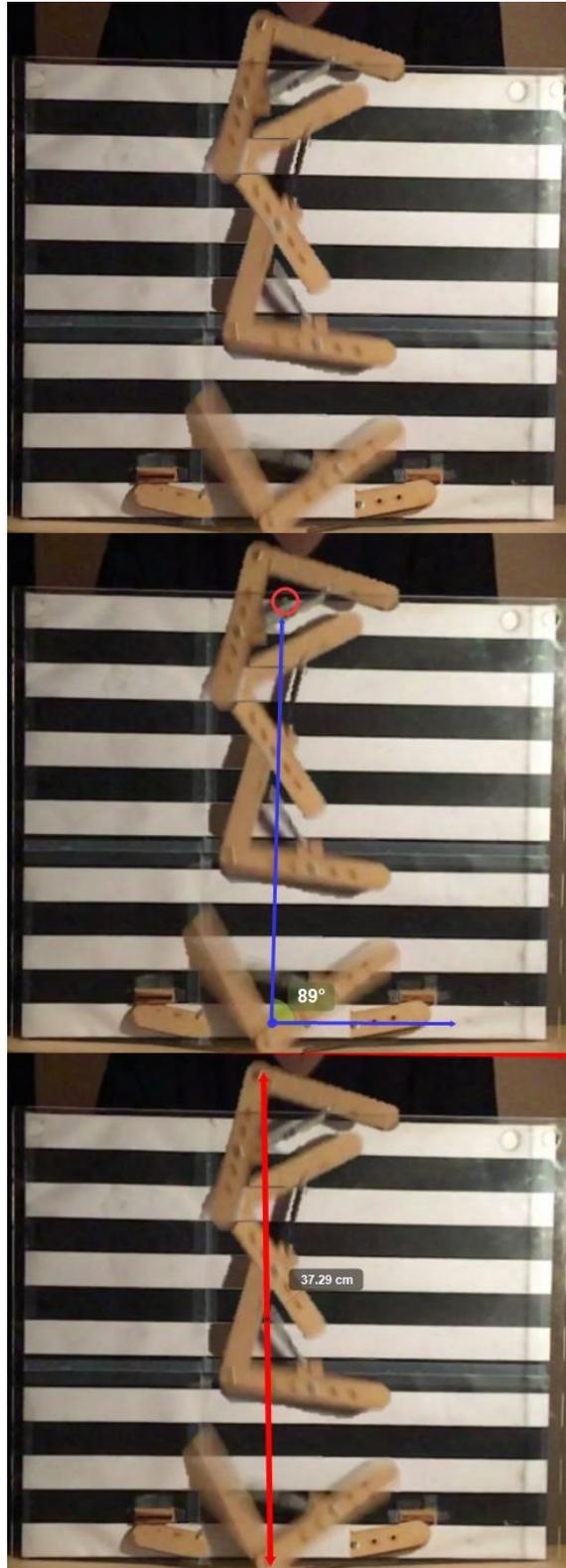


Figura 55: Resultados de prueba con Resorte 3, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

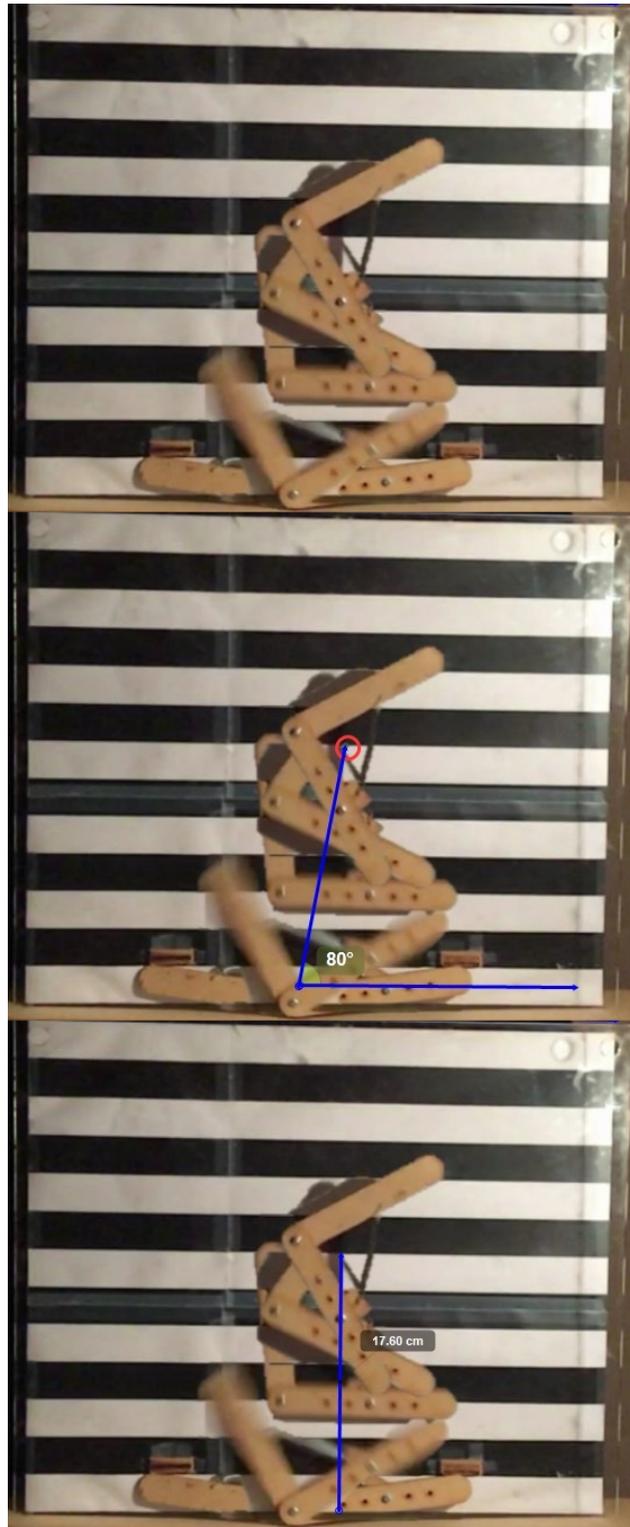


Figura 56: Resultados de prueba con Resorte 4, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

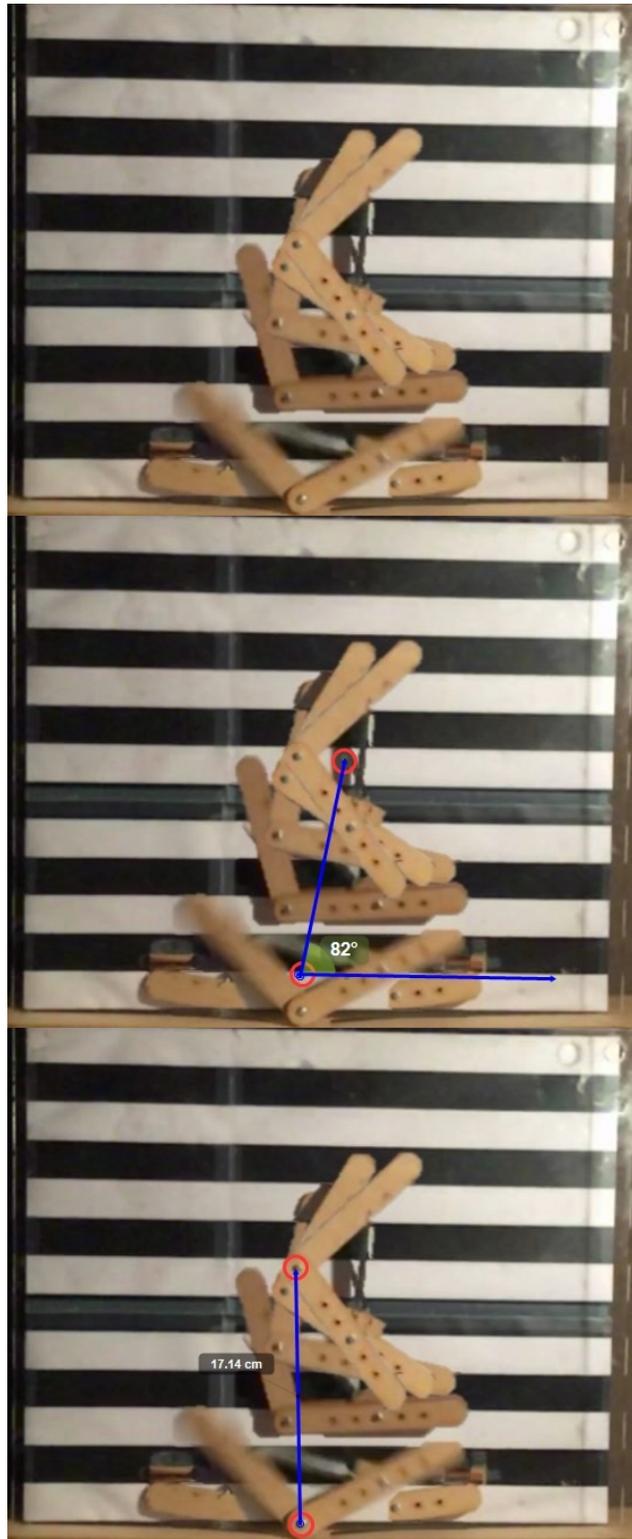


Figura 57: Resultados de prueba con Resorte 5, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

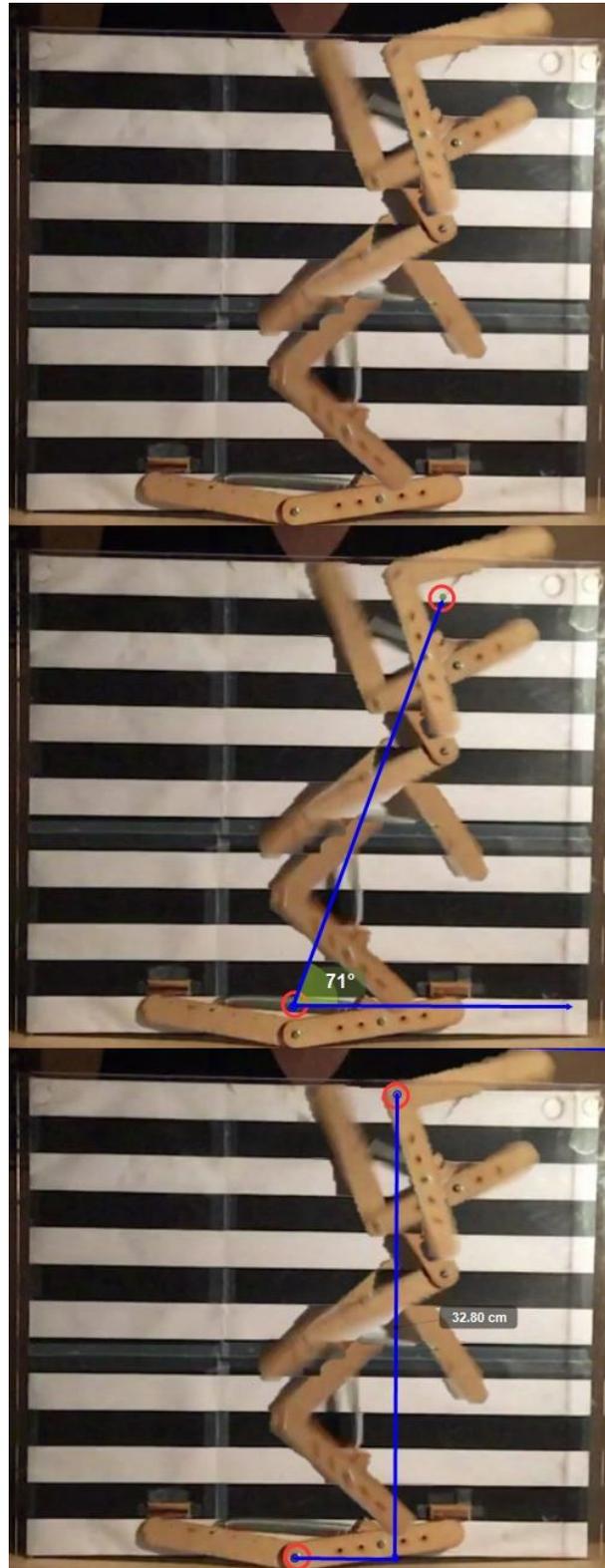


Figura 58: Resultados de prueba con Resorte 6, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

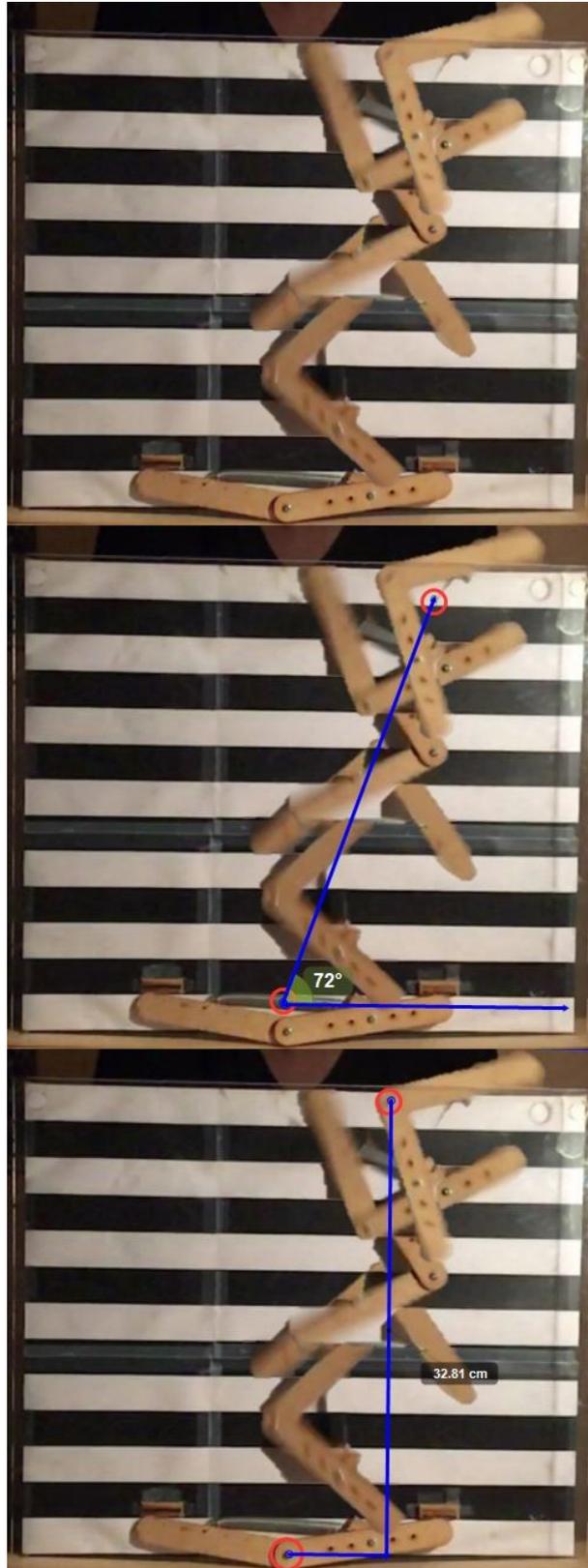


Figura 59: Resultados de prueba con Resorte 7, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

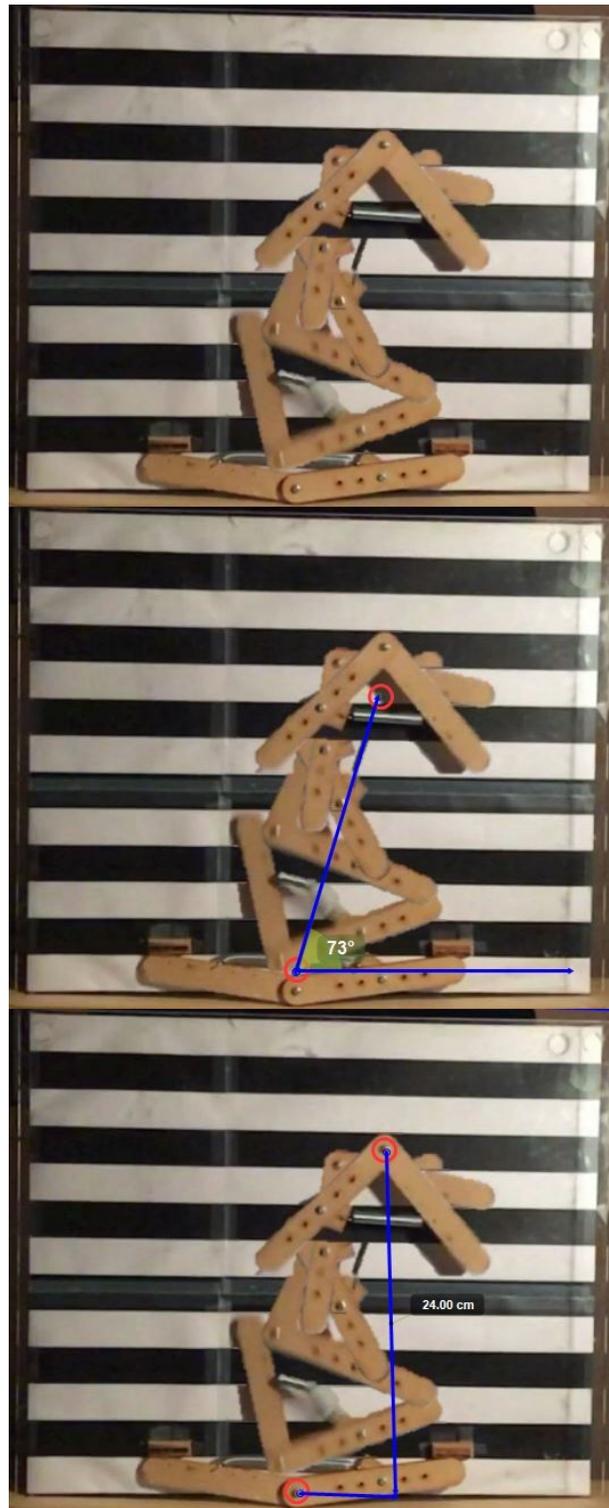


Figura 60: Resultados de prueba con Resorte 8, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima

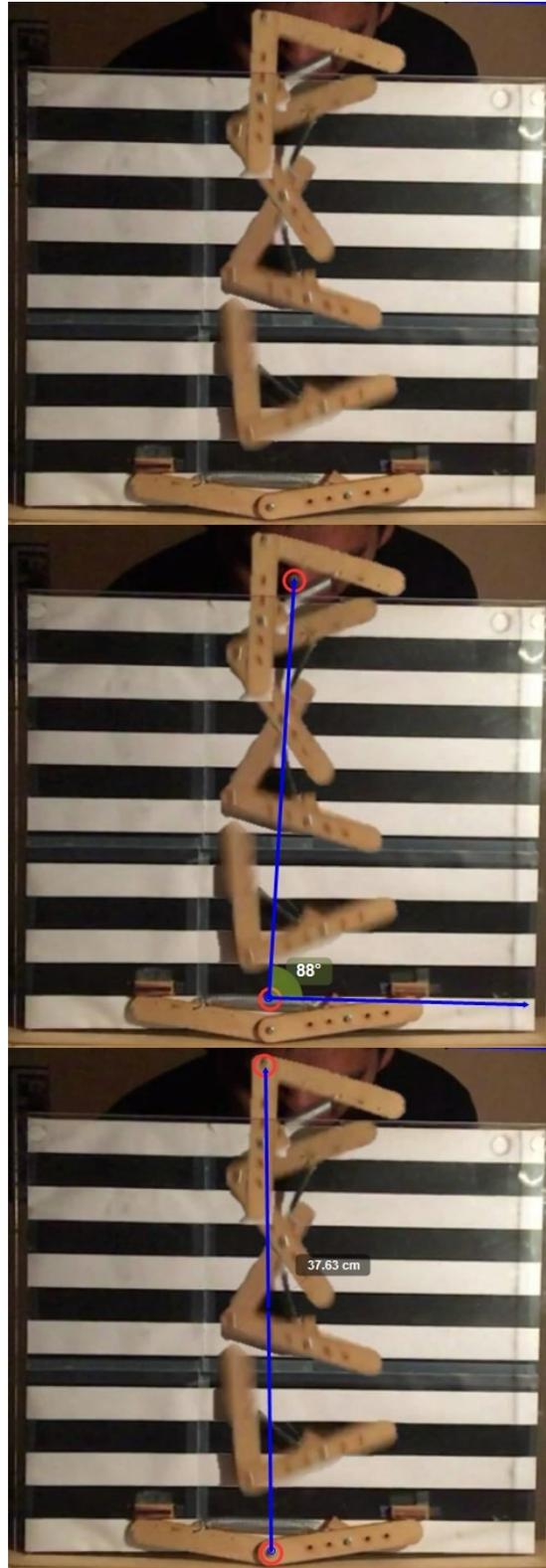


Figura 61: Resultados de prueba con Resorte 9, de arriba hacia abajo: Perfil de despegue; Ángulo de despegue; Altura máxima



En el capítulo anterior se puso a prueba el mecanismo para determinar si este replicaba el comportamiento de los Escarabajos Clic. A pesar de que no hay una relación uno a uno, se concluyó que tanto el mecanismo como la bio-inspiración detrás de él, son válidos y útiles para los objetivos planteados.

En este capítulo se presentan los cambios implementados en los diseños del mecanismo y de la plataforma de pruebas. Estos cambios buscaban optimizar los recursos energéticos en el mecanismo y solucionar los problemas presentados por la plataforma de pruebas.

## 9.1. Un nuevo diseño para el mecanismo

Como se estudió en la Sección [6.2.3](#), los grados de libertad de un mecanismo determinan la complejidad de su movimiento y su control. Entre más grados de libertad posea un mecanismo, se requieren más actuadores para poder controlarlo en su totalidad.

Por esta razón, se buscó reducir la complejidad del mecanismo eliminando un grado de libertad. Esto se logró al eliminar el eslabón corto móvil y uniendo el resorte a una pieza fija en el mismo punto.

Con esta modificación también buscó optimizar los recursos energéticos provistos por el resorte. Durante las pruebas realizadas en el capítulo anterior se observó que, luego del impacto contra sí mismo, en el resorte se producían un gran número de oscilaciones de gran amplitud. Al unir directamente el resorte con el eslabón se buscó que toda la energía del impacto fuera trasladada al salto.

La Figura [62](#) muestra la nueva propuesta de diseño. Como se puede observar, es el mismo diseño con la diferencia de que el eslabón móvil fue reemplazado por una pieza unida al





Figura 63: Altura máxima con diseño anterior

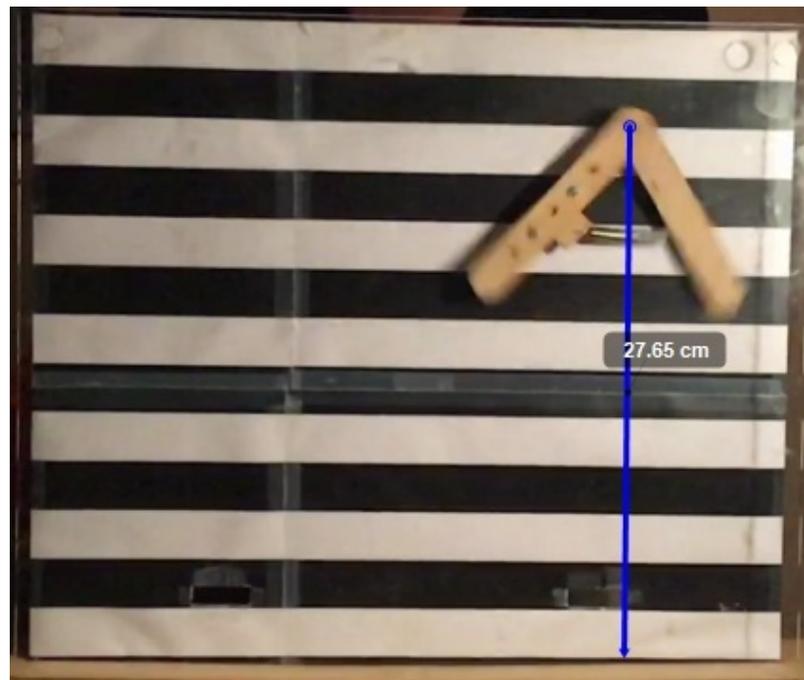


Figura 64: Altura máxima con diseño nuevo

### 9.2.1. Selección de elementos de automatización

Existen muchos elementos que pueden ser implementados para la automatización de la plataforma: Motores DC, Servo motores, cilindros hidráulicos, cilindros neumáticos, entre otros. Sin embargo, dada la naturaleza de la aplicación y buscando simplificar el proceso de construcción, se optó por la utilización de solenoides.

Como se estudió en la Sección 6.6, los solenoides son actuadores lineales accionados por medio de un campo magnético generado por una bobina en su interior.

Se optó por implementar solenoides debido a su naturaleza lineal y por la magnitud de las fuerzas generadas en su movimiento. Además, estos elementos son fáciles de controlar por medio de interruptores y circuitos eléctricos sencillos.

### 9.2.2. Plataforma de pruebas automatizada

#### Partes de la plataforma

El tipo de solenoides utilizados para la plataforma se muestra en la Figura 65. Estos se colocaron en la parte trasera de la plataforma de tal forma que el eje móvil estuviera alineado con los agujeros en la plancha trasera. Para ello se diseñaron dos soportes, que se unen a la parte trasera utilizando tornillos. El diseño del soporte se muestra en la Figura 66. Estos soportes fueron impresos en 3D utilizando PLA.



Figura 65: Solenoide utilizado para la automatización de la plataforma de pruebas 16

Para la cabeza de cada solenoide se diseñó una pieza cuadrada, las cuales serían las encargadas de mantener al mecanismo cargado hasta que los solenoides fueran activados. Esta pieza se muestra en la Figura 67. Estas piezas fueron impresas en 3D utilizando PLA como materia prima.

Finalmente, para evitar que los tornillos soportarán todo el peso de los solenoides y sus soportes, se colocaron bases en la parte trasera de los soportes de los solenoides. Estas bases fueron impresas en 3D y se adhirieron utilizando pegamento.

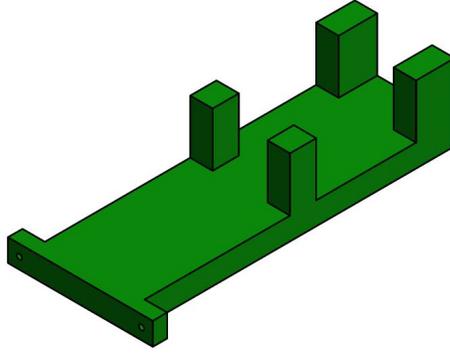


Figura 66: Soporte de Solenoide

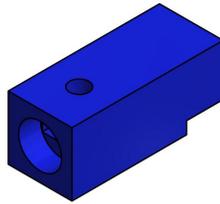


Figura 67: Pieza para punta de solenoide

### Plataforma terminada

La plataforma de pruebas automática resultante se muestra en la Figura 69; la Figura 68 muestra la plataforma con los solenoides implementados. Los planos de esta plataforma se encuentran en el Anexo 15.3.

### Nota importante

Se debe mencionar que el diseño de esta plataforma automática se realizó con base en las dimensiones y especificaciones del mecanismo utilizado para las pruebas que se estudiarán en el siguiente capítulo. La posición de los elementos deberá ser modificada si se desea realizar pruebas con otra versión del mecanismo.

### Control de los solenoides

Para el control de los solenoides se implementó un circuito eléctrico sencillo utilizando un interruptor de dos polos con doble tiro (DPDT), como el que se muestra en la Figura 70.

El diagrama esquemático del circuito implementado se muestra en la Figura 71. Es necesario el uso de una fuente de voltaje de 24 voltios que sea capaz de brindar más de dos amperios de corriente debido a la gran corriente requerida por los solenoides.

Con este circuito, las posiciones del interruptor reflejan el estado actual de los solenoides: extendidos o retraídos.

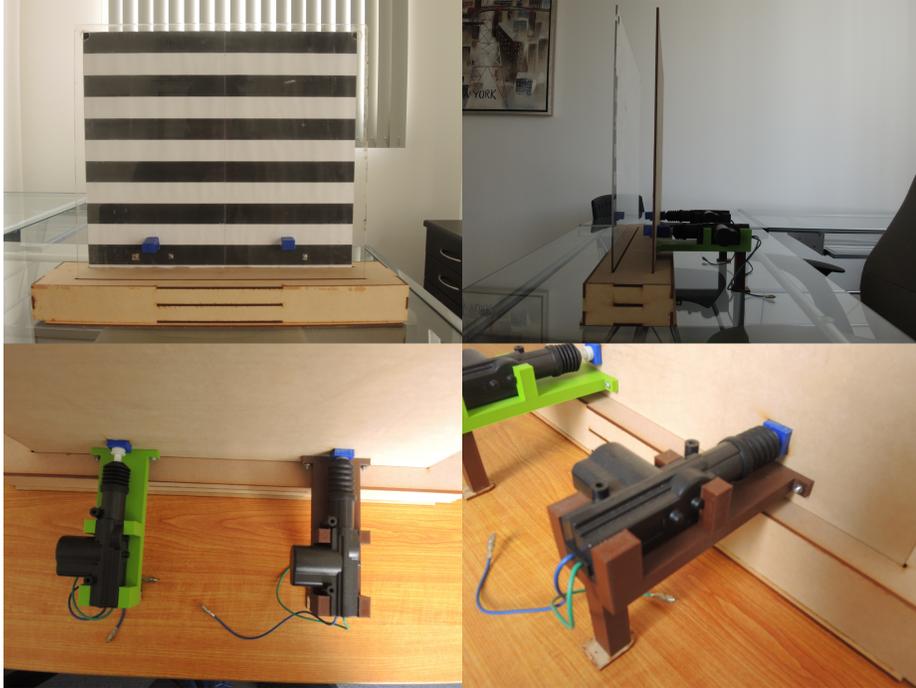


Figura 68: Plataforma con solenoides implementados

Con este circuito eléctrico se resuelve el problema de la liberación simultánea de los eslabones del mecanismo y, ya que los solenoides son accionados con señales eléctricas, la participación humana se reduce al accionamiento del interruptor.

### Funcionamiento de la plataforma automática

Para utilizar la plataforma de pruebas automática se deben seguir las siguientes instrucciones:

1. Realizar la conexión del circuito mostrado en la Figura 71 con los solenoides instalados en la plataforma.
2. Retirar la plancha de acrílico y mover el interruptor a la posición en la cual los solenoides se extienden.
3. Cargar el mecanismo y colocarlo debajo de las piezas en las puntas de los solenoides.
4. Colocar nuevamente la plancha de acrílico.
5. Mover la posición el interruptor para liberar el mecanismo.

Con el nuevo diseño del mecanismo y la plataforma de pruebas automática, fue posible la realización de nuevas pruebas.

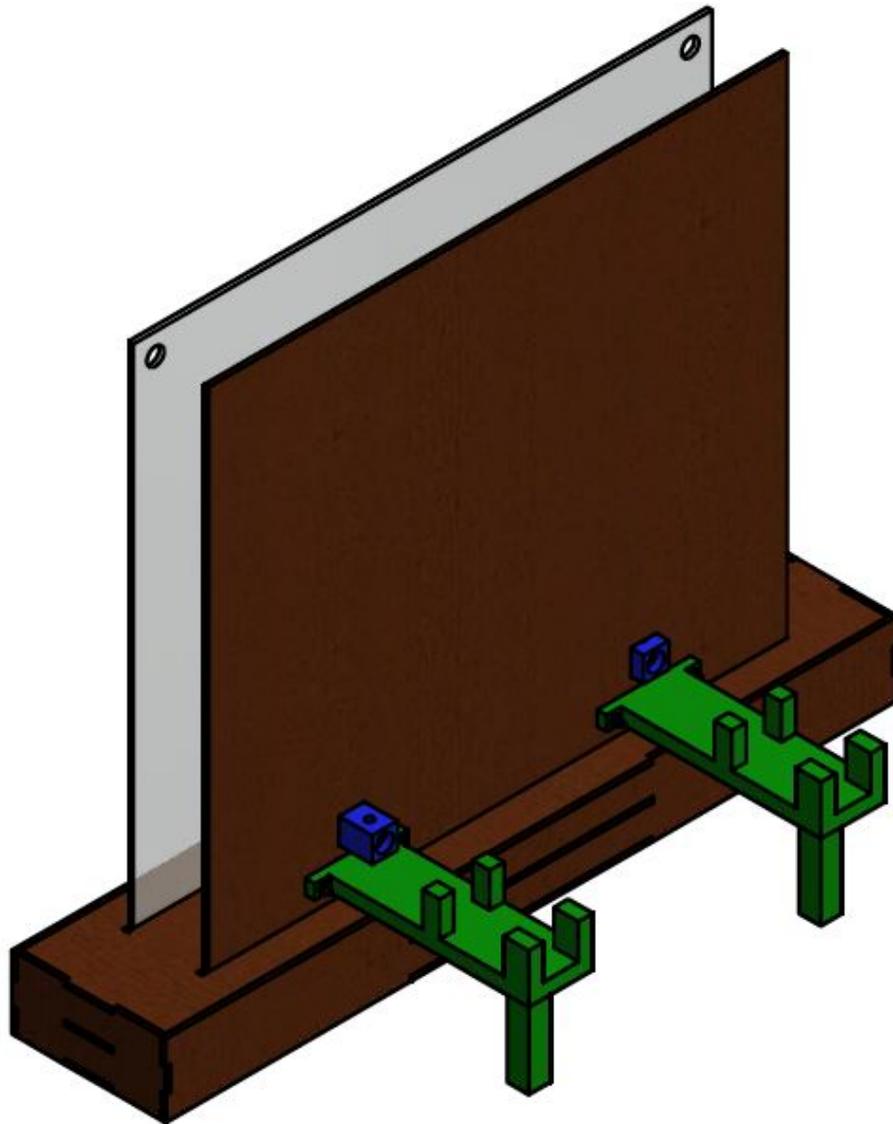


Figura 69: Plataforma de pruebas automatizada

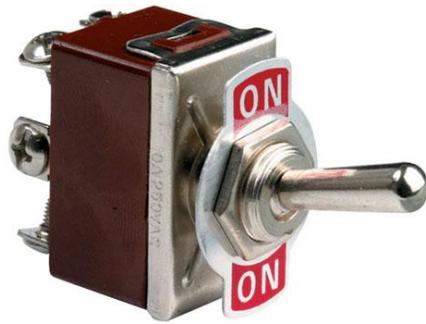


Figura 70: Interruptor de dos polos con doble tiro 17

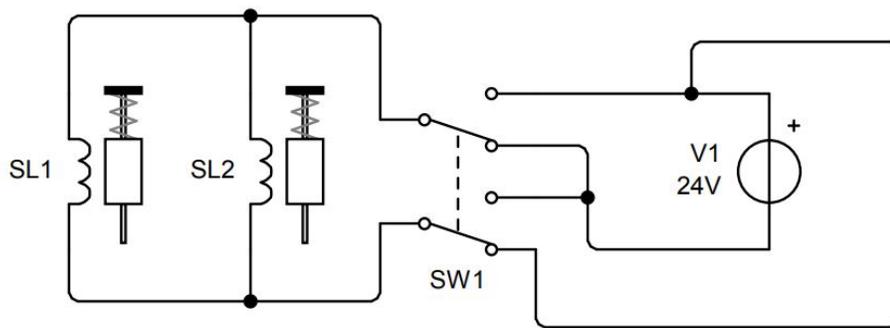


Figura 71: Diagrama esquemático de circuito de control

---

## Caracterización del mecanismo

---

Con el diseño del mecanismo propuesto y pruebas que validan su funcionamiento, resta caracterizar el movimiento del mismo. Para ello, se llevaron a cabo pruebas que permitieron comprender de qué forma afectan las masas e inercias de los eslabones del mecanismo en su dinámica.

### 10.1. Masas e inercias

Dado que el funcionamiento del mecanismo involucra la rotación de los eslabones alrededor de un pivote común y una vez en el aire, también involucra rotaciones sobre sí mismo, se dedujo que las masas e inercias de los eslabones juegan un papel importante en el comportamiento del mismo. Por lo tanto, se realizaron pruebas en donde fuera posible modificar las masas de los eslabones y analizar el comportamiento del mecanismo ante distintos casos.

### 10.2. Modificación del mecanismo

Para modificar la masa e inercia de los eslabones del mecanismo fue necesario añadir elementos al diseño del mismo.

#### 10.2.1. Masas Pasco

Ya que se deseaba modificar la masa de los eslabones en proporciones exactas (4:1, 2:1, 1:1,...), fue necesario utilizar elementos con masas predeterminadas. Por esta razón se optó

por la utilización de masas Pasco, las cuales ofrecen una gran variedad de valores de masa y cuya incertidumbre es despreciable.

Además de tener valores de masa predeterminados, estos elementos poseen una geometría compacta, lo cual facilitó la tarea de acoplarlos a los eslabones. En la Figura 72 se muestran algunas de estas masas.



Figura 72: Masas Pasco 18

### 10.2.2. Porta masas Pasco

Para poder acoplar las masas Pasco a los eslabones del mecanismo se diseñó un contenedor cilíndrico en el cual es posible colocar varios de estos elementos y luego unirlos al eslabón utilizando tornillos. El porta masas Pasco se muestra en la Figura 73.

Estos elementos fueron impresos en 3D utilizando PLA como materia prima.

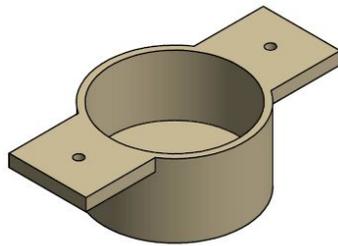


Figura 73: Porta masas Pasco

### 10.2.3. Modificación a dimensiones y diseño del mecanismo

Debido a que el objetivo de las pruebas a realizarse era determinar de qué forma las inercias de los eslabones afectan el comportamiento del mecanismo, fue necesario realizar modificaciones al mismo.

El nuevo diseño del mecanismo, con los porta masas Pasco implementados, se muestra en la Figura 74. Como se puede observar, se incrementó el ancho de los eslabones y se modificaron las piezas encargadas de sujetar el resorte. También es importante notar que los

porta masas Pasco se colocan en el centro del eslabón y en lados opuestos del mecanismo. A continuación se explican el concepto detrás de las modificaciones realizadas.

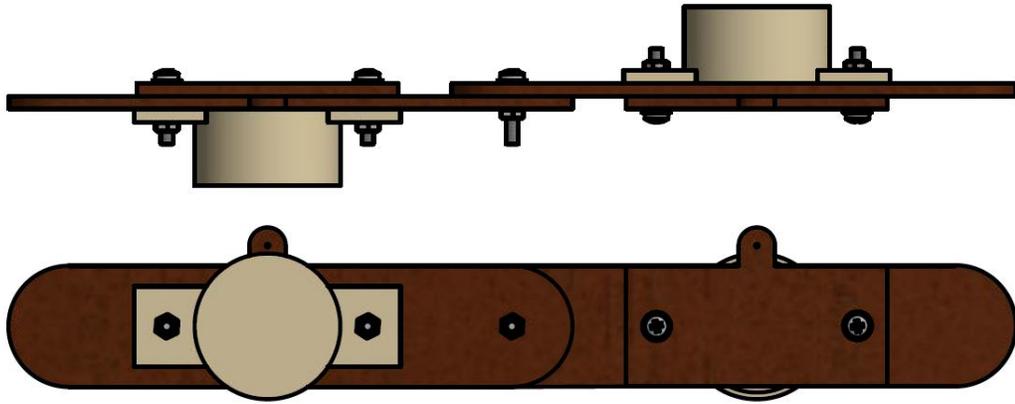


Figura 74: Mecanismo con porta masas Pasco

### Momento de inercia de los eslabones

El momento de inercia de un eslabón respecto al pivote se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$I_A = mr^2 \quad (34)$$

Donde  $m$  es la masa total del eslabón y  $r$  es la distancia desde el centro de masa al pivote.

Se debe recordar que el centro de masa de un elemento plano, simétrico con respecto a los dos ejes coordenados y homogéneo, se encuentra en el centro geométrico del elemento. De esta forma, es posible determinar que el centro de masa del eslabón se encuentra en el centro del mismo, como se muestra en la Figura 75.

Esta afirmación es verdadera si se desprecia el desplazamiento del centro de masa que genera el elemento que sostiene el resorte y si se asume que el material en todos los elementos es homogéneo.

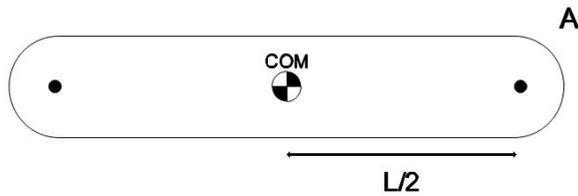


Figura 75: Centro de masa de eslabón

Con estas suposiciones, la ecuación 34 se convierte en

$$I_A = \frac{mL^2}{4} \quad (35)$$

La ecuación 35 muestra la razón por la cual el mecanismo se modificó de la forma mostrada en la Figura 74. La distancia del centro de masa al pivote es constante y todas las piezas que conforman al mecanismo tienen masa constante. De esta forma, es posible controlar la relación de momentos de inercia variando únicamente la masa que se coloca en el porta masas Pasco.

Por ejemplo, si se desea obtener una relación 4:1, bastará con colocar una masa de 5g en uno de los eslabones y una masa 20g en el otro.

### Momentos en eje longitudinal

A causa de las dimensiones de las masas Pasco, estas no pueden ser consideradas como elementos planos y, por consiguiente, generan momentos alrededor del eje longitudinal del mecanismo. Para suprimir los efectos de estos momentos, los porta masas Pasco fueron colocados en lados opuestos del mecanismo. De esta forma, los momentos se anulan mutuamente.

## 10.3. Pruebas realizadas

Luego de la implementación de los cambios correspondientes, se procedió a la realización de pruebas empleando distintas relaciones de masa e inercia en los eslabones.

Las pruebas realizadas fueron grabadas a una velocidad de 120 fps. El método utilizado para la grabación de las pruebas fue el mismo que se utilizó en las pruebas del Capítulo 8, el cual se muestra en la Figura 51.

Se utilizó el Resorte 9 del Cuadro 1 para la realización de las pruebas puesto que su constante elástica permitía que el mecanismo despegara del suelo aun con las carga de masa adicional.

### 10.3.1. Relación 1:1

Para iniciar, se realizaron pruebas utilizando una relación 1:1 colocando masas iguales en los dos eslabones. Se optó por realizar pruebas utilizando dos valores de masas: 20g y 40g.

En la Figura 76 y en la Figura 77 se observan los resultados de las pruebas realizadas con 20g y 40g, respectivamente.

Como se observa, el mecanismo ejecuta el salto sin ninguna dificultad. Sin embargo, es posible notar que presenta una característica muy particular: Despega sin presentar ningún tipo de rotación. Esto presenta un gran contraste comparado con las pruebas realizadas en

el Capítulo 8, en donde se observó que el mecanismo ejecutaba por lo menos una rotación luego de despegar.

El comportamiento presentado brinda indicios acerca de las fuerzas que actúan sobre el mecanismo: Al igualar la inercia de los eslabones, las fuerzas que imponían un momento rotacional sobre el mecanismo fue suprimida.

Esta prueba permitió observar que si la relación de masa e inercia entre los eslabones es igual a 1, las componentes de rotación se eliminan y quedan únicamente las componentes de traslación. Sin embargo, aún quedaba la interrogante sobre la relación de masa e inercia que debía tener el mecanismo para asegurar su auto-volteo. Con el objetivo de responder a esta interrogante se procedió a la realización de pruebas con distintas relación de masa entre los eslabones hasta encontrar la relación deseada.

### 10.3.2. Relación 2:1

Se inició con la relación más sencilla: Un eslabón con el doble de masa que el otro.

Las masas utilizadas en este caso fueron 40g en el eslabón derecho y 20g en el eslabón izquierdo. El resultado de esta prueba se muestra en la Figura 78.

Como se puede observar, este es el comportamiento que se buscaba. Se puede apreciar cómo el mecanismo se eleva y ejecuta la mitad de una revolución para caer sobre su lado opuesto. Este es el comportamiento ideal para cualquier plataforma o vehículo capaz de autovoltearse.

Para validar el comportamiento observado con esta relación, se procedió a realizar otra prueba: La misma relación de masas, 2:1, solo que esta vez se intercambiaron las masas en los eslabones. Es decir, el eslabón derecho sostenía la masa de 20g y el eslabón izquierdo la masa de 40g. El resultado de esta prueba se muestra en la Figura 79.

Como se observa, el comportamiento es exactamente el mismo, con la única diferencia de que el mecanismo gira en sentido antihorario; caso contrario al observado en la prueba anterior. A pesar de esto, el sentido de rotación del mecanismo no tiene relevancia en el análisis, por lo que es posible concluir de que el comportamiento es el mismo para los dos casos.

## 10.4. Análisis cualitativo del mecanismo

De las pruebas realizadas en la sección anterior es posible hacer dos observaciones importantes:

- Si los eslabones poseen el mismo momento de inercia respecto al pivote, el mecanismo despega con una dirección aproximadamente vertical y con velocidad angular muy cercana a 0.
- Una relación 2:1 de momento de inercia respecto al pivote genera un autovolteo ideal.

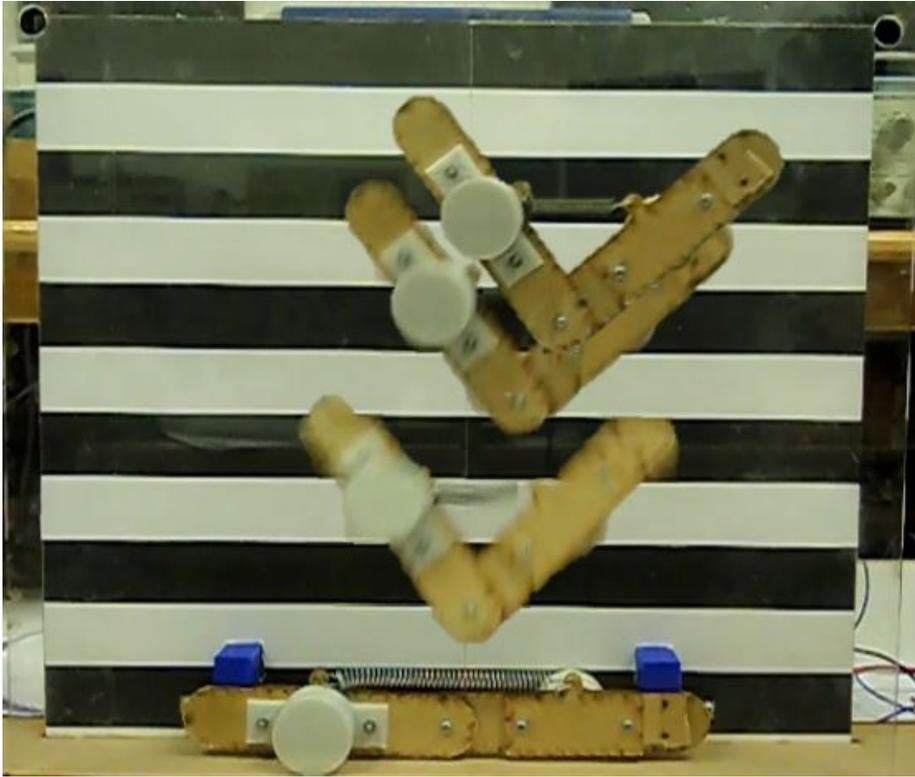


Figura 76: Prueba con relación 1:1; 20g

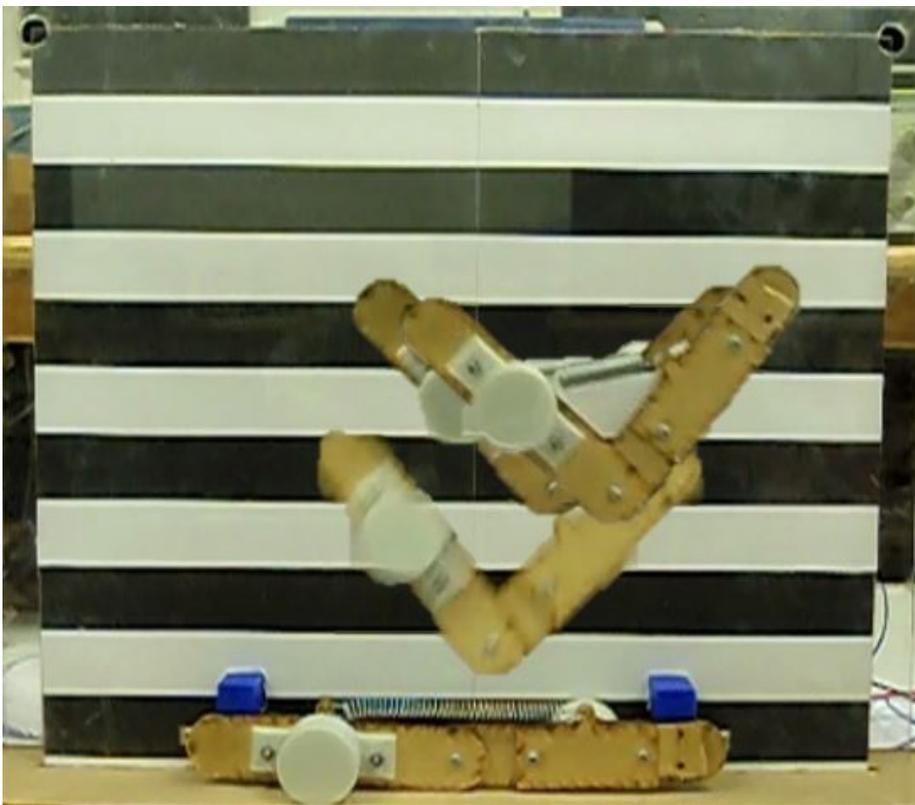


Figura 77: Prueba con relación 1:1; 40g

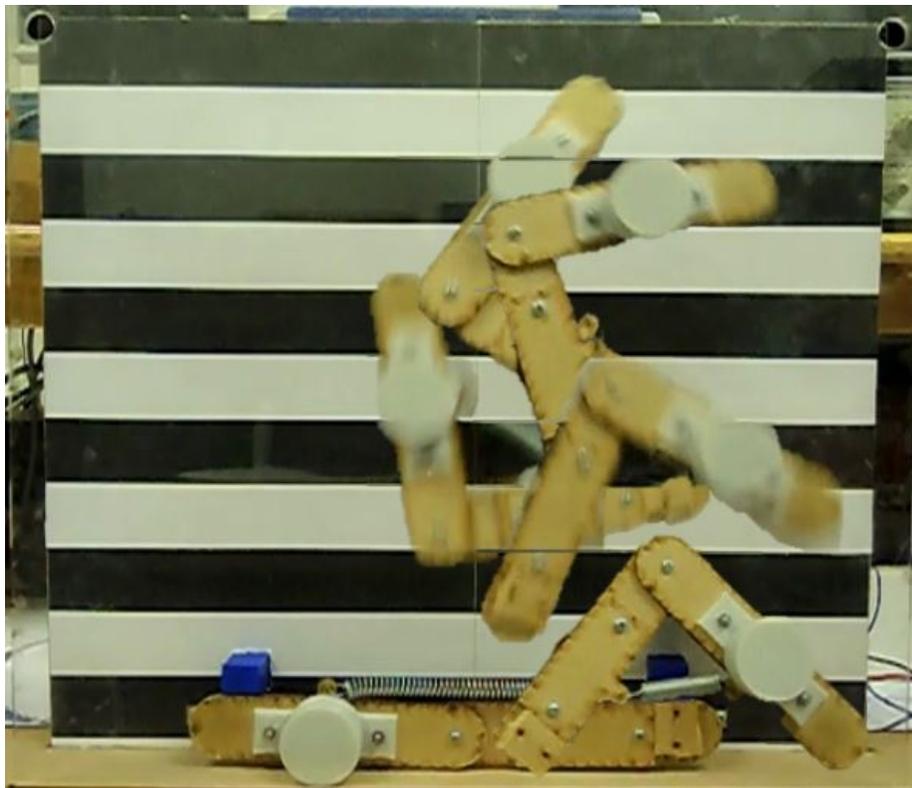


Figura 78: Prueba con relación 2:1: Derecho 40g; Izquierdo: 20g

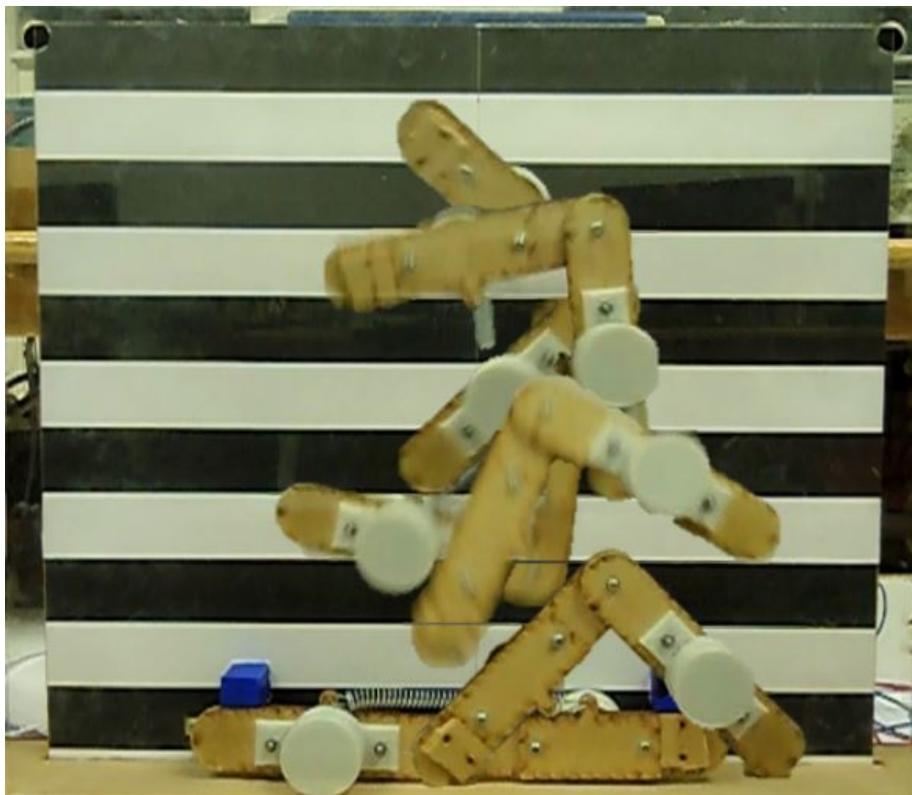


Figura 79: Prueba con relación 2:1: Derecho: 20g; Izquierdo: 40g

Estas son observaciones importantes e interesantes, pero se deseaba conocer cuáles eran los conceptos fundamentales detrás del salto. En el resto de la sección se desarrolla un análisis dinámico del mecanismo.

#### 10.4.1. Modelo de Ribak

Como fue estudiado en la Sección 6.1.3, Ribak propuso un modelo sencillo para describir el movimiento de las subpartes del escarabajo antes de ejecutar el despegue.

El modelo asume que las dos masas que conforman al escarabajo rotan alrededor de un pivote sin fricción bajo la acción de un momento de igual magnitud pero en direcciones opuestas.

$$I_{(A)O}\dot{\omega}_A = I_{(P)O}\dot{\omega}_P \quad (36)$$

Donde los subíndices  $A$  y  $P$  denotan las dos unidades de masa que conforman al escarabajo.

Si se asume que los dos eslabones del mecanismo se liberan al mismo tiempo (lo cual se logra con la plataforma de pruebas) y que el pivote genera fuerzas de fricción despreciables, es posible aplicar este modelo al mecanismo y utilizar todas las ecuaciones derivadas de él.

De esta forma, el modelo aplicado al mecanismo quedaría de la siguiente forma

$$I_{(I)O}\dot{\omega}_I = I_{(D)O}\dot{\omega}_D \quad (37)$$

Donde los subíndices  $I$  y  $D$  hacen referencia al eslabón izquierdo y derecho, respectivamente.

El modelo de Ribak (Figura 12) adaptado al mecanismo se observa en la Figura 80. En este caso  $\alpha$  y  $\beta$  denotan el desplazamiento angular de los eslabones desde la superficie rígida hasta un momento antes del despegue y  $\theta$  representa el ángulo de flexión del mecanismo, es decir, el ángulo final entre los dos eslabones cuando el mecanismo despega.

Partiendo de la Ecuación 37 y siguiendo la deducción realizada por Ribak [6] se obtienen las siguientes expresiones para  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\theta}{1 + B} \quad (38a)$$

$$\beta = \frac{B\theta}{1 + B} \quad (38b)$$

Donde  $B$  es una constante dada por la proporción de los momentos de inercia de los eslabones respecto al pivote. Siendo más específicos:

$$B = \frac{I_{(I)O}}{I_{(D)O}} \quad (39)$$

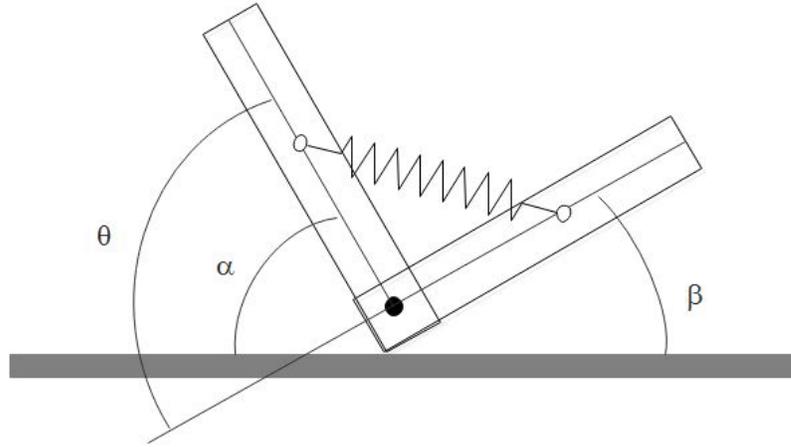


Figura 80: Modelo de mecanismo

Las Ecuaciones 38a y 38b demuestran que el desplazamiento angular de cada uno de los eslabones depende únicamente del ángulo de flexión del mecanismo y de la relación de momentos de inercia de los eslabones. Dado que el mecanismo tiene un ángulo de flexión definido,  $\theta = 90^\circ$ , estos valores varían únicamente debido a la relación de momentos de inercia.

#### 10.4.2. Análisis del centro de masa

Como se estudió en la Sección 6.4.7, el movimiento de un cuerpo rígido plano puede descomponerse como la suma de dos partes: Traslación y rotación. De forma más específica, *traslación del centro de masa y rotación alrededor del centro de masa*.

Como se estudió en dicha sección, el movimiento plano de un cuerpo rígido puede interpretarse como si la sumatoria de todas las fuerzas externas dieran como resultado una fuerza de magnitud  $m\bar{a}$  alineada con la trayectoria seguida por el centro de masa y un momento de magnitud  $I\alpha$  (Figura 30).

De esta forma, un análisis sobre el centro de masa del mecanismo puede ayudar a explicar el comportamiento observado en los dos casos estudiados.

El análisis se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. Se determinó la posición del centro de masa del mecanismo en su posición inicial.
2. Se determinó la posición del centro de masa del mecanismo un momento antes del despegue.
3. Se determinó la trayectoria seguida por el centro de masa, la cual permitió determinar la dirección y punto de aplicación de la *fuerza de despegue resultante*.

Determinar la dirección y punto de aplicación de la fuerza de despegue es de gran importancia. Al recordar la Sección 6.1.3, Ribak [6] demostró que cuando la fuerza de despegue

que impulsa al escarabajo no coincide con el punto de contacto del escarabajo con el suelo, ésta genera un momento rotacional que provoca que el escarabajo gire sobre sí mismo.

### Relación 1:1; B=1

A continuación se presenta el análisis de la dinámica del mecanismo en el caso en donde los dos eslabones tienen la misma masa  $y$ , por lo tanto, el mismo momento de inercia. Al resolver las ecuaciones mostradas en [38] sustituyendo los valores  $\theta=90^\circ$  y  $B=1$  se obtuvieron los siguientes valores para  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\begin{aligned}\alpha &= 45^\circ \\ \beta &= 45^\circ\end{aligned}\tag{40}$$

Estos valores son lógicos ya que, al tener los dos eslabones la misma masa e inercia alrededor del pivote, se mueven a velocidades angulares iguales. Los dos eslabones viajan la misma distancia angular antes de que el resorte regrese a su longitud inicial y se ejecute el salto.

Luego de esto, se calculó la posición del centro de masa en las dos posiciones de interés.

Utilizando el procedimiento estudiado en la Sección [6.3] y la información mostrada en la Figura [75] se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras [81] y [82].

Como se puede observar, el centro de masa se mueve a lo largo del eje  $y$  mientras el mecanismo se mueve desde su posición inicial hasta un momento antes del despegue. Con esto se puede concluir que la fuerza de despegue es vertical con dirección hacia el eje  $y$  positivo. También se observa que, al ser una fuerza totalmente vertical, su línea de acción coincide con el punto de contacto del mecanismo con el suelo. Esta coincidencia del punto de contacto con el suelo y línea de acción evita que se produzcan momentos en torno al centro de masa, manteniendo la velocidad angular del mecanismo igual a cero.

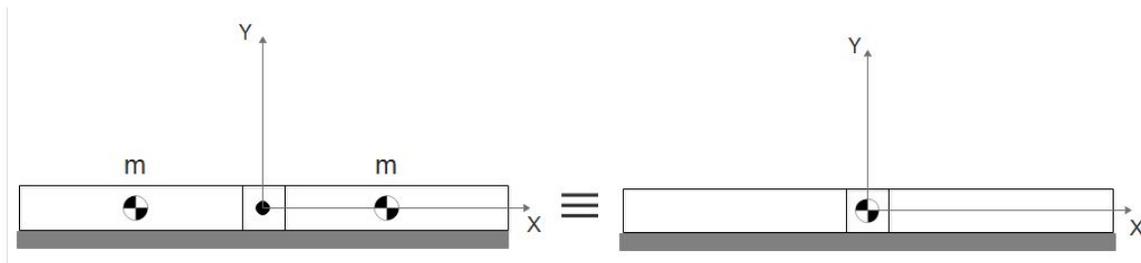


Figura 81: Centro de masa: Posición inicial

Al analizar la Figura [76] y la Figura [77] es posible observar que, a pesar de que la velocidad angular del mecanismo es muy cercana a cero, el mecanismo no despega verticalmente como predice el modelo. Esta discrepancia entre la teoría y las pruebas reales puede ser causada por varios factores: Es posible que el mecanismo, a pesar de los cuidados en su diseño, no corresponda al modelo *ideal* y causar alteraciones en el resultado final.

También es posible de que la plataforma de pruebas libere los eslabones del mecanismo

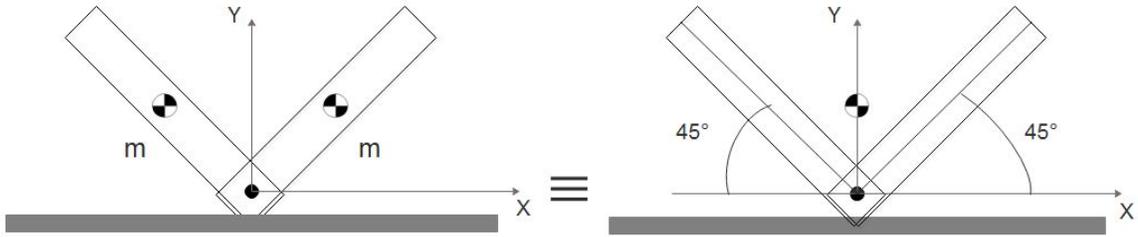


Figura 82: Centro de masa: Posición final

con pequeños desfases de tiempo, imperceptibles para el ojo humano, pero significativos para el salto.

A pesar de que las pruebas realizadas no corresponden al modelo de forma idéntica, éstas validan el análisis realizado sobre el mecanismo.

### Relación 2:1; B=2

A continuación se presenta el análisis realizado para el caso en donde los eslabones tienen una relación 2:1 de masa e inercia. Una vez más, se resolvió la Ecuación 38 substituyendo los valores  $\theta=90^\circ$  y  $B = 2$ , obteniendo los siguientes valores para  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\begin{aligned}\alpha &= 60^\circ \\ \beta &= 30^\circ\end{aligned}\tag{41}$$

En este caso se puede observar que uno de los eslabones (el de menor masa y momento de inercia) tiene un desplazamiento angular mayor que el otro eslabón. Nuevamente se calculó la posición del centro de masa del mecanismo en las dos posiciones de interés. Los resultados se muestran en las Figuras 83 y 84.

Con estos resultados se puede observar que la posición inicial del centro de masa ya no es el origen del plano cartesiano; este se encuentra sobre el eje  $x$  positivo, atraído por el eslabón con mayor masa, como era de esperarse.

Luego, en la posición final, se observa que el centro de masa ya no se mueve únicamente en dirección vertical sino que también tiene un desplazamiento a lo largo del eje  $x$  positivo. Esto provoca que la fuerza de despegue tenga un ángulo distinto a  $90^\circ$  respecto a la horizontal.

De estos resultados también es posible observar que la línea de acción de la fuerza de despegue no se encuentra alineada con el punto de contacto del mecanismo con el suelo. Este desfase provoca genera un par que le impone al mecanismo una velocidad angular provocando que esté gire sobre su centro de masa y caiga de la forma observada en las pruebas.

Lamentablemente, no es posible calcular la magnitud de la fuerza de despegue y la distancia entre ésta y el punto de contacto con el suelo para obtener la magnitud del momento que hace girar al mecanismo. A pesar de esto, es posible comprobar que el comportamiento observado en las pruebas coincide con la función de Ribak 6 mostrada en la Figura 13. La

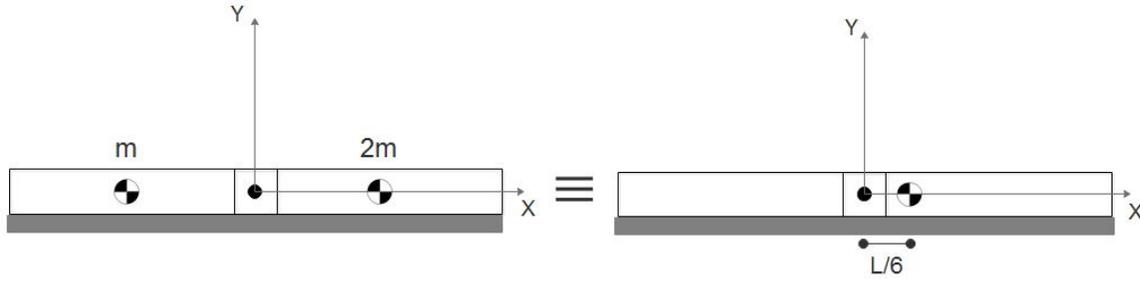


Figura 83: Centro de masa: Posición inicial

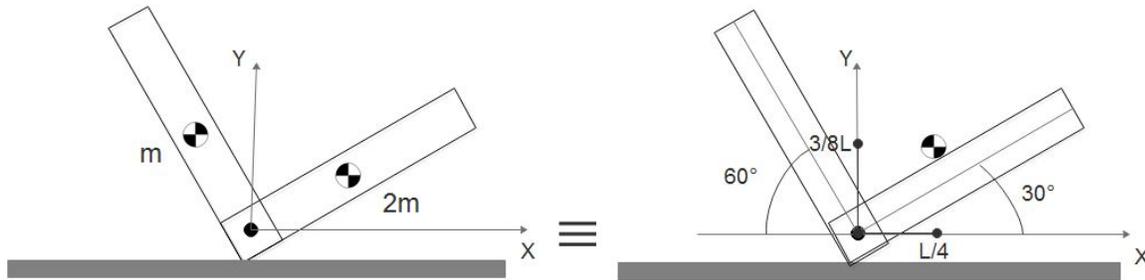


Figura 84: Centro de masa: Posición final

función muestra la velocidad angular adquirida por el escarabajo en base a la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el punto de contacto con el suelo. Sin embargo, para el análisis del mecanismo nos interesa únicamente la dirección de rotación del mecanismo. En este caso, la fuerza de despegue se encuentra a la derecha del punto de contacto del mecanismo con el suelo. Según Ribak, en este caso el mecanismo debe rotar en sentido horario. La Figura 78 muestra que el mecanismo despegue y rota en sentido horario, confirmando el resultado de la función de Ribak.

El mismo procedimiento puede ser aplicado al caso alternativo con relación 2:1 estudiado, obteniendo resultados similares.

### 10.4.3. Conclusión de las pruebas

Los resultados obtenidos de las pruebas permitieron comprender cómo la masa y momento de inercia de los eslabones del mecanismo propuesto afectan el comportamiento del mismo y cómo es posible aprovechar este comportamiento en favor de la aplicación que se desea implementar.

Con este nuevo conocimiento, fue posible implementar el mecanismo en una plataforma robótica, la cual se estudia en el siguiente capítulo.

---

## Plataforma robótica

---

Una vez se comprobó la funcionalidad del mecanismo propuesto y se comprendió su funcionamiento general, se procedió al diseño de una plataforma robótica o vehículo terrestre que lo implementara. De esta forma sería posible evaluar la viabilidad de la implementación y sus limitantes.

Debido a que el único propósito de la construcción de esta plataforma era evaluar el mecanismo propuesto y demostrar que la implementación del mismo en un vehículo permite su *autovolteo*, se propuso un diseño sencillo. Por lo tanto, el diseño del vehículo no tuvo como prioridad incorporar elementos para movilidad autónoma o carga automática del mecanismo. Tampoco se le dió prioridad a que la plataforma fuera eficiente en el uso de energía.

### 11.1. Diseño del vehículo

El diseño de la plataforma robótica debía ser sencilla, con el objetivo de reducir su peso y de facilitar la implementación del mecanismo. El diseño final se muestra en la Figura 85. Como se puede observar, el diseño del vehículo implementado es una variación del mecanismo propuesto: Consiste de dos partes o *eslabones* separados, los cuales se unen en la parte superior en un pivote común además de estar unidos por medio de un resorte (No mostrado en la Figura). En los extremos de los elementos se colocaron llantas, las cuales se unen a los eslabones por medio soportes atornillados a ellos. Dentro del vehículo se colocó un servo motor, el cual controla la carga y liberación del mecanismo. Soportes cuadrados instalados en medio de los eslabones dan rigidez y soporte a la plataforma.

Los materiales utilizados para la construcción de la plataforma fueron: Madera MDF, acrílico y piezas impresas en 3D utilizando PLA como materia prima. El ensamblaje se llevó a cabo utilizando pegamento y tornillos.

Los planos de la plataforma robótica se encuentran en el Anexo [15.4](#).

Elemento	Masa [gr]
Eslabón con servo	181
Eslabón adicional	121
Total	302

Cuadro 3: Masa de la plataforma

El Cuadro [3](#) muestra la masa de cada uno de los elementos de la plataforma y la masa total. Como se puede observar, a pesar de los esfuerzos por realizar un diseño simple con pocos elementos, la masa de la plataforma sobrepasa los 300 gramos. La mayor parte de esta masa la aporta el servo motor.

La relación de masas resultante es de 1.5:1, la cual es cercana a la relación 2:1. Sin embargo, debido a que la distribución de masa en cada uno de las partes del vehículo es distinta, no es posible asegurar que la relación de masa refleje la relación de momentos de inercia.

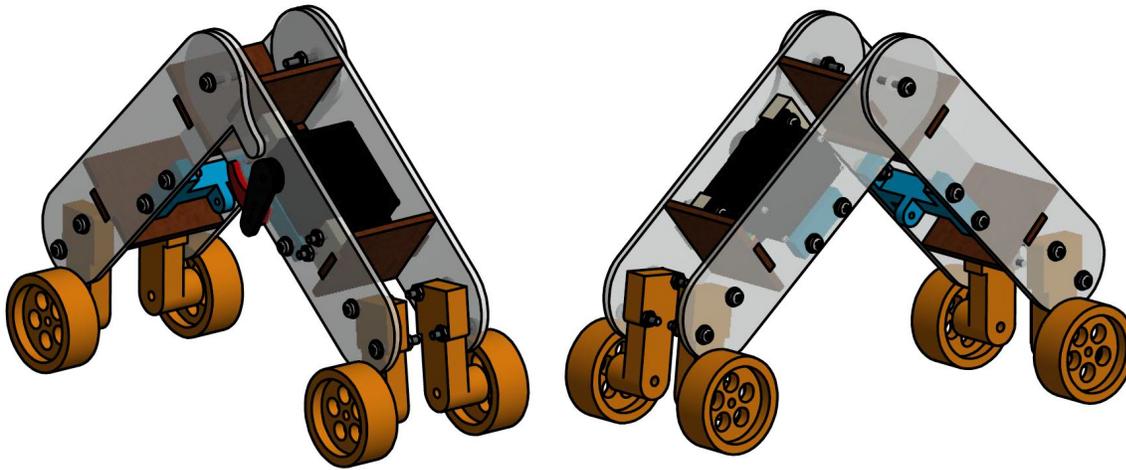


Figura 85: Plataforma robótica implementada

### 11.1.1. Mecanismo de carga y liberación

A pesar de que la automatización de la carga del mecanismo no era una de las prioridades, se optó por la implementación de un mecanismo sencillo que permitiría cargar y liberar el mecanismo de forma automática.

El mecanismo consiste en un sistema de leva-seguidor modificado, como se muestra en la Figura [86](#).

Una pequeña pieza, que cumple la función de leva, fue adherida al servo motor. El eslabón que se encuentra a su lado fue diseñado para cumplir la función de seguidor y palanca para la carga del mecanismo.

El servo motor, al girar en sentido antihorario, obliga al eslabón a rotar provocando un desplazamiento angular. Este desplazamiento angular separa los dos eslabones de la plataforma obligando al resorte a estirarse, almacenando energía potencial.

En el momento que la leva alcanza su punto máximo y el servo motor continua girando, el eslabón retorna a su posición inicial debido a la energía potencial almacenada en el resorte, accionando el mecanismo (Figura 87).

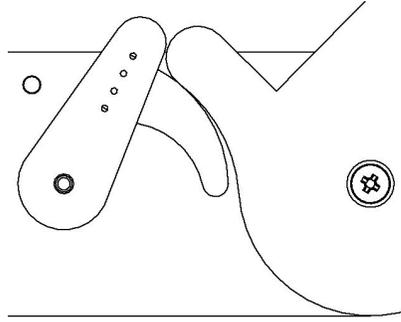


Figura 86: Mecanismo leva-seguidor modificado

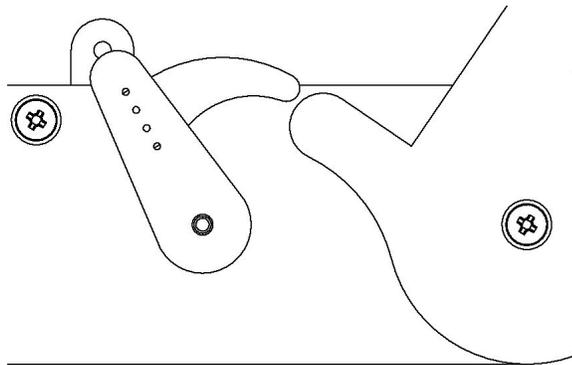


Figura 87: Mecanismo leva-seguidor liberado

### Desventajas del mecanismo

El mecanismo de carga y liberación propuesto presenta la ventaja de que su implementación fue sencilla y no requirió el diseño de elementos complejos. Sin embargo, su fácil implementación limita algunas características del mismo. Como se puede observar en la Figura 87, el desplazamiento angular máximo alcanzado por el eslabón móvil es limitado.

Al medir el ángulo máximo alcanzado por el mecanismo se obtuvo un ángulo de  $40^\circ$  respecto a la vertical. Este desplazamiento angular limita la elongación máxima del resorte y, por consiguiente, la energía potencial almacenada.

A pesar de esta desventaja, se procedió a la realización de pruebas con la plataforma.

## 11.2. Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas con la plataforma consistieron en colocar el vehículo en posición invertida (Figura 88), activar el mecanismo de carga y liberación y observar el comportamiento del vehículo.

### 11.2.1. Primeras pruebas

Las primeras pruebas de la plataforma se realizaron con los resortes utilizados en el Capítulo 8, cuyas constantes elásticas se muestran en el Cuadro 1.

Utilizando estos resortes, el mecanismo de carga y liberación funcionó de forma correcta.

Sin embargo, estas pruebas no mostraron el comportamiento de autovolteo que se esperaba. La Figura 89 muestra fotogramas de una de las pruebas realizadas. Como se puede observar, la plataforma, al liberarse el mecanismo de carga, se eleva una pequeña distancia en el aire para luego caer con la misma orientación.

A pesar de que estas pruebas muestran indicios de que el vehículo busca ejecutar una rotación para caer sobre sus ruedas, la magnitud de la fuerza de despegue no es lo suficientemente grande para elevar la plataforma a una altura adecuada.

Debido a que no era posible realizar modificaciones en la plataforma para reducir su peso, se optó por aumentar la constante elástica del resorte utilizado en el vehículo.

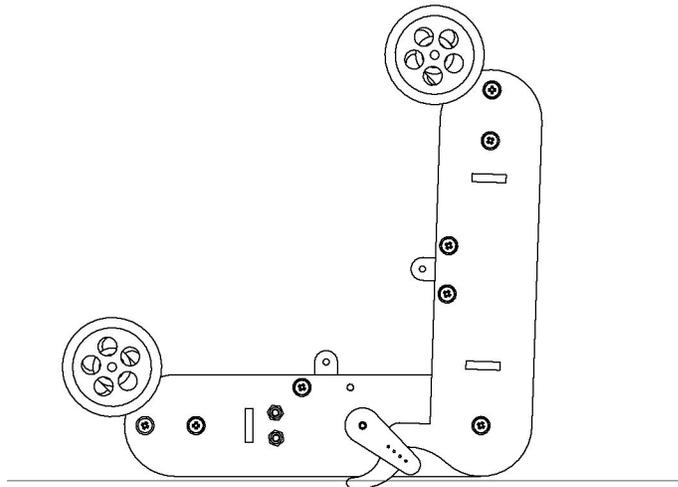


Figura 88: Plataforma en posición de prueba

### 11.2.2. Pruebas exitosas

Se continuó realizando pruebas con la plataforma aumentando gradualmente la constante elástica del resorte utilizado.

Conforme se incrementaba la constante elástica, el salto ejecutado por la plataforma presentaba una altitud cada vez mayor.

Finalmente, luego de incrementar la constante elástica del resorte repetidas veces, el vehículo logró ejecutar el movimiento de autovolteo. Fotogramas de una de estas pruebas se muestra en la Figura 90. Como se observa, la plataforma ejecuta su salto alcanzando una altitud apropiada para poder girar sobre sí misma y caer sobre sus llantas.

Estas pruebas demuestran que el mecanismo, implementado en un vehículo o plataforma robótica, permite el autovolteo de la misma.

### 11.2.3. Observaciones de las pruebas

A pesar de que la implementación de un resorte con la constante elástica adecuada permitió el autovolteo de la plataforma, es necesario realizar algunas observaciones acerca de las pruebas realizadas:

- Debido a la elevada constante elástica del resorte utilizado, no fue posible determinar la magnitud de dicha constante.
- El resorte que permitió que el vehículo ejecutará el movimiento de *autovolteo* tiene una constante elástica tan elevada que el mecanismo de carga y liberación fue incapaz de realizar la carga del mecanismo. Para las pruebas finales, la plataforma se cargó de forma manual y el mecanismo de leva-seguidor únicamente ejecutó la acción de liberación.
- El peso de la plataforma es un factor importante en la implementación del mecanismo.

Tomando en cuenta estas observaciones, es posible concluir que el mecanismo desarrollado es viable para su implementación en plataformas robóticas o vehículos terrestres. Sin embargo, la escala de estas plataformas será un factor importante a considerar.

La plataforma fue diseñada para ser un vehículo sencillo y *liviano* con el fin de facilitar el autovolteo y, a pesar de esa consideración, fue necesario la implementación de un resorte muy grande para lograrlo. Al momento de implementar este mecanismo en una plataforma real, la cual incluye muchos más elementos de los que se integraron en ésta plataforma, se requerirá de un resorte con una constante elástica aún mayor. Además, si se desea automatizar la carga y liberación del mecanismo será necesario la utilización de un actuador de mayor potencia, elemento que elevaría el peso de la plataforma.

Por esta razón, y por lo observado con las pruebas realizadas, es recomendable que el mecanismo desarrollado sea implementado en plataformas terrestres a pequeña escala o vehículos livianos.

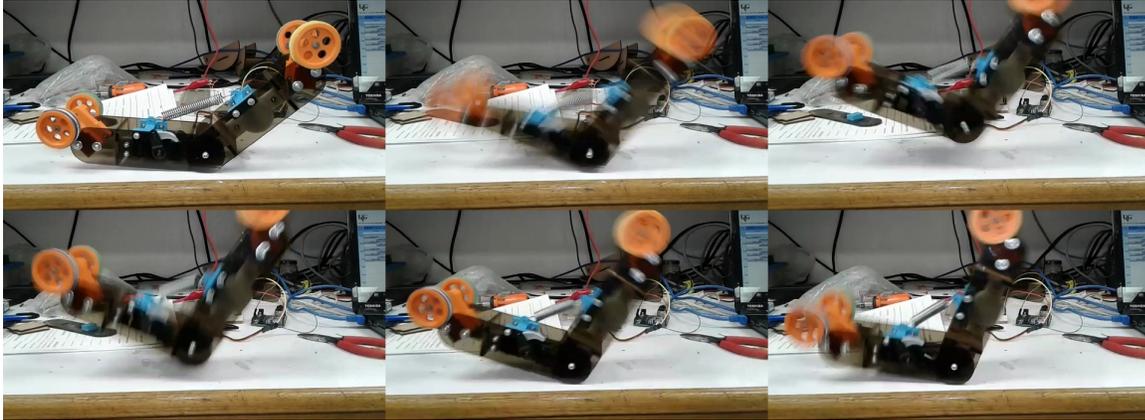


Figura 89: Prueba fallida de plataforma

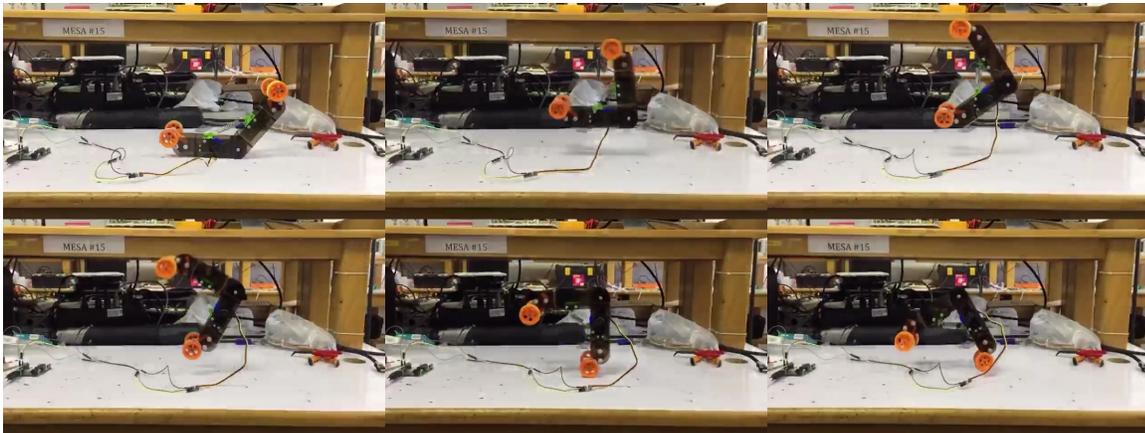


Figura 90: Prueba exitosa de plataforma

1. El mecanismo de eslabones rígidos propuesto reproduce la mecánica de autovolteo de los Escarabajos Clic al implementar los conceptos fundamentales detrás del salto. Su comportamiento fue caracterizado cualitativamente por medio de pruebas y conceptos de dinámica.
2. Se diseñó y construyó una plataforma de pruebas que permitió la evaluación del mecanismo en un ambiente controlado y bajo las condiciones ideales. Estas condiciones se lograron al limitar el movimiento del mecanismo a un sólo plano y liberación automática del mecanismo controlada por el usuario.
3. El mecanismo propuesto ejecuta un salto similar al Escarabajo Clic. Sin embargo, este no es replicado con total fidelidad debido a diferencias entre la morfología del escarabajo y el diseño del mecanismo. A pesar de esto, la bio-inspiración continua siendo válida y suficientemente buena para la aplicación.
4. Se diseñó y construyó una plataforma robótica de pruebas que implementa el mecanismo propuesto, la cual es capaz de ejecutar su autovolteo de manera exitosa.



1. La plataforma de pruebas automática desarrollada en el Capítulo [9](#) mejoró la sincronización de la liberación de los eslabones del mecanismo. Sin embargo, al momento de la realización de pruebas, aún se presentaron casos donde uno de los eslabones era liberado antes que el otro, lo cual anulaba la validez de la misma. Se recomienda colocar límites mecánicos que impidan el movimiento del mecanismo dentro de la plataforma antes de la liberación del mismo. Esto permitirá aumentar la validez de las pruebas. También se alienta a buscar nuevas formas de liberación del mecanismo.
2. El análisis cualitativo dinámico que se llevó a cabo en el Capítulo [10](#) permite comprender cómo las inercias de los eslabones y el punto de contacto del mecanismo con el suelo pueden afectar el movimiento del mismo. Se recomienda realizar pruebas con distintas relaciones de masa y comprobar cómo éstas afectan el comportamiento del mecanismo. También se recomienda hacer un nuevo diseño del mecanismo que permita modificar el punto de contacto con el suelo y observar su comportamiento bajo distintas condiciones.
3. La plataforma robótica propuesta puede ser el primer prototipo de muchas iteraciones. Una iteración en el diseño podría solucionar el problema de la necesidad de un resorte con una constante elástica muy grande. Una prueba interesante sería replicar la plataforma propuesta a una escala menor y evaluar su desempeño.
4. Se recomienda desarrollar un mecanismo de carga/liberación para la plataforma robótica completamente automático.



- 
- [1] O. Bolmin, C. Duan, L. Urrutia, A. M. Abdulla, A. M. Hazel, M. Alleyne, A. C. Dunn y A. Wissa, “Pop! observing and modeling the legless self-righting jumping mechanism of click beetles”, en *Biomimetic and Biohybrid Systems*, M. Mangan, M. Cutkosky, A. Mura, P. F. Verschure, T. Prescott y N. Lepora, eds., vol. 10384, Cham: Springer International Publishing, 2017, págs. 35-47, ISBN: 978-3-319-63536-1 978-3-319-63537-8. DOI: [10.1007/978-3-319-63537-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63537-8_4), dirección: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-63537-8\\_4](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-63537-8_4) (visitado 26-04-2018).
- [2] (). SandFlea | Boston Dynamics, dirección: <https://www.bostondynamics.com/sandflea#&gid=1&pid=1> (visitado 05-10-2018).
- [3] L. Yoksoulian. (). Click beetles inspire design of self-righting robots, dirección: <https://news.illinois.edu/view/6367/559303> (visitado 23-04-2018).
- [4] M. E. G. Evans, “The jump of the click beetle (coleoptera, elateridae)—a preliminary study”, *Journal of Zoology*, vol. 167, n.º 3, págs. 319-336, 1 de jul. de 1972, ISSN: 1469-7998. DOI: [10.1111/j.1469-7998.1972.tb03115.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1972.tb03115.x), dirección: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-7998.1972.tb03115.x> (visitado 14-05-2019).
- [5] D. Baužys, *Selatosomus aeneus*. Photo: *Darius Baužys; Found in Vilnius, Lithuania*, 3 de mayo de 2008. dirección: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P1080410\\_Selatosomus\\_aeneus.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P1080410_Selatosomus_aeneus.jpg) (visitado 26-04-2018).
- [6] G. Ribak y D. Weihs, “Jumping without using legs: The jump of the click-beetles (elateridae) is morphologically constrained”, *PLOS ONE*, vol. 6, n.º 6, e20871, 16 de jun. de 2011, ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0020871](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020871), dirección: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0020871> (visitado 14-05-2019).
- [7] R. L. Norton y J. E. M. Murrieta, *Diseño de maquinaria*. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., 2012, 624 págs., Google-Books-ID: pqK7ngEACAAJ, ISBN: 978-607-15-0935-2.
- [8] J. F. Ferrer y M. P. Carrera, *Iniciación a la física*. Reverte, 1981, 468 págs., Google-Books-ID: YITSNSPUvxwC, ISBN: 978-84-291-4198-6.

- [9] H. D. Young, R. A. Freedman y F. W. Sears, *Física universitaria 01*. Addison-Wesley ; Pearson Educación, 760 págs., Google-Books-ID: msJzQwAACAAJ, ISBN: 978-607-442-288-7.
- [10] F. P. Beer y E. R. Johnston, *Mecánica vectorial para ingenieros : dinámica*. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., 2010, 762 págs., Google-Books-ID: ugqBZwEA-CAAJ, ISBN: 978-607-15-0261-2.
- [11] C. M. Staff. (). Four different types of springs, dirección: <https://www.creativemechanisms.com/blog/four-different-types-of-springs> (visitado 27-09-2018).
- [12] Belbuero. (). RESORTE DE TRACCION PARA ESCAPE CORTO (52 mm) en Argenbras, dirección: <http://argenbras.com/AB-238-RESORTE-DE-TRACCION-PARA-ESCAPE-CORTO-52-mm-> (visitado 27-09-2018).
- [13] (). Muelle de Compresión RS Pro, Aleación de Acero, 56mm x 11mm, 0.81N/mm | RS Components, dirección: <https://es.rs-online.com/web/p/muelles-de-compresion/0751613/> (visitado 27-09-2018).
- [14] (). Stainless steel torsion spring, indiamart.com, dirección: <https://www.indiamart.com/proddetail/stainless-steel-torsion-spring-19088561362.html> (visitado 27-09-2018).
- [15] D. C. Giancoli, *Física Volumen 2*. Pearson Educación, 2006, 428 págs., Google-Books-ID: xFQHVBP0Dm0C, ISBN: 978-970-26-0777-9.
- [16] (). Universal Central Locking Actuator, 2 Wires: Amazon.co.uk: Car & Motorbike, dirección: <https://www.amazon.co.uk/Universal-Central-Locking-Actuator-2-Wires/dp/B003JBH4WE> (visitado 16-09-2018).
- [17] (). Switch de palanca 2 polos, 2 tiros, 2 posiciones, 15 Amperes - 82610 - Steren Guatemala, dirección: <http://www.steren.com.gt/catalogo/prod.php?f=0&sf=89&c=1573&p=806&desc=switch-de-palanca-2-polos-2-tiros-2-posiciones-15-amperes> (visitado 16-09-2018).
- [18] (). Mass and Hanger Replacements: PASCO, dirección: <https://www.pasco.com/prodGroups/mass-and-hanger-replacements/index.cfm> (visitado 17-09-2018).

## **15.1. Planos de construcción de mecanismo**

Planos de construcción del mecanismo y su iteración.

## **15.2. Planos de construcción de mecanismo con masas variables**

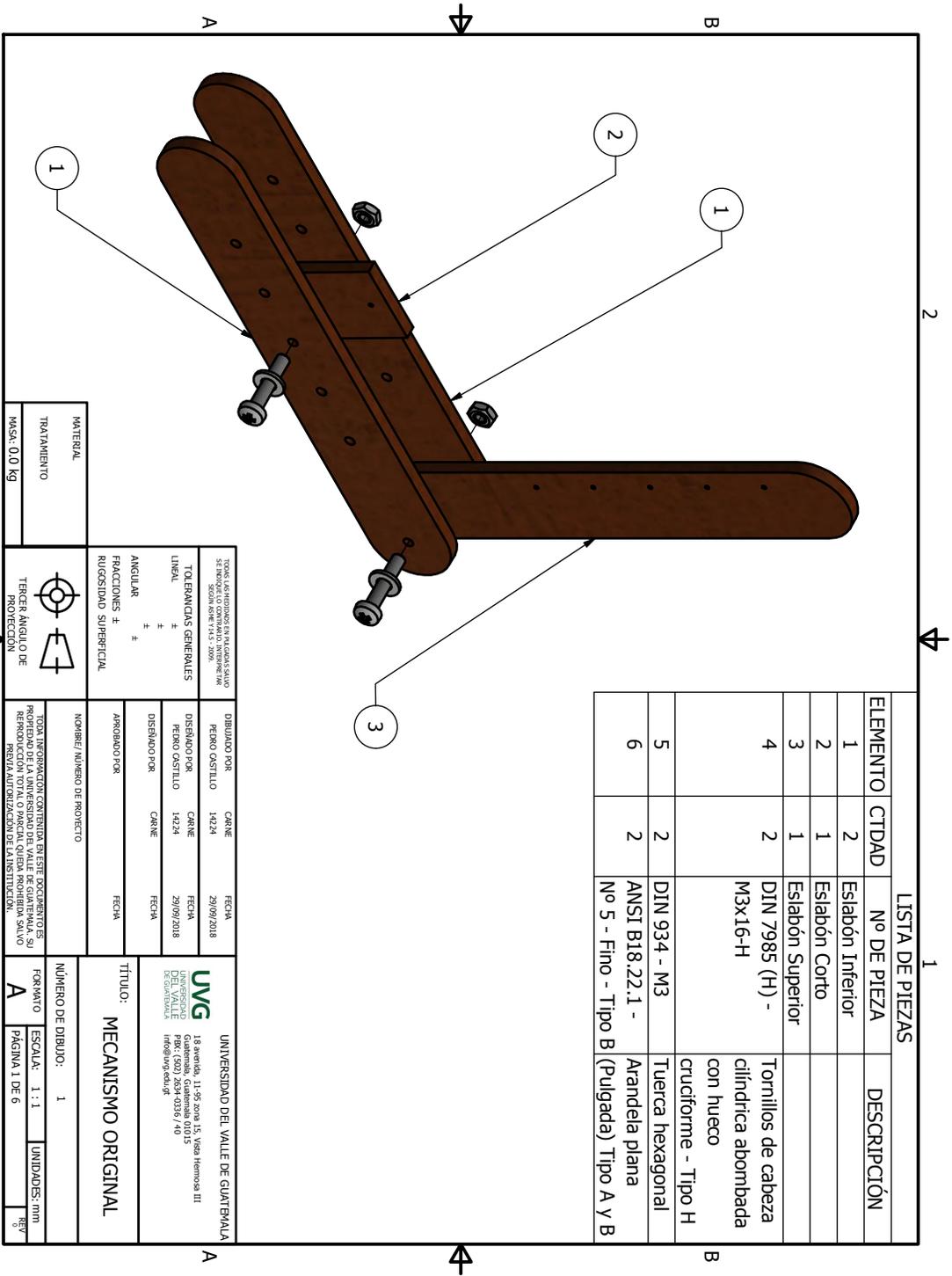
Planos del mecanismo con eslabones de masa variable.

## **15.3. Planos de construcción de plataforma de pruebas**

Planos de plataforma utilizada para la realización de pruebas controladas del mecanismo.

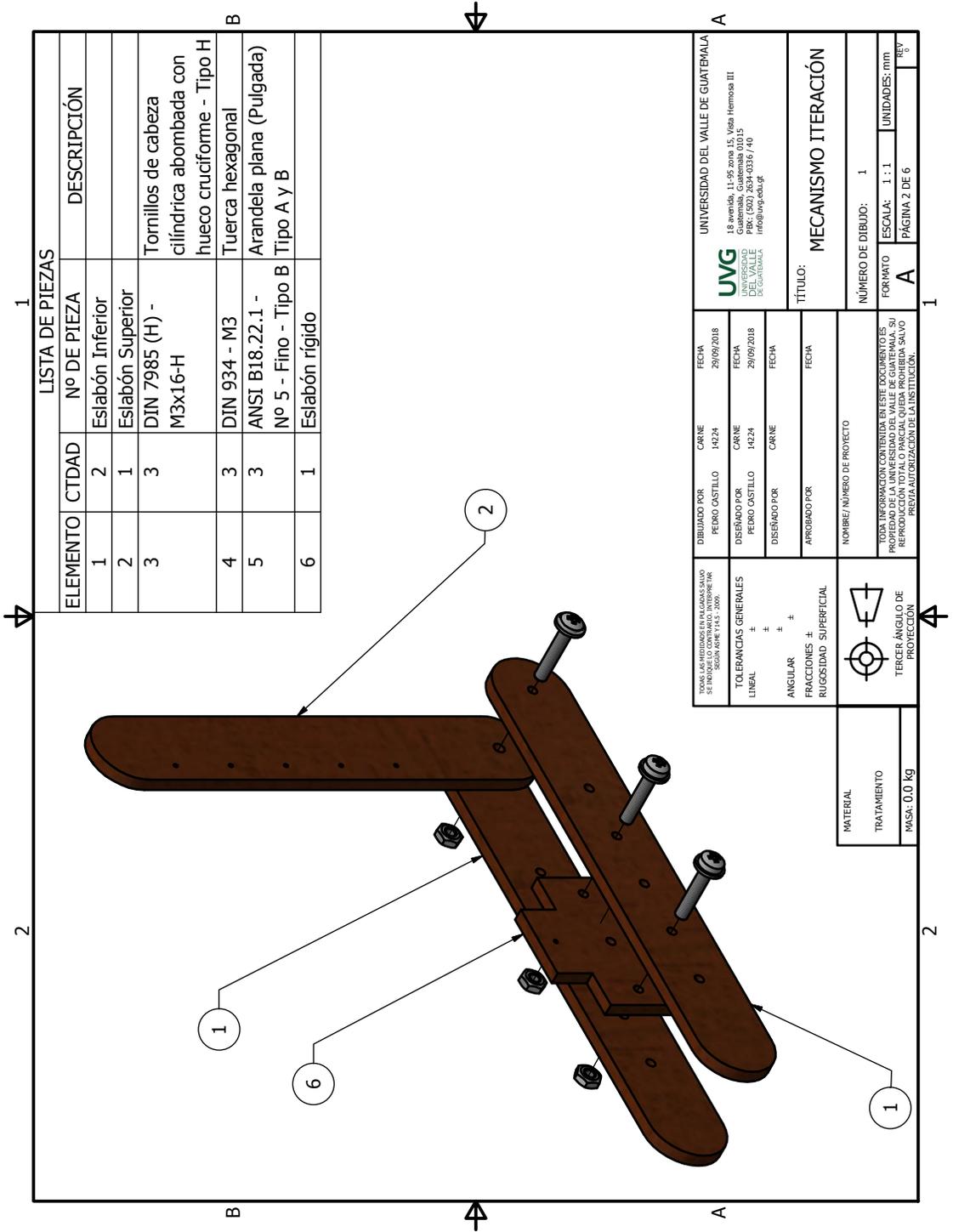
## **15.4. Planos de construcción de plataforma robótica**

Planos de vehículo robótico desarrollado para la implementación del mecanismo.



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	2	Eslabón Inferior
2	1	1	Eslabón Corto
3	1	1	Eslabón Superior
4	2	DIN 7985 (H) - M3x16-H	Tornillos de cabeza cilíndrica abombada con hueco cruciforme - Tipo H
5	2	DIN 934 - M3	Tuerca hexagonal
6	2	ANSI B18.22.1 - Nº 5 - Fino - Tipo B	Arandela plana (Pulgada) Tipo A y B

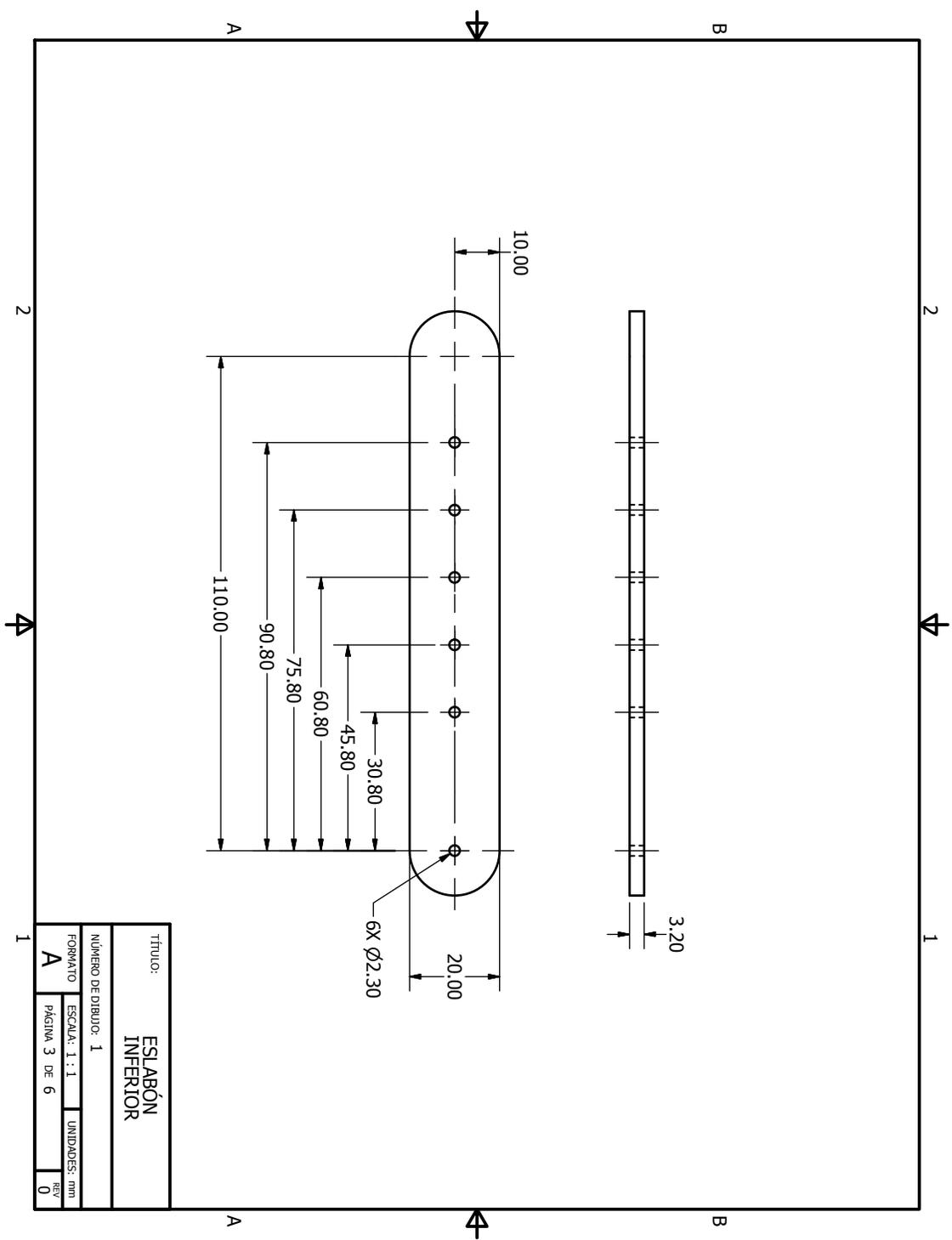
<p>TODAS LAS MEDIDAS EN EL DISEÑO SE LEVANTAN DEL DISEÑO ORIGINAL. SI SE REPRODUCEN EN OTRO ENTORNO, SE DEBE INDICAR LA FUENTE DE DONDE SE OBTUVO EL DISEÑO ORIGINAL.</p>		<p>DIBUJADO POR: CARNE FECHO: 29/09/2018</p>	
<p>TOLENCIAS GENERALES LINEAL ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL</p>		<p>FECHA: 29/09/2018</p>	
<p>TERCER ANGLIO DE PROYECCION</p>		<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE QUATIMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III GUATEMALA, Guatemala 01015 TEL: (502) 8534-0335 / 410 WWW.UVQ.ED.QU</p>	
<p>MATERIAL TRATAMIENTO MASA: 0,0 Kg</p>		<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE QUATIMALA TÍTULO: MECANISMO ORIGINAL</p>	
<p>NOMBRE/NÚMERO DE PROYECTO</p>		<p>NÚMERO DE DIBUJO: 1</p>	
<p>TODAS LAS MEDIDAS EN EL DISEÑO SE LEVANTAN DEL DISEÑO ORIGINAL. SI SE REPRODUCEN EN OTRO ENTORNO, SE DEBE INDICAR LA FUENTE DE DONDE SE OBTUVO EL DISEÑO ORIGINAL.</p>		<p>FORMATO: A ESCALA: 1 : 1 PÁGINA: 1 DE 6</p>	
<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE QUATIMALA</p>		<p>UNIDADES: mm</p>	
<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE QUATIMALA</p>		<p>REV</p>	



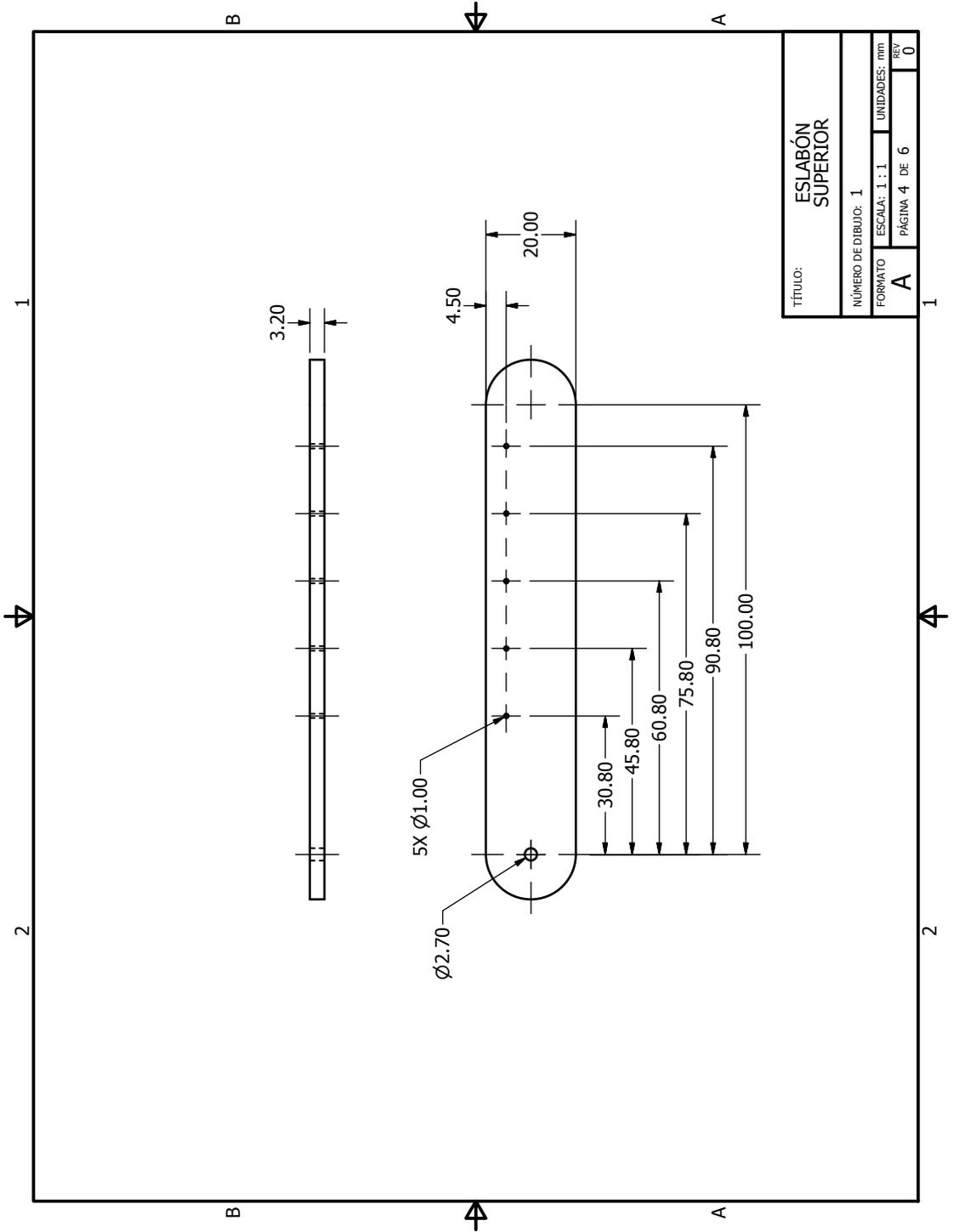
**LISTA DE PIEZAS**

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Eslabón Inferior	
2	1	Eslabón Superior	
3	3	DIN 7985 (H) - M3x16-H	Tornillos de cabeza cilíndrica abombada con hueco cruciforme - Tipo H
4	3	DIN 934 - M3	Tuerca hexagonal
5	3	ANSI B18.22.1 - Nº 5 - Fino - Tipo B	Arandela plana (Pulgada) Tipo A y B
6	1	Eslabón rígido	

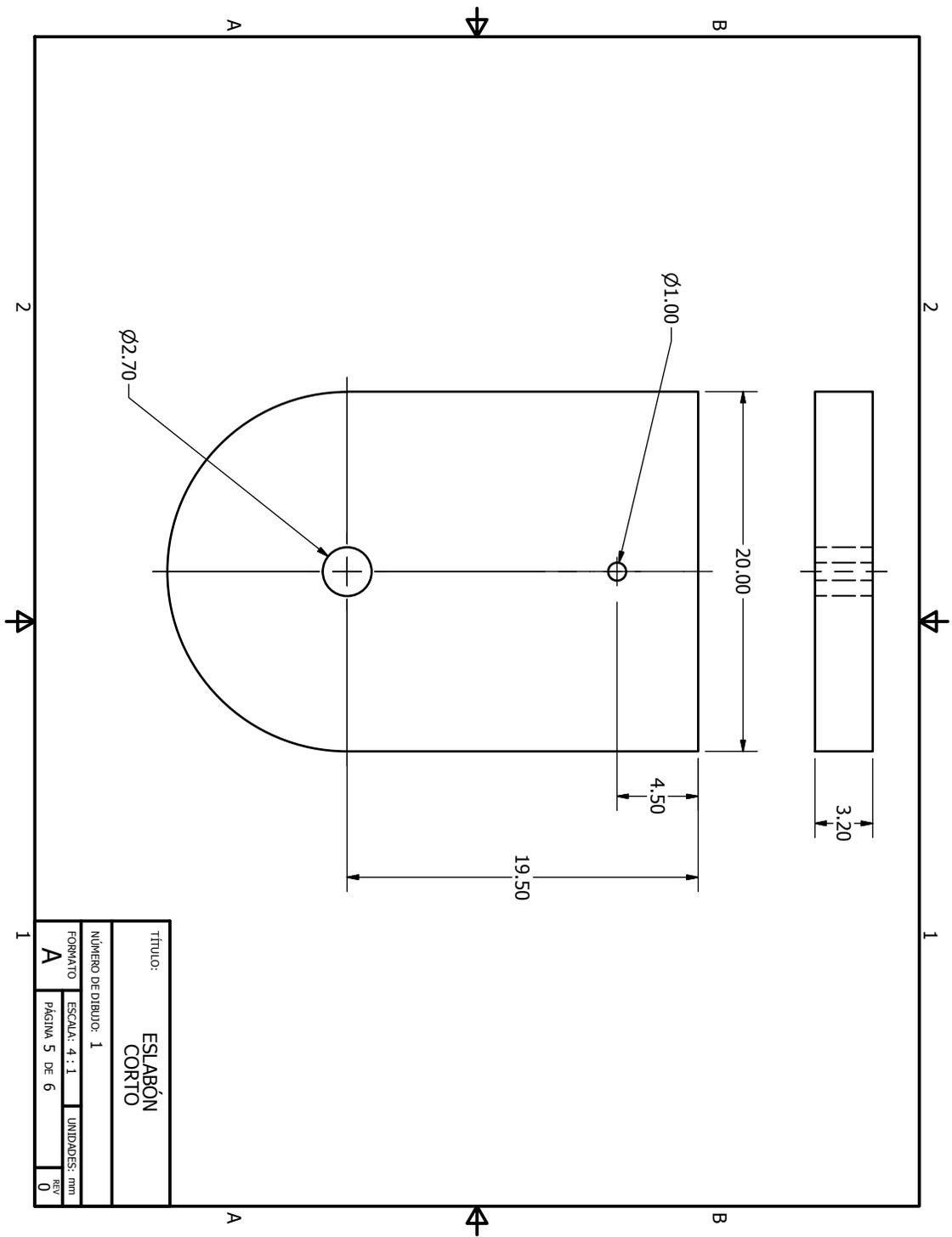
DIBUJADO POR PEDRO CASTILLO 1424 FECHA 29/09/2018		UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA <b>UVG</b> UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 P.B.C. (502) 2694 0336 / 40 info@uvg.edu.gt	
DISEÑADO POR PEDRO CASTILLO 1424 FECHA 29/09/2018		TÍTULO: <b>MECANISMO ITERACIÓN</b>	
DISEÑADO POR CARNE FECHA		NÚMERO DE DIBUJO: 1	
APROBADO POR FECHA		FORMATO A	
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO		ESCALA: 1 : 1	
TOLERANCIAS GENERALES LINEAL ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ±		UNIDADES: mm	
TERCER ANGLULO DE PROTECCIÓN		PÁGINA 2 DE 6	
MATERIAL TRATAMIENTO MASA: 0.0 kg		REV	



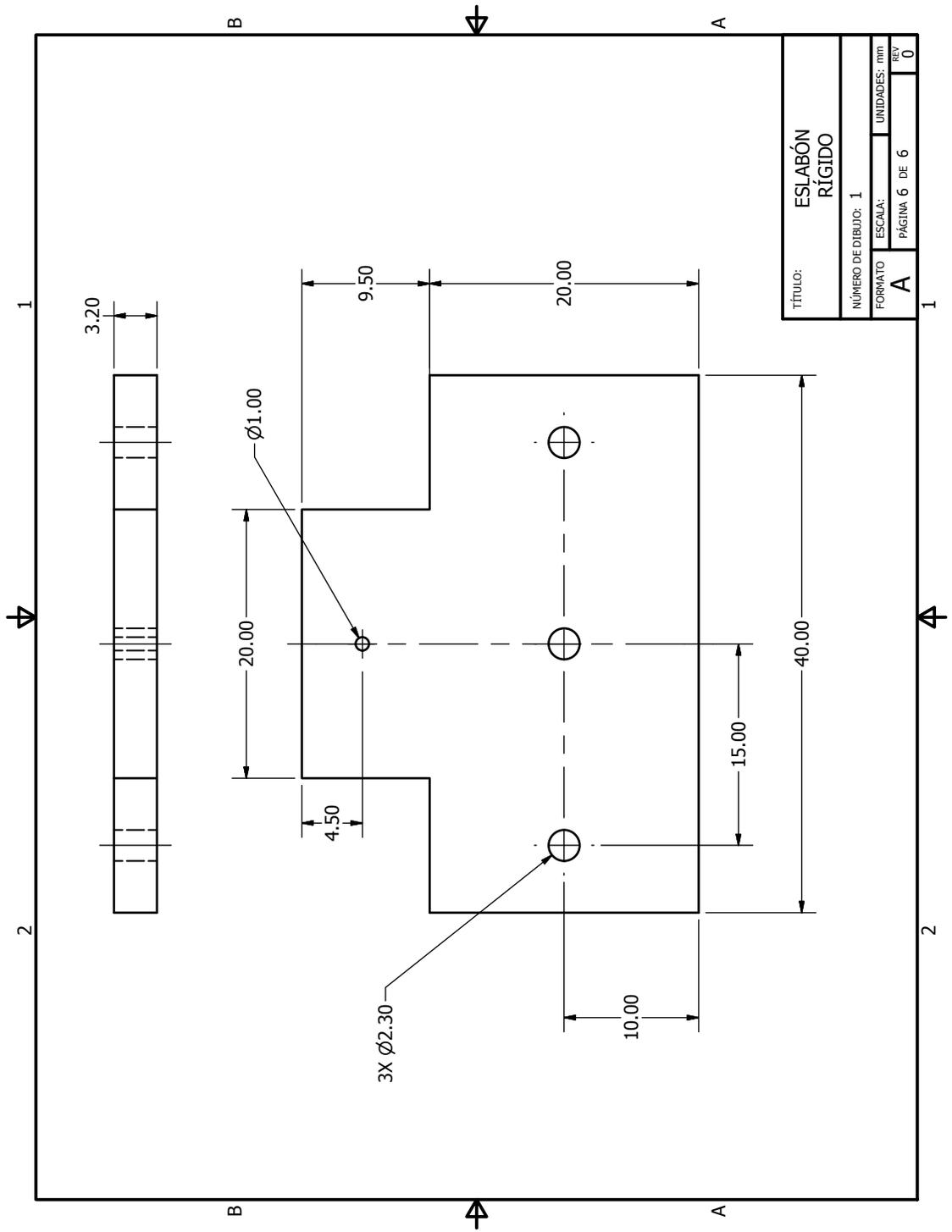
Título:		ESLABÓN INFERIOR	
Número de dibujo:		1	
Formato	Escala: 1 : 1	Unidades:	mm
A	Página 3 de 6	Rev	0

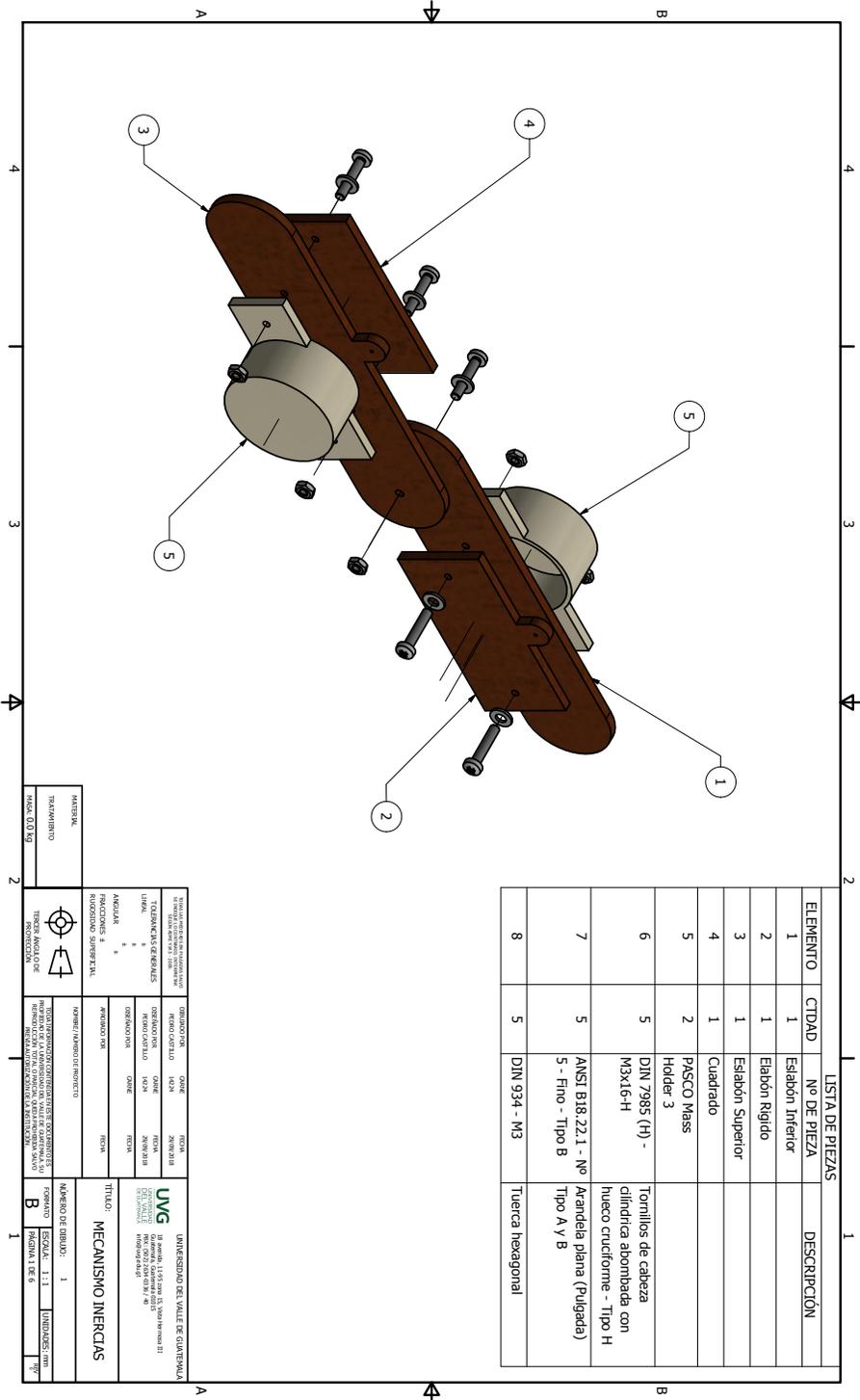


TÍTULO:		ESLABÓN SUPERIOR	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A	1 : 1	PÁGINA 4 DE 6	0



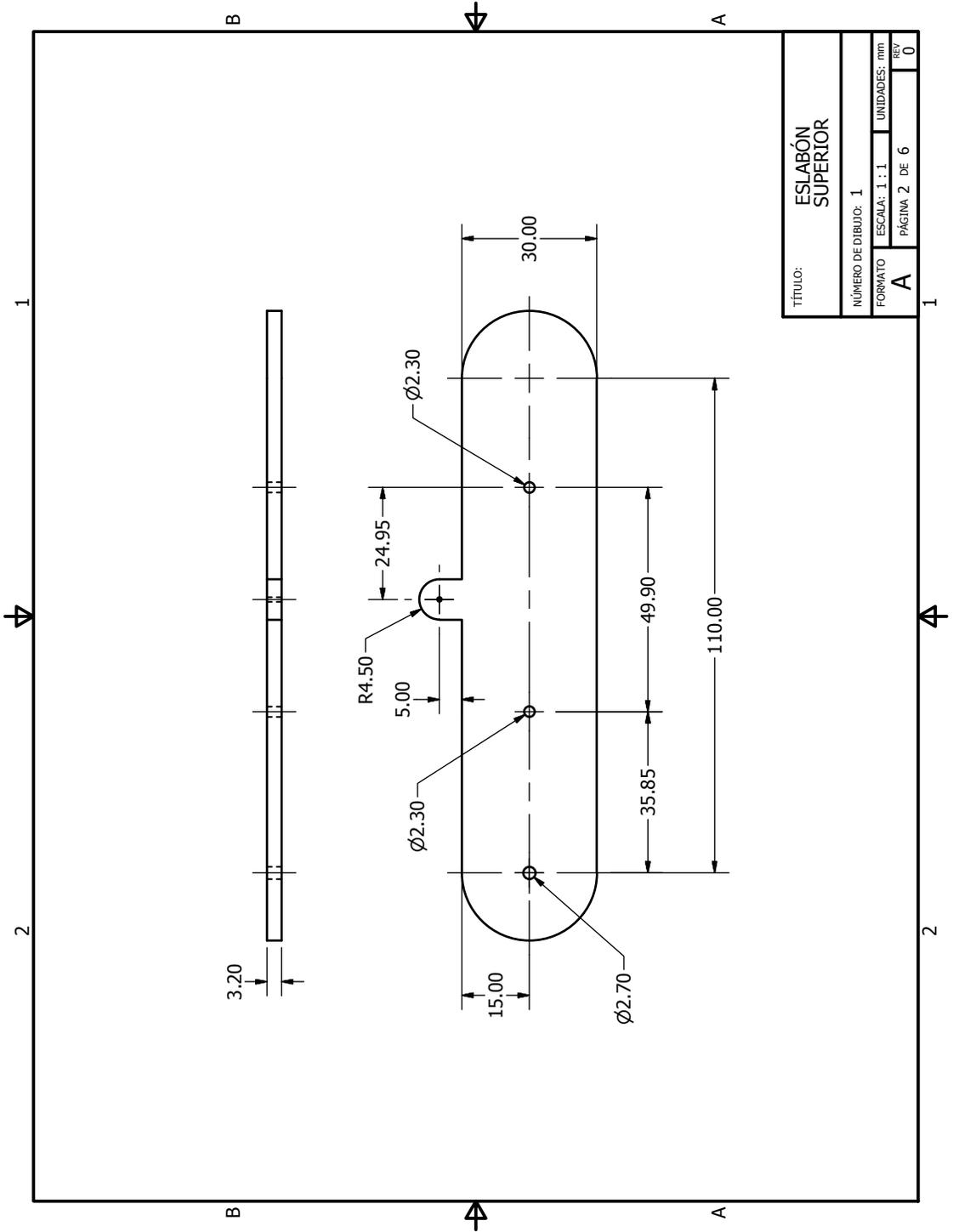
TÍTULO:		ESLABÓN CORTO	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	4 : 1	UNIDADES:
A	PÁGINA	5 DE 6	REV
			0



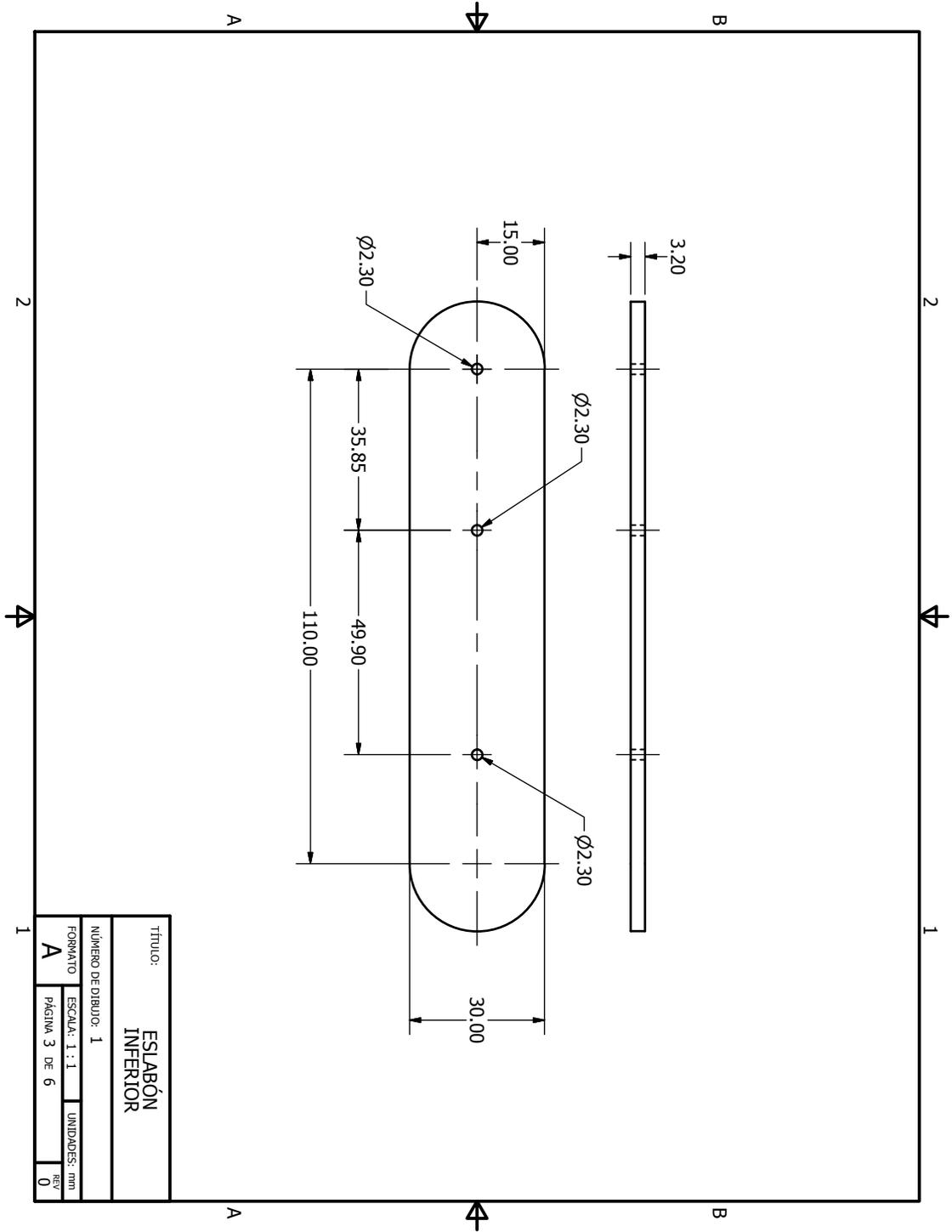


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Esabón Inferior	
2	1	Esabón Rígido	
3	1	Esabón Superior	
4	1	Cuadrado	
5	2	PASCO Mass Holder 3	
6	5	DIN 7985 (H) - M3x16-H	Tornillos de cabeza cilíndrica abombada con hueco cruciforme - Tipo H
7	5	ANSI B18.22.1 - Nº 5 - Fino - Tipo B	Arandela plana (Pulgada) Tipo A y B
8	5	DIN 934 - M3	Tuerca hexagonal

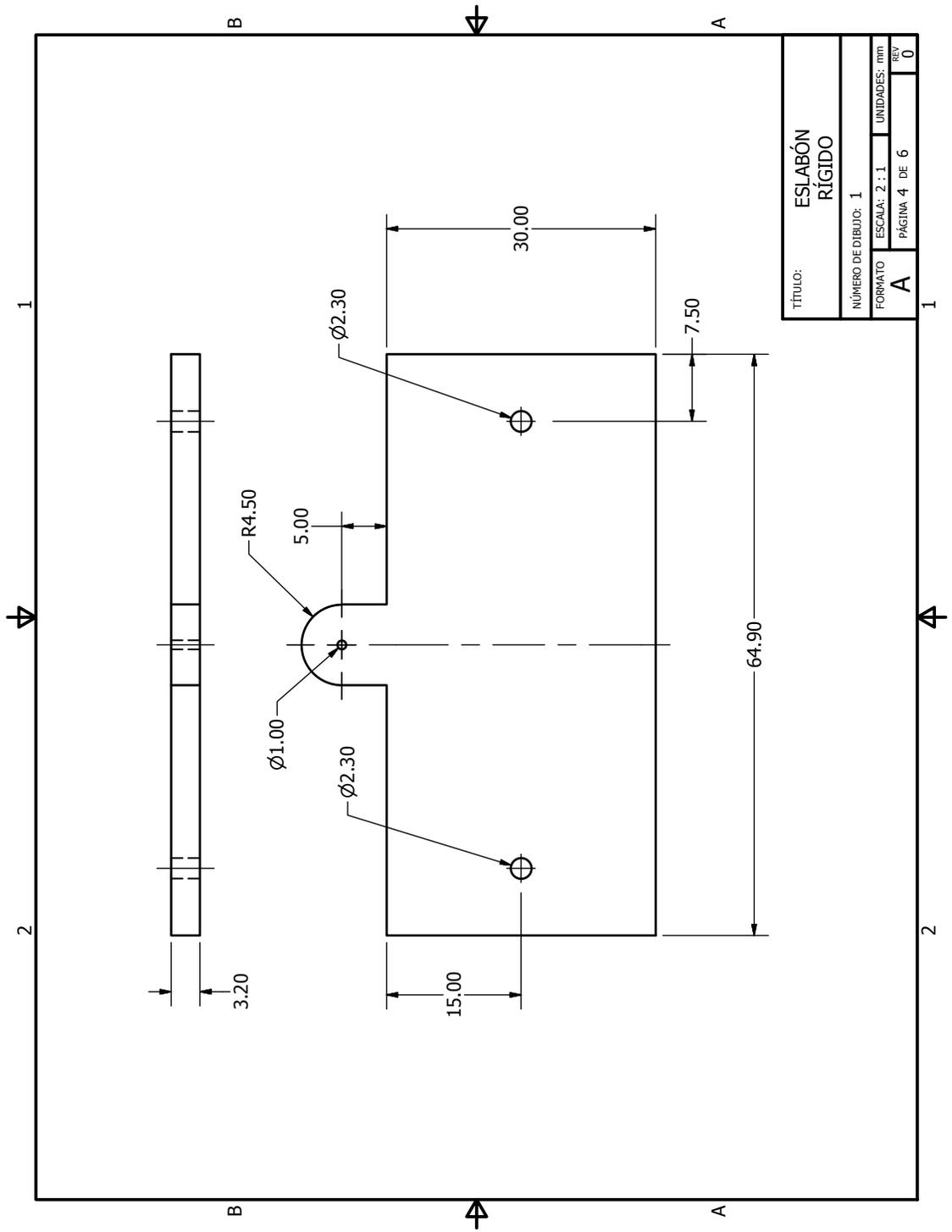
<b>MATERIA</b> TRATAMIENTO ANCL. Q10 Y9		<b>TIPO DE PIEZA</b> TIPO DE PIEZA		<b>PROYECTO</b> PROYECTO		<b>FECHA</b> FECHA	
<b>PROYECTO</b> PROYECTO		<b>FECHA</b> FECHA		<b>PROYECTO</b> PROYECTO		<b>FECHA</b> FECHA	
<b>PROYECTO</b> PROYECTO		<b>FECHA</b> FECHA		<b>PROYECTO</b> PROYECTO		<b>FECHA</b> FECHA	



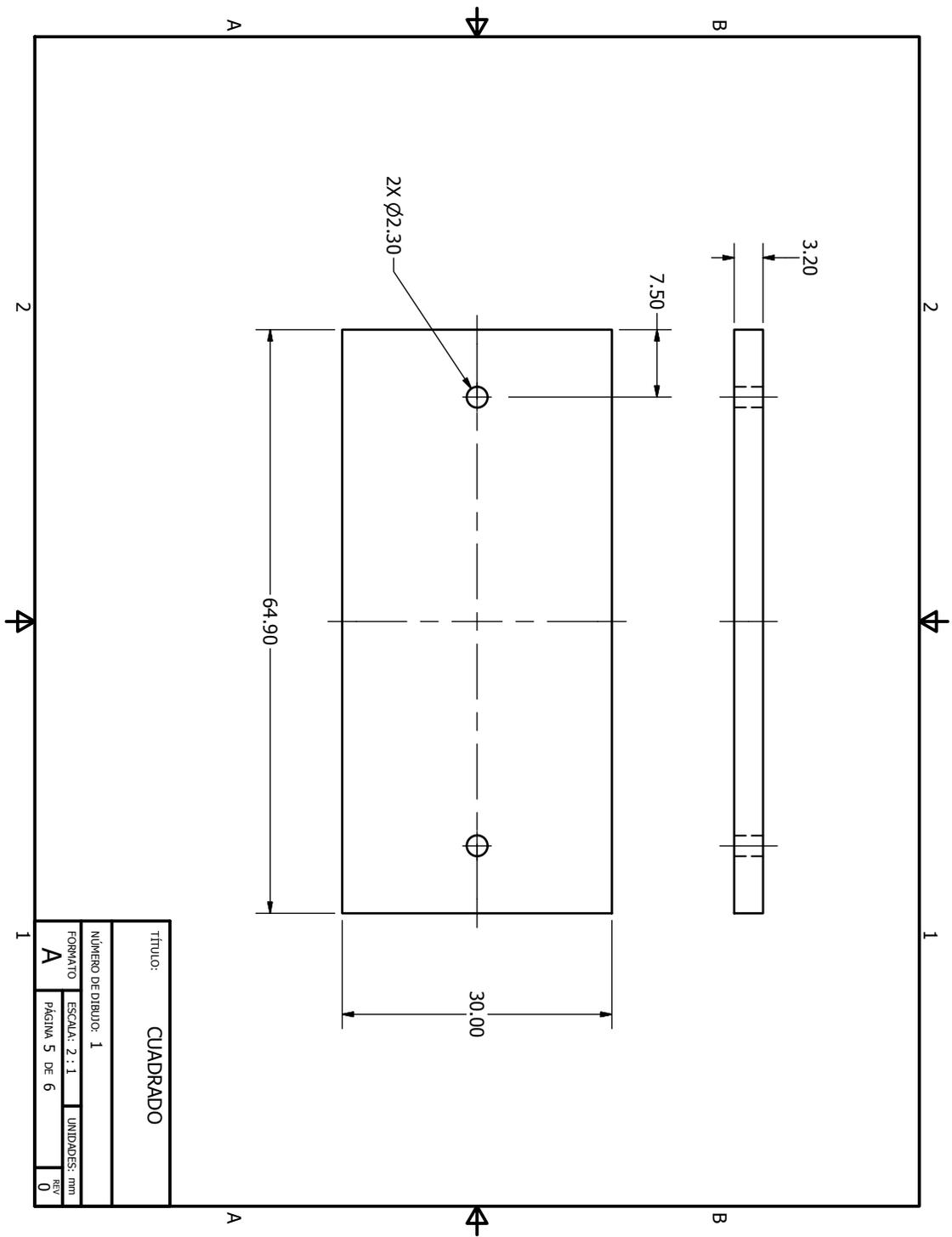
TÍTULO:		ESLABÓN SUPERIOR	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A	1 : 1	PÁGINA 2 DE 6	0



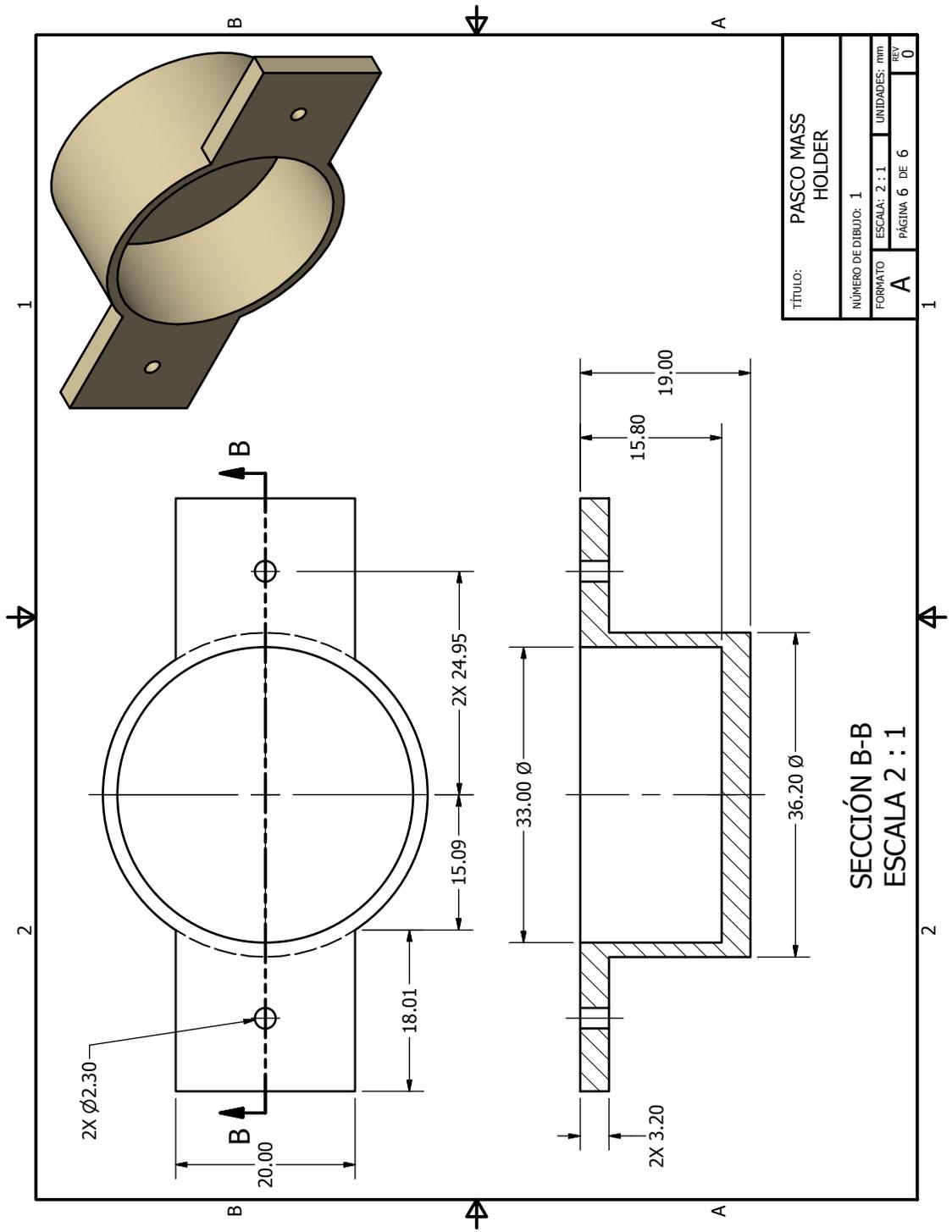
TÍTULO:		ESLABÓN INFERIOR	
NÚMERO DE DIBUJO: 1		UNIDADES: mm	
FORMATO	ESCALA: 1 : 1	REV	0
A	PÁGINA 3 DE 6		



TÍTULO:		ESLABÓN RÍGIDO	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A	2 : 1	PÁGINA 4 DE 6	0



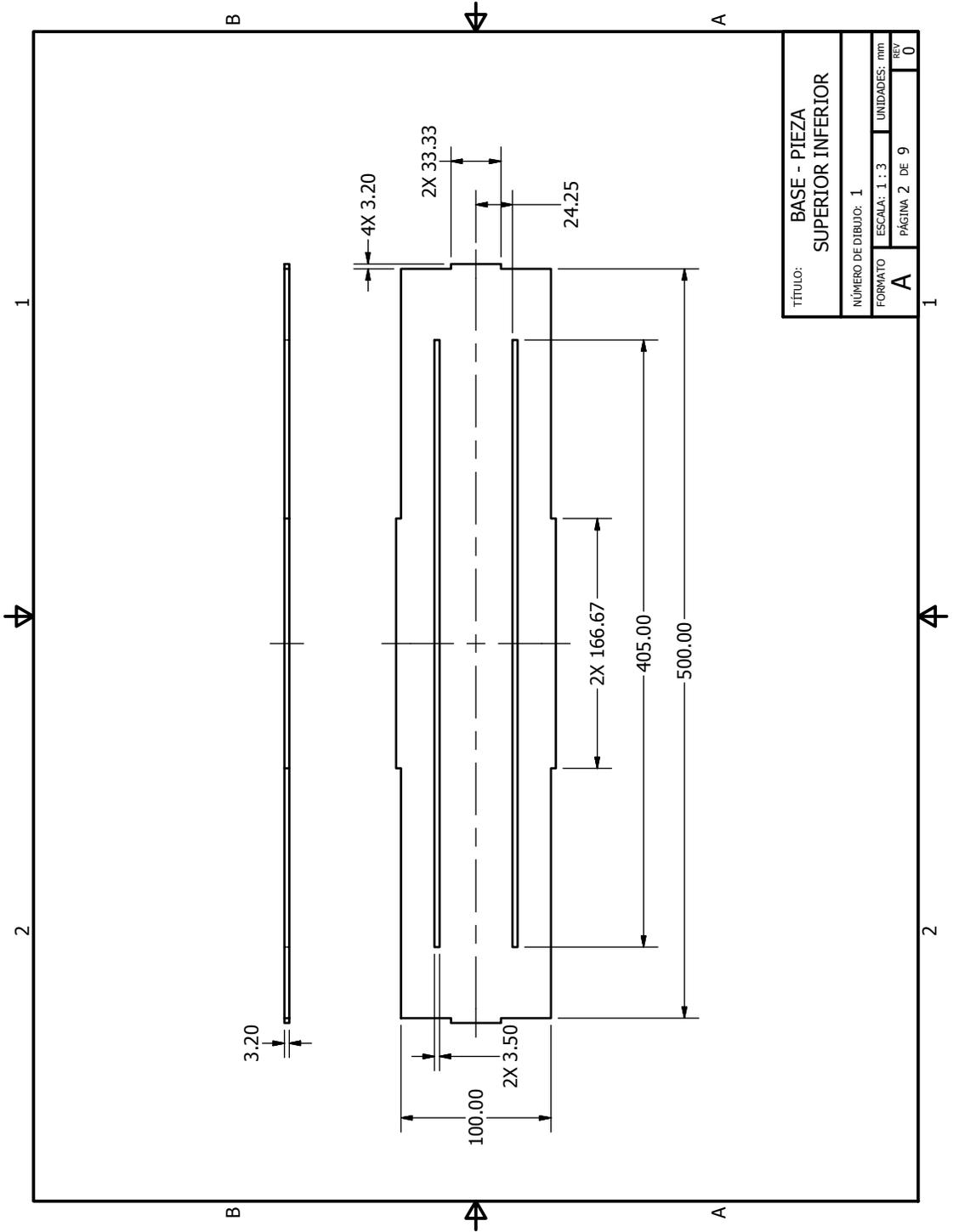
TÍTULO:		CUADRADO	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	2 : 1	UNIDADES:
A	PÁGINA	5 DE 6	REV
			0



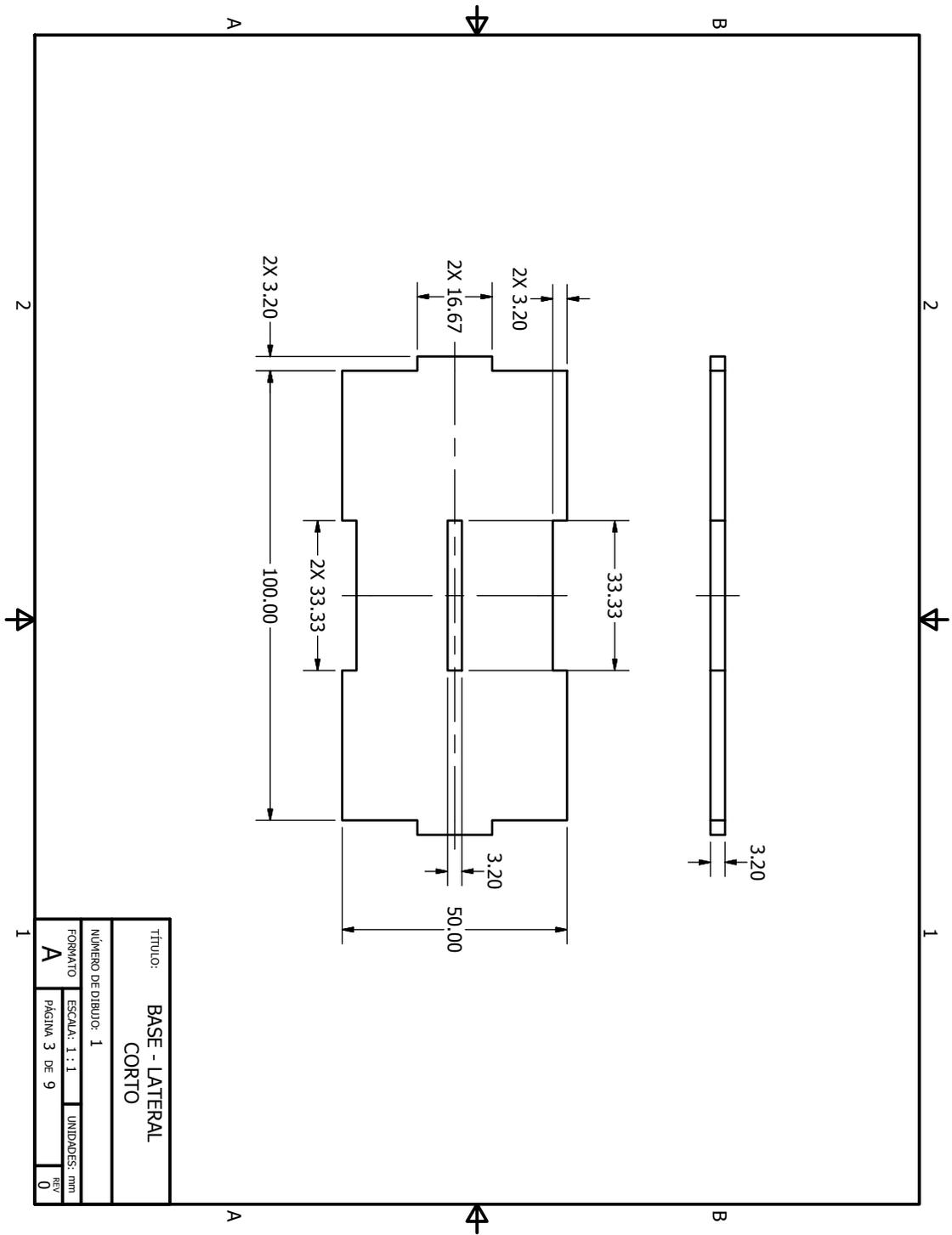
TÍTULO: PASCO MASS HOLDER	
NÚMERO DE DIBUJO: 1	
FORMATO: A	UNIDADES: mm
ESCALA: 2 : 1	PÁGINA 6 DE 6
REV: 0	

SECCIÓN B-B  
ESCALA 2 : 1

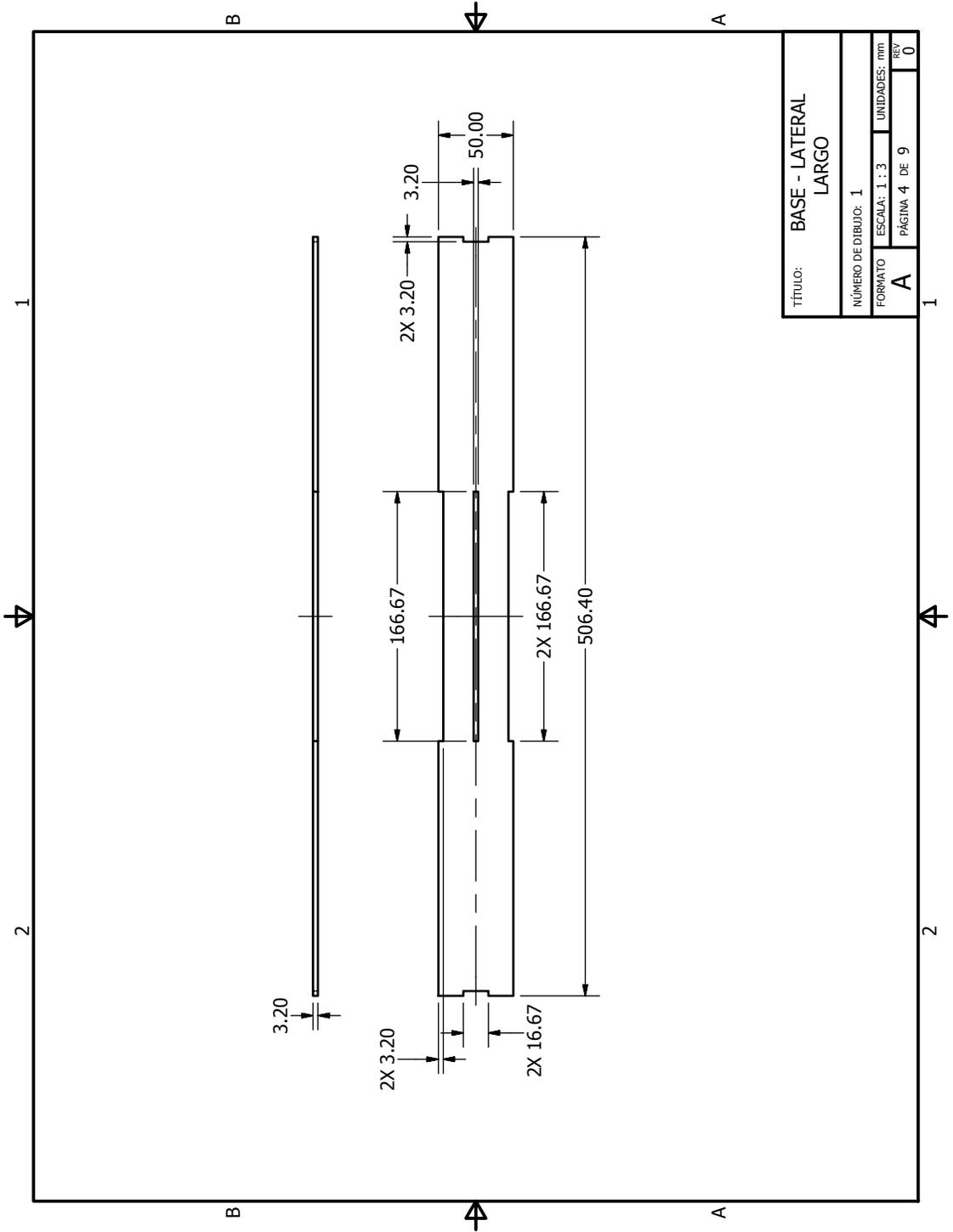




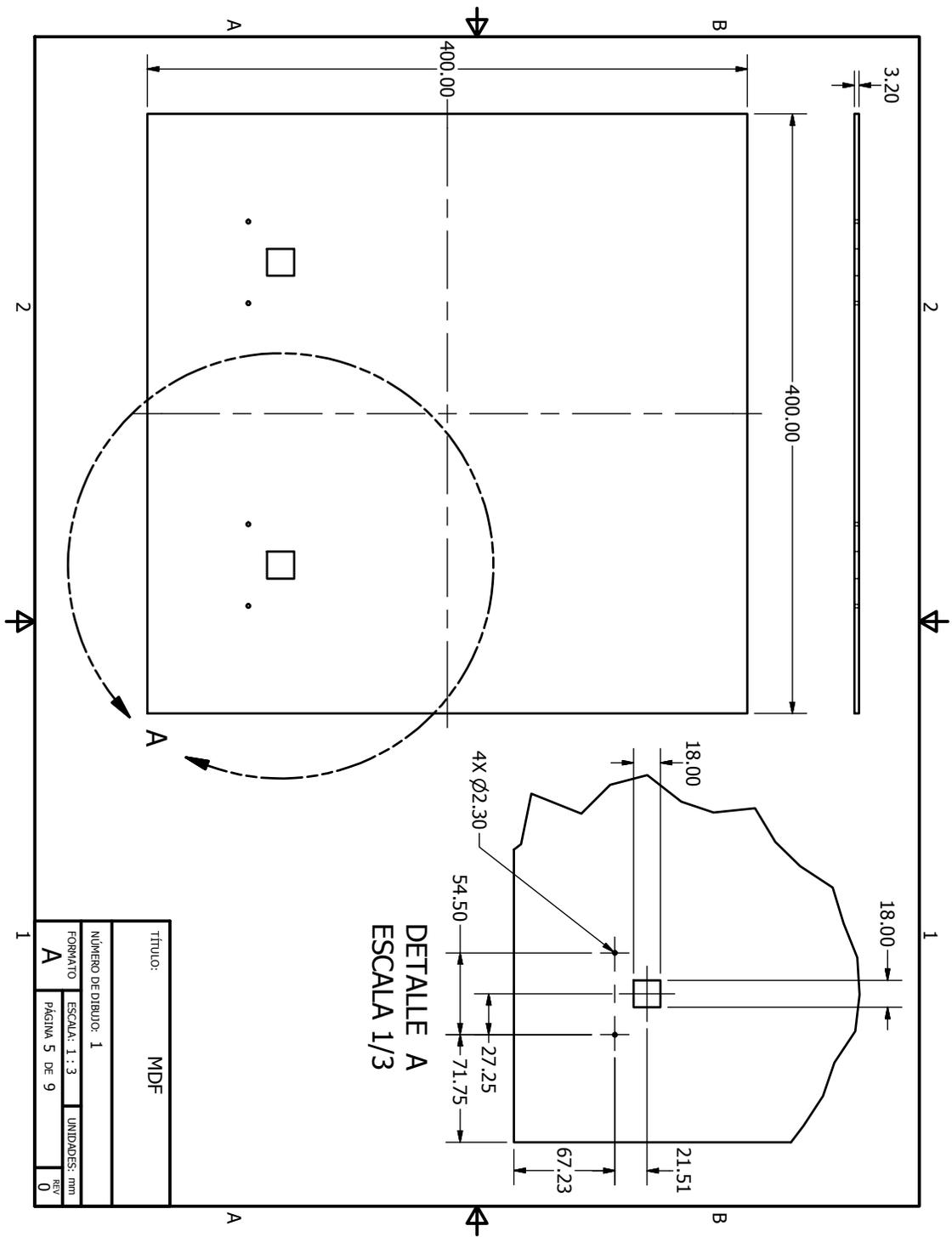
TÍTULO: <b>BASE - PIEZA SUPERIOR INFERIOR</b>			
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1 : 3	UNIDADES: mm	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 2 DE 9	BY	0



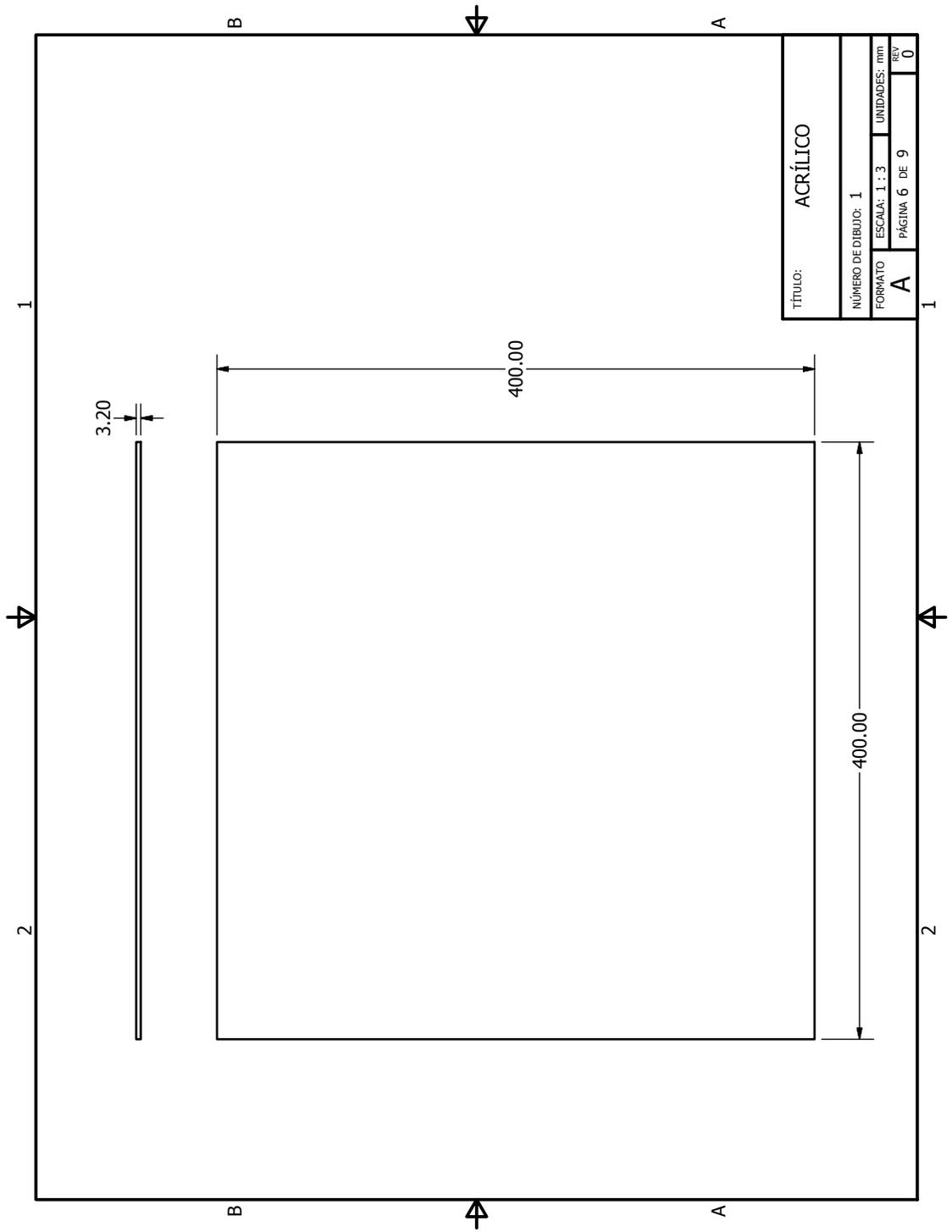
Título: <b>BASE - LATERAL</b>			
CORTO			
Número de dibujo: 1			
Formato	Escala: 1 : 1	Unidades: mm	
A	Página 3 de 9	REV	0

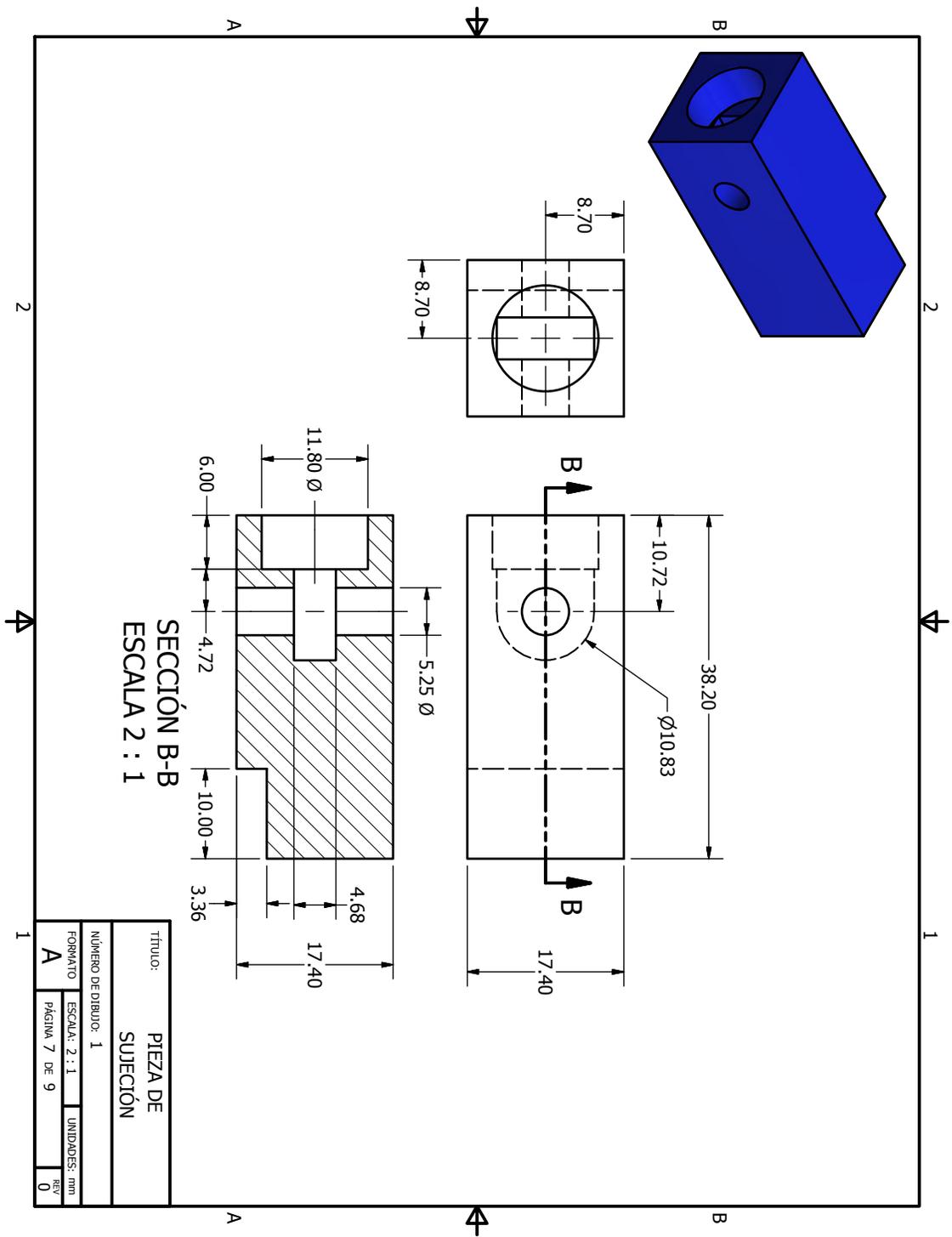


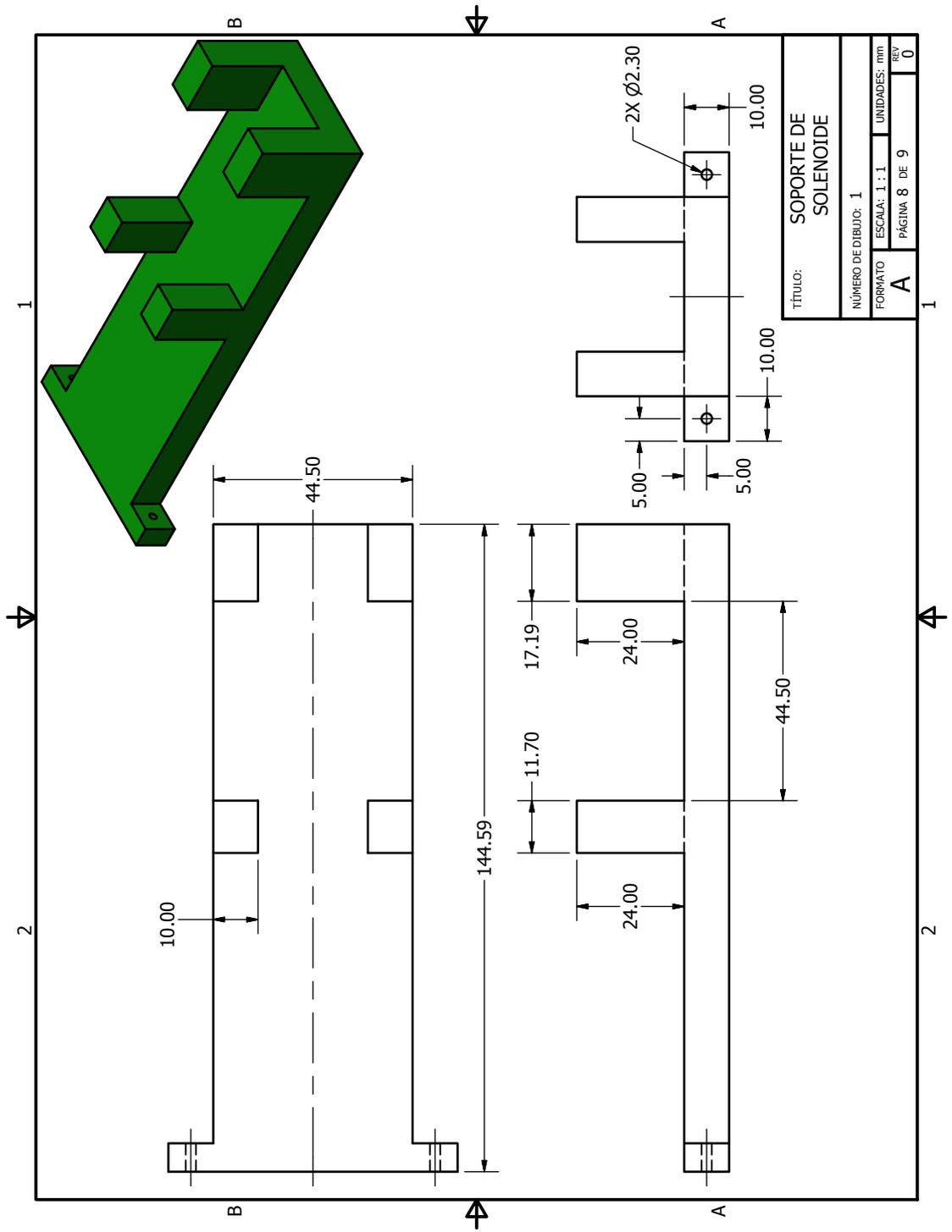
TÍTULO: BASE - LATERAL LARGO	
NÚMERO DE DIBUJO: 1	
FORMATO: A	UNIDADES: mm
ESCALA: 1 : 3	PÁGINA 4 DE 9
	0

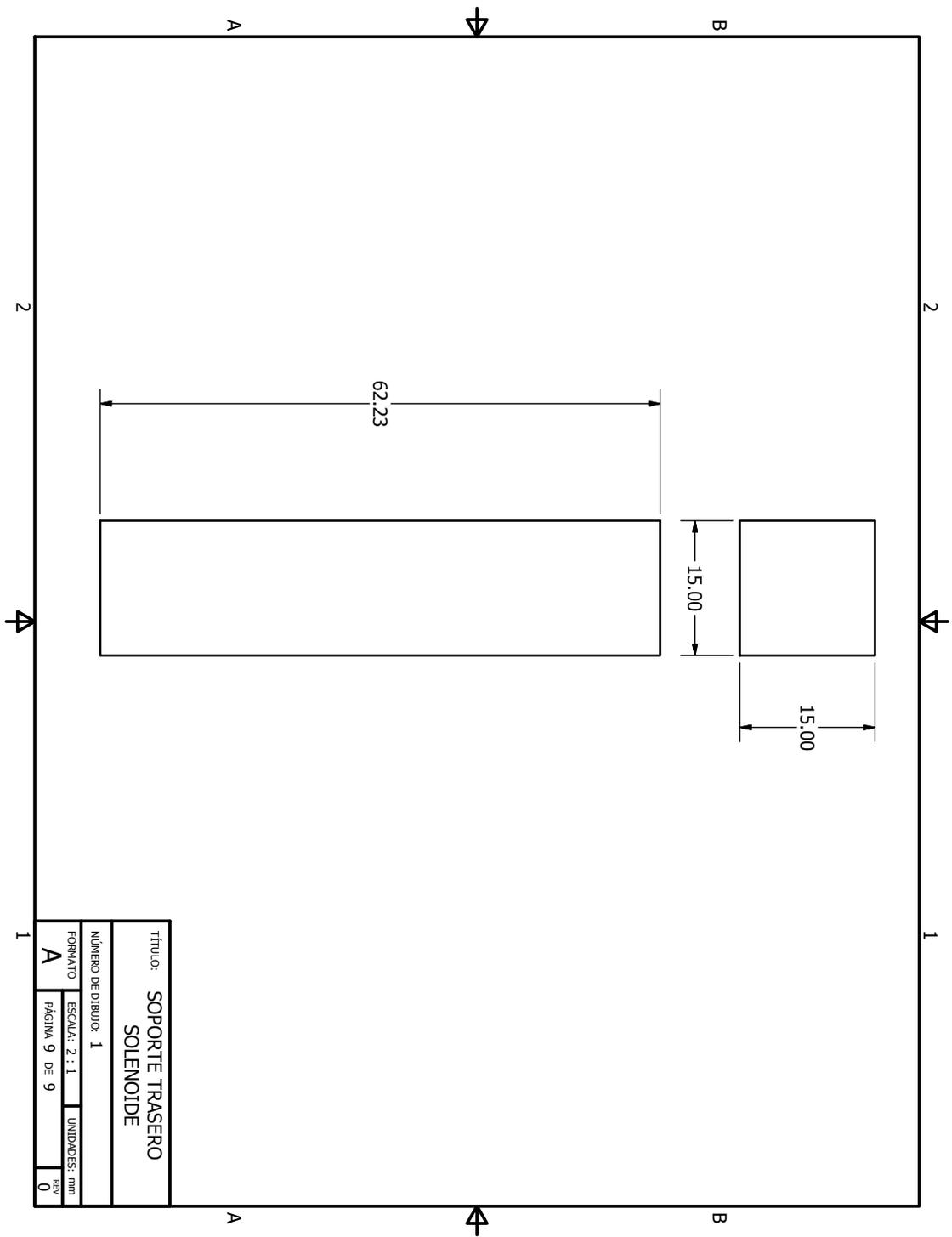


Título:		MDF	
Número de dibujo:		1	
Formato	ESCALA: 1 : 3	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 5 DE 9	REV	0



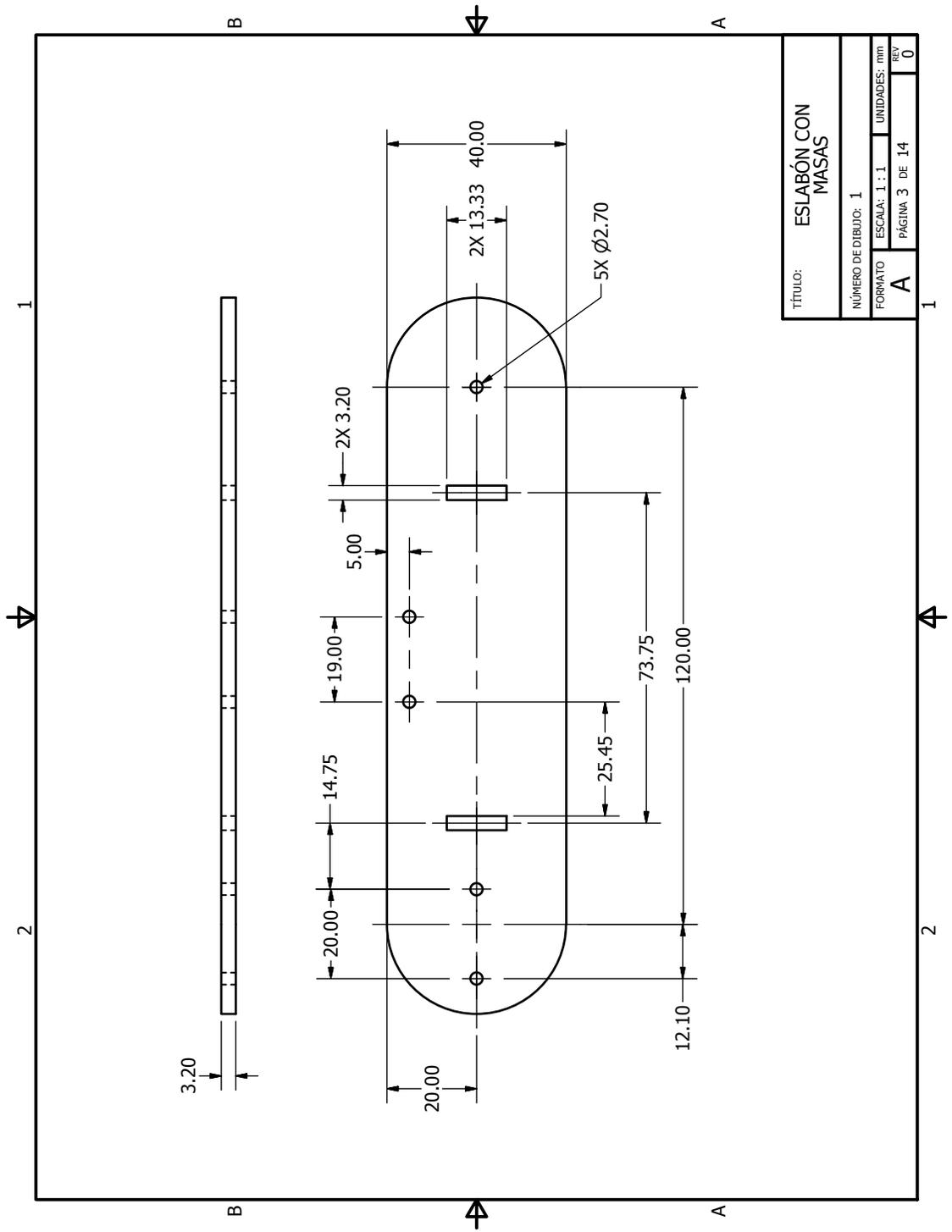




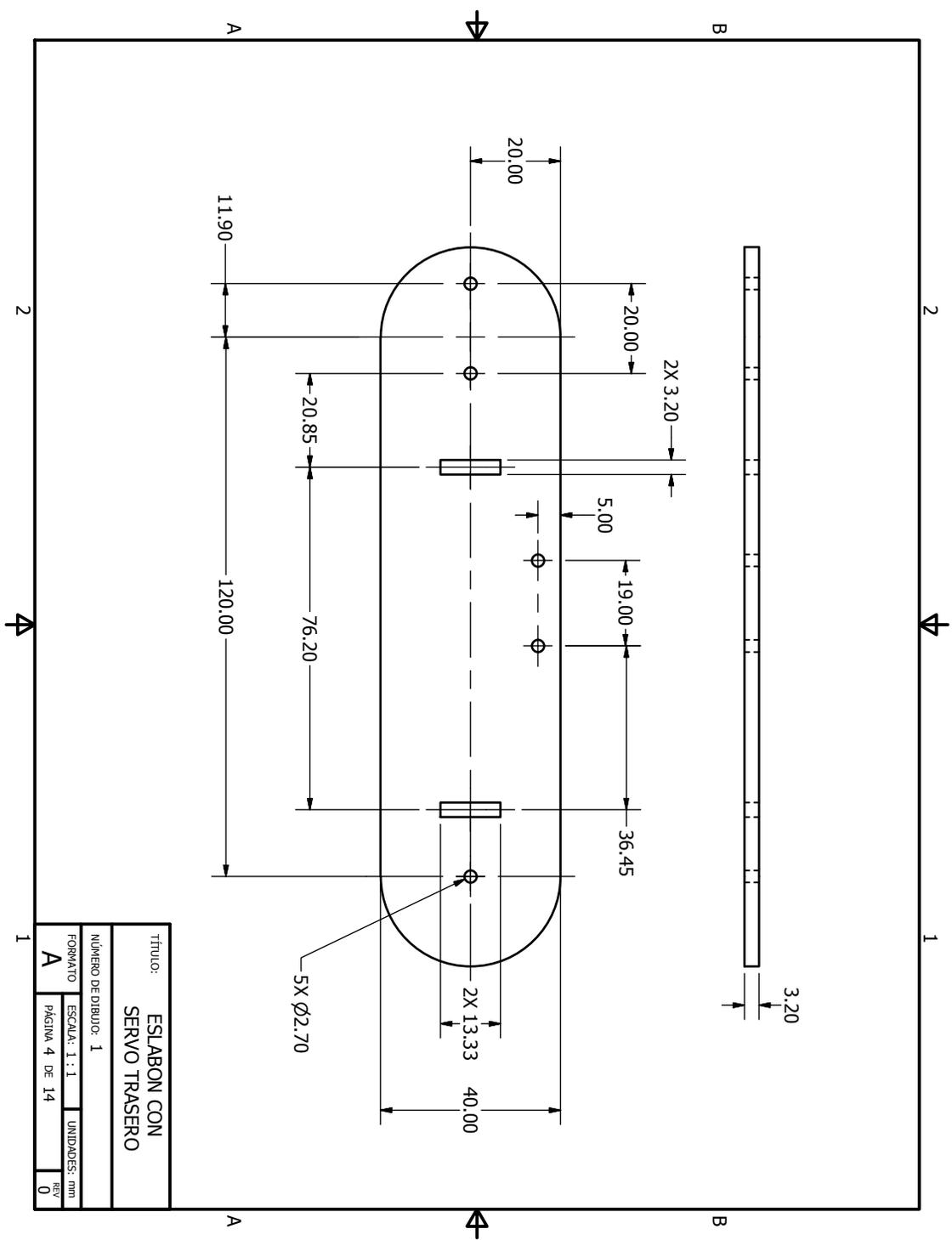


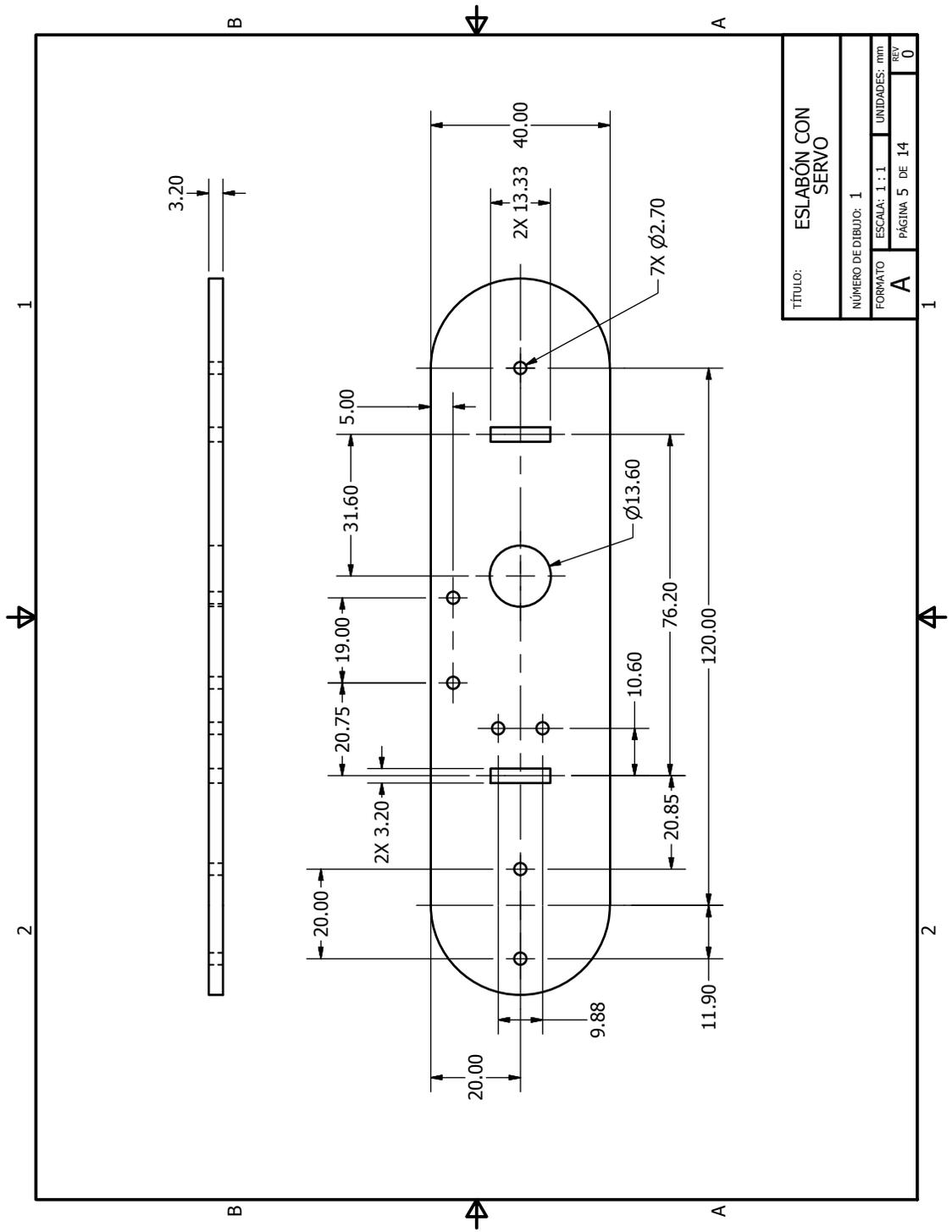


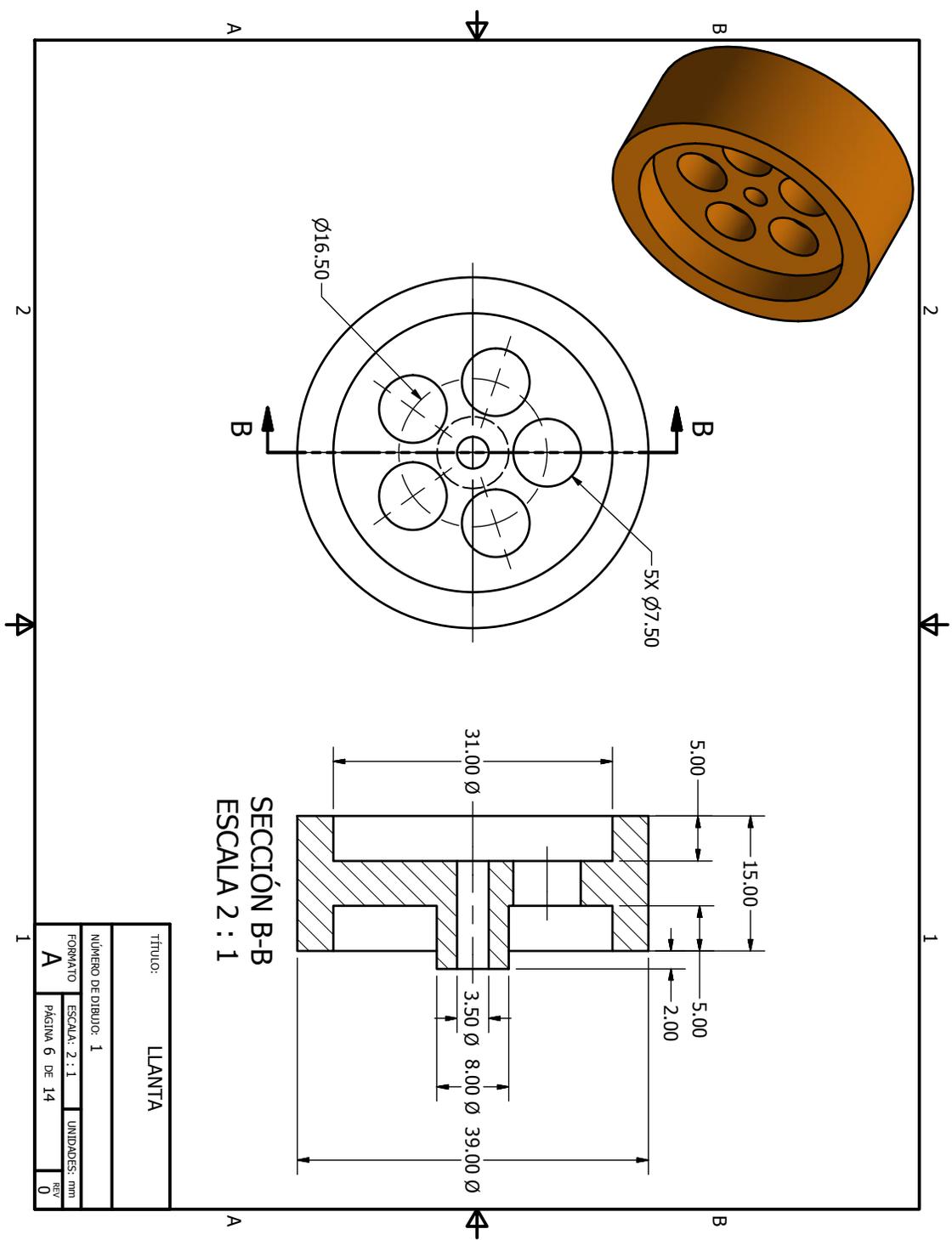


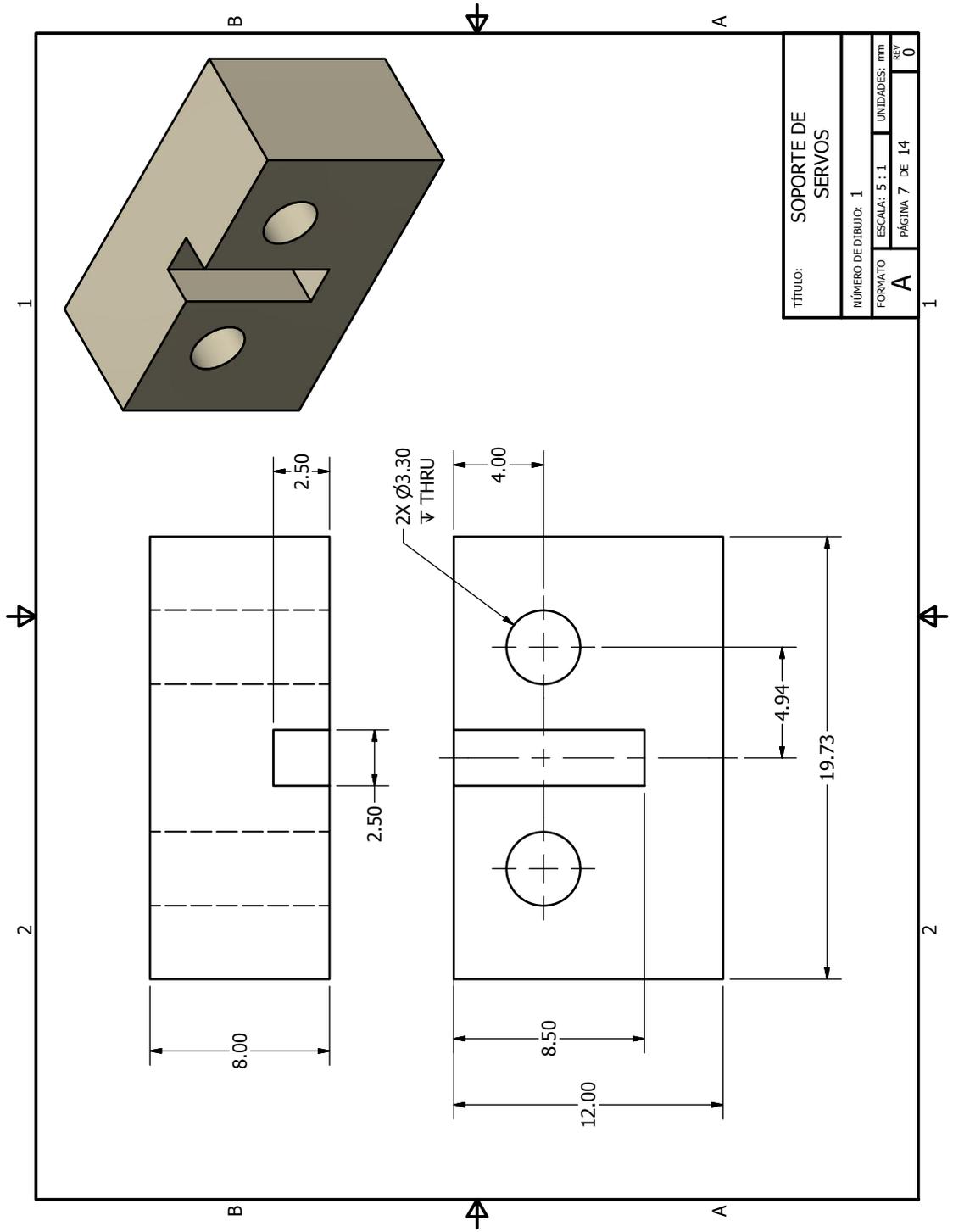


TÍTULO: <b>ESLABÓN CON MASAS</b>	
NÚMERO DE DIBUJO: 1	
FORMATO: <b>A</b>	UNIDADES: mm
ESCALA: 1 : 1	PÁGINA 3 DE 14
BY	0

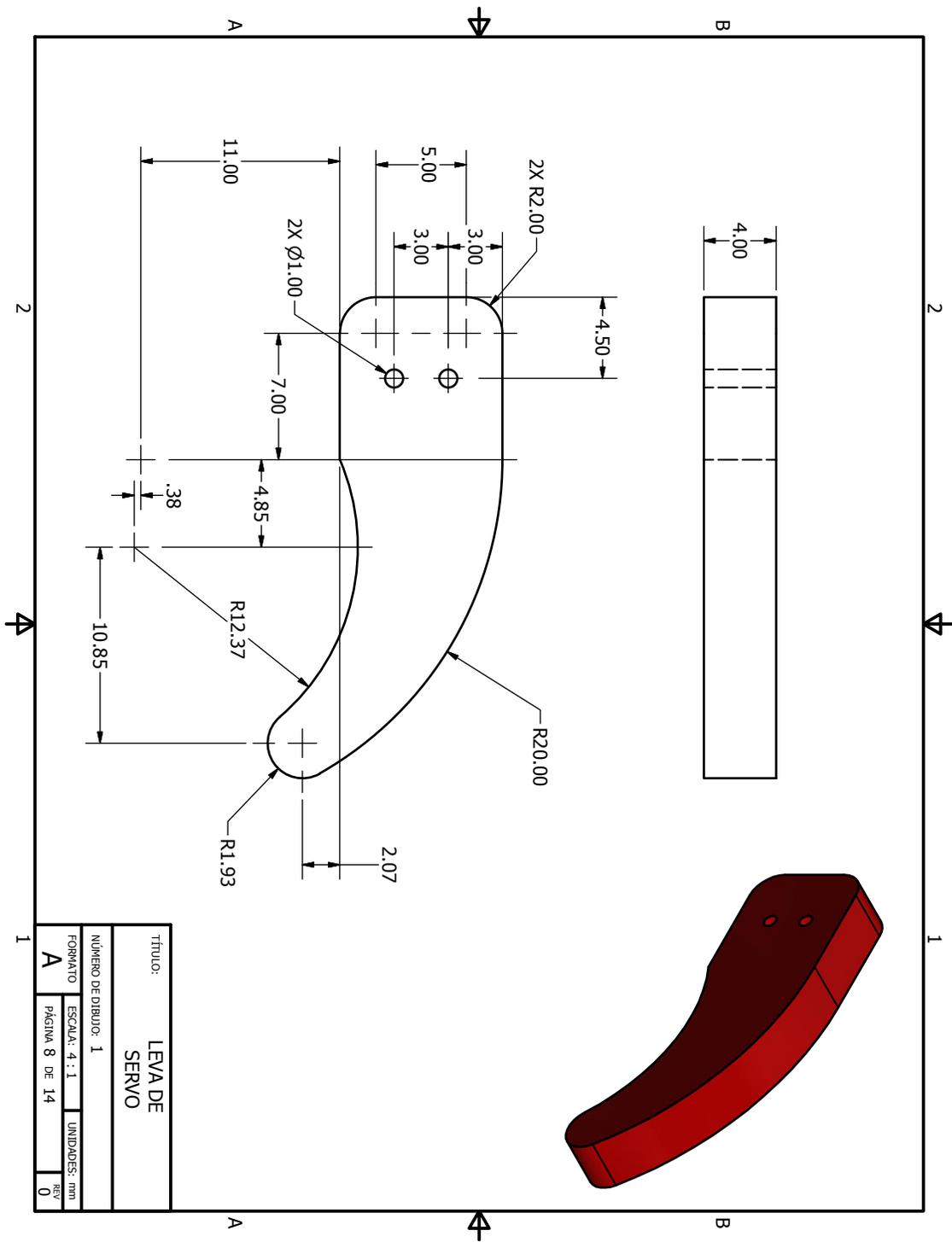




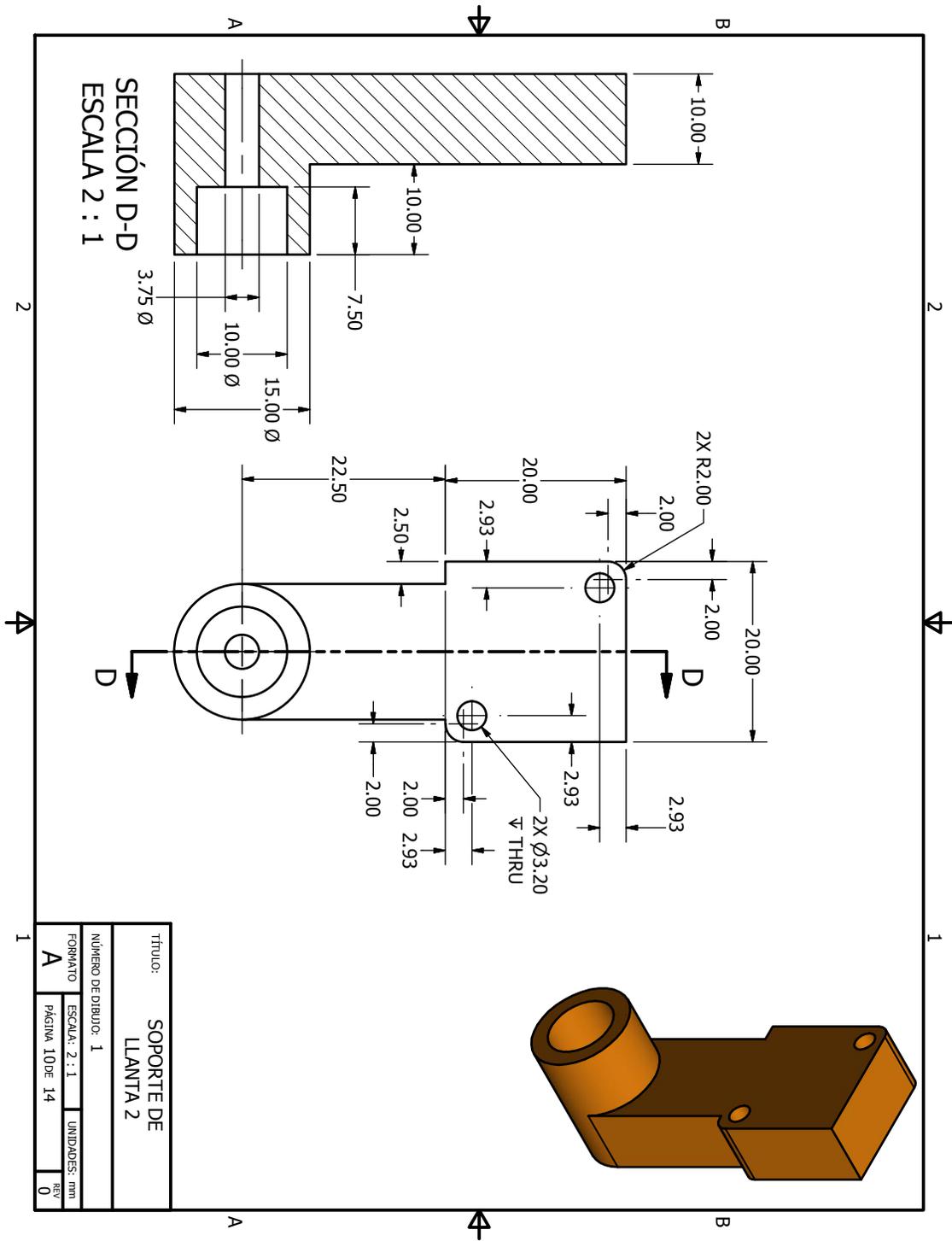


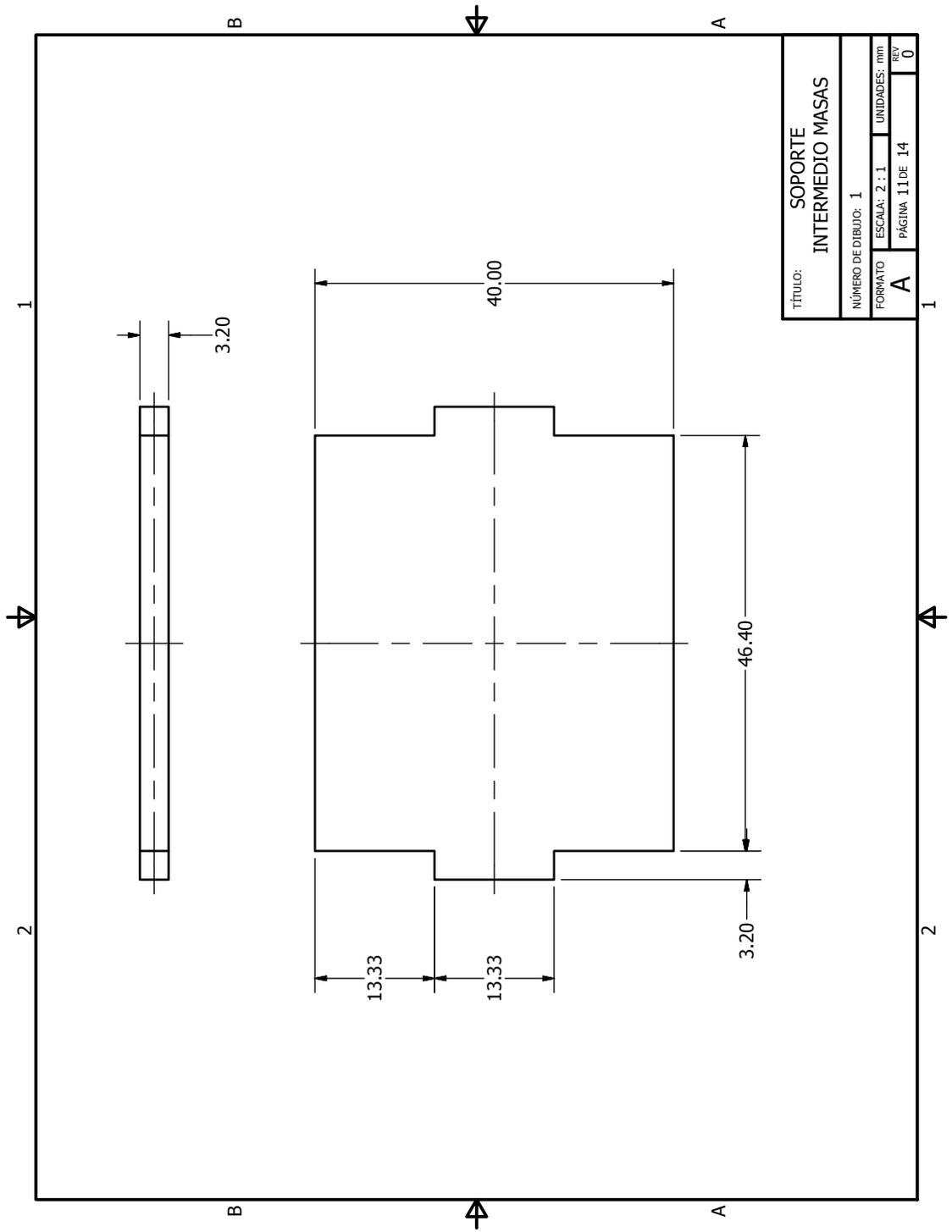


TÍTULO: SOPORTE DE SERVOS			
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 5 : 1	UNIDADES: mm	LIBR
A	PÁGINA 7	DE 14	0

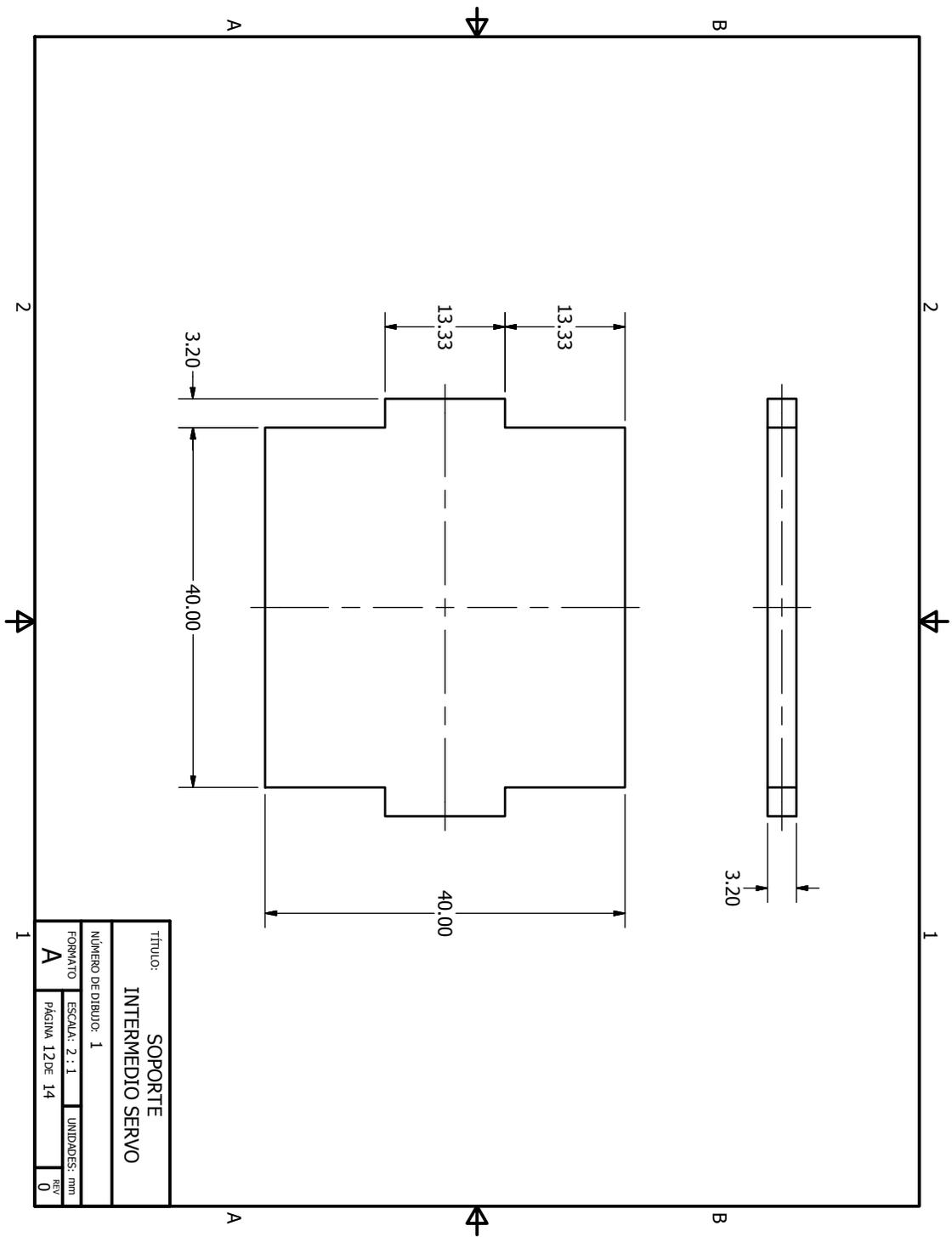




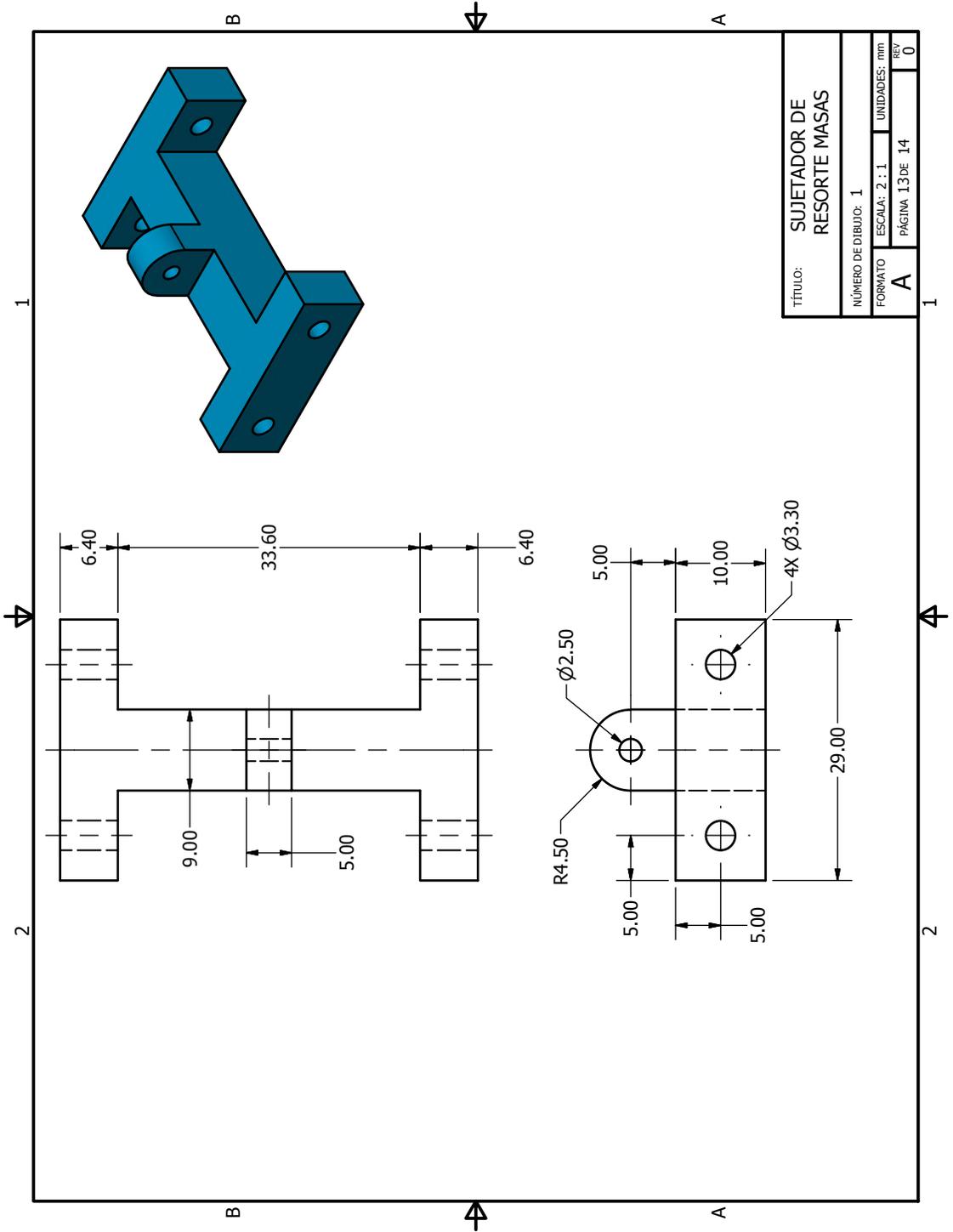




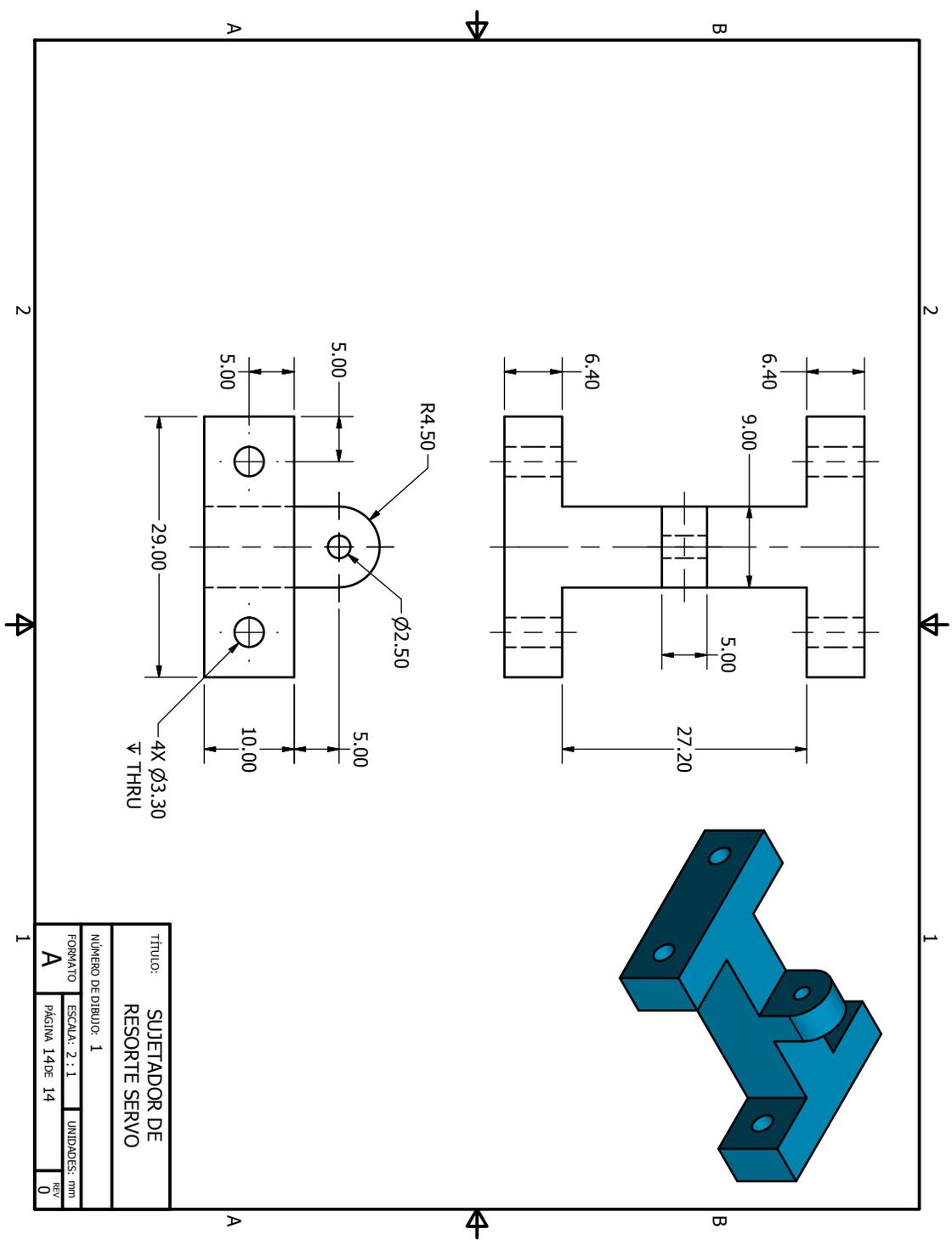
TÍTULO:		SOPORTE INTERMEDIO MASAS	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A	2 : 1	PÁGINA 11 DE 14	0



Título:			
<b>SOPORTE INTERMEDIO SERVO</b>			
Número de dibujo: 1			
Formato	Escala: 2 : 1	Unidades: mm	Rev
<b>A</b>	Página 12 de 14		0



TÍTULO: SUJETADOR DE RESORTE MASAS	
NÚMERO DE DIBUJO: 1	
FORMATO: A	UNIDADES: mm
ESCALA: 2 : 1	PÁGINA 13 DE 14
	0



TÍTULO:		SUJETADOR DE RESORTE SERVO	
NÚMERO DE DIBUJO:		1	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A	2 : 1	PÁGINA	14 DE 14
		REV	0

