

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de prototipo bio-inspirado en la  
especie *Mantis religiosa* de liberación rápida para tareas de  
Manipulación**

Trabajo de graduación presentado por Delbert Francisco Custodio  
Vargas para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2018







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de prototipo bio-inspirado en la especie *Mantis religiosa* de liberación rápida para tareas de Manipulación**


Trabajo de graduación presentado por Delbert Francisco Custodio Vargas para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2018



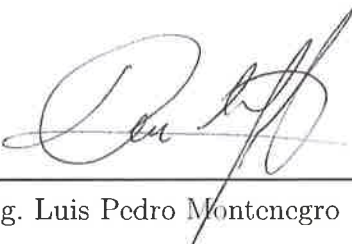
Vo.Bo.:

(f)   
MSc. José Eduardo Morales

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. José Eduardo Morales

(f)   
MSc. Pablo Oliva

(f)   
Ing. Luis Pedro Montenegro

Fecha de aprobación: Guatemala, 06 de diciembre de 2018.



El presente trabajo investigativo es dedicado a mis padres, que han sabido darme ejemplos de trabajo y perseverancia, a mis hermanos y hermanas que han estado para mí siempre, y a mi demás familia que siempre me ha apoyado en la carrera que elegí y son parte de los cimientos que me ayudaron en esta investigación, y quiero agradecerle a mi catedrático MSc. Miguel Zea, con quien esta tesis nació y a MSc. José Eduardo Morales, asesor de esta tesis quien estuvo guiándome constantemente en el desarrollo de este trabajo.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xi</b>
<b>Resumen</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>13</b>
6.1. <i>Mantis religiosa</i> . . . . .	13
6.1.1. Estudio de las extremidades raptoriales de la <i>M. religiosa</i> . . . . .	15
6.2. Musculatura de las extremidades raptoriales . . . . .	18
6.3. Definición y diseño de mecanismos . . . . .	23
6.3.1. Proceso de diseño . . . . .	23
6.4. Robótica . . . . .	24
6.4.1. Cinemática directa de manipuladores . . . . .	24
6.4.2. Cinemática diferencial . . . . .	28
6.4.3. Estática en manipuladores . . . . .	31

6.4.4. Robótica bio-inspirada . . . . .	33
6.5. Estadística: análisis de la varianza . . . . .	35
<b>7. Metodología</b>	<b>37</b>
7.1. Diseño y caracterización . . . . .	37
7.2. Comparación del porcentaje de éxito . . . . .	38
7.3. Plataforma de pruebas . . . . .	38
<b>8. Bio-inspiración</b>	<b>39</b>
8.1. Simulaciones y diseño iterativo . . . . .	40
8.1.1. Simulación con Simscape y primeras 2 iteraciones . . . . .	41
8.1.2. Diseños 3 y 4 . . . . .	42
8.1.3. Diseños 5 y 6 . . . . .	43
8.1.4. Diseño 7 . . . . .	44
<b>9. Plataforma implementada</b>	<b>47</b>
<b>10.Resultados obtenidos por iteración</b>	<b>53</b>
10.1. Diseños 1 y 2 . . . . .	53
10.2. Diseños 3 y 4 . . . . .	55
10.3. Diseños 5 y 6 . . . . .	55
10.4. Diseño 7 . . . . .	57
10.5. Comparación de tiempos . . . . .	60
<b>11.Cinemática directa y simulación del prototipo final</b>	<b>61</b>
<b>12.Análisis estadístico sobre el porcentaje de éxito</b>	<b>65</b>
<b>13.Conclusiones</b>	<b>69</b>
<b>14.Recomendaciones</b>	<b>71</b>
<b>15.Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>16.Anexos</b>	<b>75</b>
16.1. Código de MATLAB para llevar a cabo la simulación del prototipo . . . . .	76
16.2. Cinemática directa y Jacobiano analítico . . . . .	80
16.3. Ejemplos de geometrías utilizadas . . . . .	81
16.4. Resultados prueba ANOVA . . . . .	83
16.5. Regresiones obtenidas para los resortes torsionales . . . . .	87
16.6. Videos en Youtube . . . . .	88
16.7. Planos . . . . .	88
<b>17.Glosario</b>	<b>89</b>

1.	MantisBot . . . . .	4
2.	Nomenclatura del MantisBot . . . . .	4
3.	Mecanismo para desarrollo de MantisBot . . . . .	4
4.	Representación de extremidad raptorial según García [2] . . . . .	5
5.	Ecuaciones obtenidas por García [2] en X, Y y Z . . . . .	6
6.	Propuestas hechas por Lockhande [3] . . . . .	6
7.	<i>M. religiosa</i> en posición de "rezo" . . . . .	14
8.	Vista cercana de una <i>M. religiosa</i> . . . . .	14
9.	Chela y Sub-Chela . . . . .	15
10.	Configuración y ejemplo de extremidad raptorial . . . . .	16
11.	Representación simple de una extremidad . . . . .	17
12.	Mecanismo de 4 barras según McHenry . . . . .	18
13.	Vista interna de la junta coxa-protorácica . . . . .	20
14.	Vista interna de la junta coxa-trocánter . . . . .	20
15.	Vista interna de la junta trocánter-fémur . . . . .	21
16.	Vista interna de la junta fémur-tibia . . . . .	21
17.	Vista interna de la junta tibia-tarsus . . . . .	22
18.	Ejemplos de eslabones . . . . .	23
19.	Ejemplos de traslación y rotación, tomados de [9] . . . . .	26
20.	Notación Denavit-Hartenberg . . . . .	27
21.	Parámetros de Denavit-Hartenberg . . . . .	28
22.	Ejemplo de 2 GDL . . . . .	29
23.	Robot humanoide HRP-2 . . . . .	33
24.	Mecanismo raptorial de la <i>M. religiosa</i> . . . . .	40
25.	Secuencia del movimiento de caza . . . . .	41
26.	Simulaciones del mecanismo . . . . .	42
27.	Diseños 1 y 2 . . . . .	42
28.	Diseños 3 y 4 . . . . .	43
29.	Vista general del diseño 5 . . . . .	43
30.	Diseños 5 y 6 . . . . .	44

31.	Implementación de poleas . . . . .	44
32.	Séptima iteración del mecanismo . . . . .	45
33.	Idea general con el mecanismo de Geneva . . . . .	48
34.	Modificación del mecanismo de Geneva . . . . .	48
35.	Idea general del mecanismo de liberación . . . . .	49
36.	Plataforma de pruebas . . . . .	50
37.	Implementación de la plataforma de pruebas . . . . .	50
38.	Inercias de prueba . . . . .	54
39.	Trayectorias obtenidas para el mecanismo 1 . . . . .	54
40.	Trayectorias de los mecanismos 1 y 2 . . . . .	55
41.	Trayectorias de los mecanismos 3 y 4 . . . . .	56
42.	Trayectorias de los mecanismos 5 y 6 . . . . .	56
43.	Trayectoria del mecanismo 7 . . . . .	57
44.	Trayectorias en Kinovea . . . . .	58
45.	Secuencia de captura del mecanismo . . . . .	59
46.	Representación cinemática real del prototipo . . . . .	62
47.	Representación cinemática correcta del prototipo . . . . .	62
48.	Posición inicial del mecanismo . . . . .	63
49.	Posicion final del mecanismo . . . . .	63
50.	Magnitud de la fuerza en el efector final . . . . .	63
51.	Magnitud de $F_x$ . . . . .	63
52.	Magnitud de $F_y$ . . . . .	63
53.	Torque en la junta 1 . . . . .	64
54.	Torque en la junta 2 . . . . .	64
55.	Torque en la junta 3 . . . . .	64
56.	Objeto utilizado para la prueba muestral y ANOVA . . . . .	65
57.	Objeto utilizado para la segunda iteración de la prueba ANOVA . . . . .	65
58.	Mapa sobre la prueba muestral con el objeto 1 . . . . .	66
59.	Área de captura definida por Corrette[13] en su investigación . . . . .	66
60.	Resultados de la prueba Anova para el objeto 1 y 2 . . . . .	67
61.	Cinemática directa obtenida de MATLAB . . . . .	80
62.	Cinemática diferencial obtenida de MATLAB . . . . .	80
63.	Geometrías no recomendadas (set 1) . . . . .	81
64.	Geometrías no recomendadas (set 2) . . . . .	81
65.	Geometrías recomendadas para su captura . . . . .	82
66.	Regresión para el resorte 1 . . . . .	87
67.	Regresión para el resorte 2 . . . . .	87

---

Lista de cuadros

---

1.	Ejemplo de tabla para parámetros de DH . . . . .	28
2.	Tiempos obtenidos por diseño . . . . .	60
3.	Parámetros DH del prototipo . . . . .	61
4.	Parámetros Denavit-Hartenberg reales . . . . .	62
5.	Resultados obtenidos para la prueba ANOVA . . . . .	67
6.	Réplicas ANOVA objeto 1 . . . . .	83
7.	Resultados ANOVA objeto 1 . . . . .	84
8.	Resumen ANOVA objeto 1 . . . . .	84
9.	Réplicas ANOVA objeto 2 . . . . .	85
10.	Resultados ANOVA objeto 2 . . . . .	86
11.	Resumen ANOVA objeto 2 . . . . .	86



Esta tesis a nivel de licenciatura se encuentra bajo el marco de investigación sobre Robótica bio-inspirada del Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo de esta tesis es el de constatar si el diseño de un manipulador bio-inspirado en la *Mantis religiosa* es viable o no. El presente trabajo exhibe el proceso de desarrollo, diseño y caracterización de un mecanismo bio-inspirado en la *Mantis religiosa*. Dicho proceso es en su mayoría iterativo, con una amplia oportunidad de mejora para iteraciones o investigaciones posteriores a esta que la utilicen como base.

Esta investigación se divide en una parte teórica donde se abordan conceptos como el proceso de diseño ingenieril, matrices de transformación para manipuladores seriales, características útiles encontradas en la especie *Mantis religiosa* y la prueba estadística conocida como ANOVA, para luego plantear una metodología de diseño para desarrollar mecanismos y finalmente se presentan y analizan los resultados obtenidos con las distintas iteraciones del prototipo realizado. Se muestran dichos resultados de tal forma que es posible inferir sobre estos con la ayuda de la discusión que los acompaña, así como distintas secciones separadas de manera lógica para comprender en su totalidad las conclusiones planteadas en este estudio; siendo una de las más importantes que sí es posible llegar a caracterizar un manipulador o efector basado en la actividad de caza de la *Mantis religiosa*.



This undergraduate thesis is under the investigation frame of Bio-Inspired Robotics, developed under the guidance of the Electronics and Mechatronics Department of the Universidad del Valle de Guatemala. The objective of this thesis is to prove if the design of a bio-inspired manipulator based on the *M. religiosa* is viable or not. This work exposes the development, design and characterization of a bio-inspired mechanism founded in the Praying Mantis. Such process is iterative in its nature, with an ample opportunity for improvement in posterior iterations or investigations that could benefit of this research.

This investigation is composed of a theoretic part where the concepts of engineering design process, transformation matrices for serial manipulators, useful characteristics found in the *Mantis religiosa* and a statistical test known as ANOVA are used to set a defined design methodology to develop mechanisms, which finally is used to present and analyze the results obtained with each of the iterations of the mechanism. Such results are shown in a form which is useful to infer about them with help from the accompanying discussions. Also, this investigation contains separated sections that are distributed in a logical manner to comprehend in their entirety the conclusions of this research; being one of the most important ones the fact that it is, indeed, possible to characterize an effector or manipulator based in the hunting activity of the *M. religiosa*.



La presente investigación combina conocimientos sobre robótica, diseño mecánico y metodología propia del campo de Ingeniería. Esta tesis presenta una idea innovadora para poder aplicarse al campo de la robótica por medio de un mecanismo útil para un uso común como lo es la manipulación de objetos. Por medio de una metodología definida y la implementación de pruebas adecuadas, así como análisis y derivación cinemática, se pretende obtener un dispositivo capaz de emular la rapidez, precisión y eficiencia de la especie conocida como *Mantis religiosa* cuando esta se encuentra apresando objetivos para alimentarse. Durante la extensión del presente trabajo se plantean también las bases para justificar el diseño del mecanismo presentado, así como los fundamentos para poder caracterizar al mismo sobre ciertas guías y restricciones para llevar a cabo el análisis del mismo.

Asimismo se presenta una comparación entre el mecanismo desarrollado y la especie sobre la que se inspiró el mismo, así como la justificación del diseño final del mecanismo propuesto. Tomando en cuenta los aspectos anteriores, es posible justificar esta investigación en que hoy en día la robótica bio-inspirada ha abierto un campo innovador en el mundo, así como ha representado avances en la representación analítica de muchos mecanismos propios de animales e insectos en general para su estudio. Por último, es posible tomar en cuenta que hoy en día los mecanismos o prototipos basados en las extremidades de la *Mantis religiosa* se han basado en cadenas abiertas, por lo que esta propuesta resulta ser innovadora y funcional para que el campo de la robótica bio-inspirada pueda seguir ampliándose.



En la mayoría de investigaciones y desarrollo de prototipos, la implementación de un actuador basado en las extremidades raptoriales de la *M. religiosa* se ha basado en mecanismos de Cadena abierta. El hecho de que estos mecanismos sean de cadena abierta implica que no todos los eslabones se encuentran conectados a dos o más eslabones. Esto obliga a que el sistema deba de tener, en la mayoría de casos, un actuador por cada junta. Lo anterior es precisamente lo que se busca evitar, ya que esta investigación se basa en obtener un mecanismo capaz de simular el movimiento con una rapidez parecida a la encontrada en la literatura y así obtener mayor fidelidad al movimiento de la *M. religiosa* en cuanto a la actividad de caza.

A continuación se presentan antecedentes obtenidos de Wilson[1] y García[2].

#### **MantisBot**

En el año 2015 se desarrolló una plataforma denominada como MantisBot [1]. Dicha plataforma se llevó a cabo para poder realizar investigaciones sobre el comportamiento neuronal de una *Mantis religiosa*. Este prototipo cuenta con 28 grados de libertad (GDL), y se controla por medio de una simulación neural, con una escala de 13:1 en comparación con las extremidades de una Mantis promedio. Resulta interesante que el objetivo principal de esta investigación era poder estudiar la naturaleza de cómo la Mantis tiende a cazar y también la transición entre los comportamientos de la misma: desde que adopta una posición de reposo hasta cuando ésta se prepara para atacar y devorar a su presa. Este prototipo puede observarse en la Figura 1

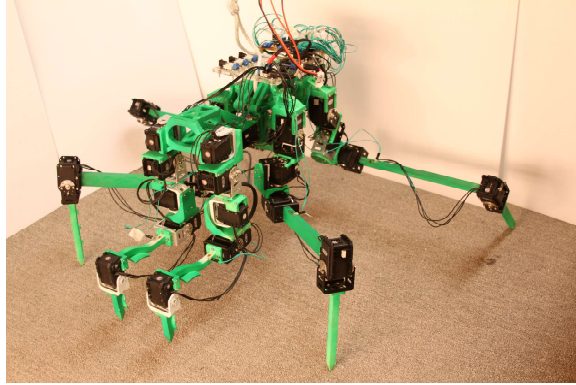


Figura 1: MantisBot desarrollado en Case Western Reserve University

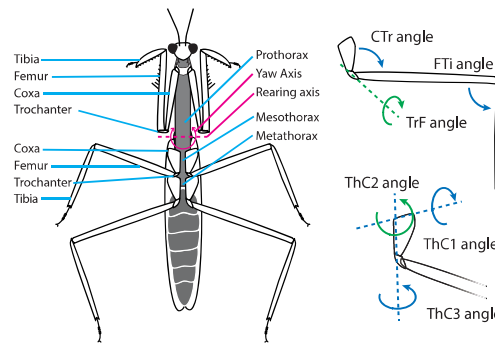


Figura 2: Nomenclatura utilizada para el desarrollo del MantisBot

La elaboración del MantisBot se basa en que la Mantis puede modelarse como una serie de eslabones con muchos grados de libertad (GDL). Para obtener dichas conclusiones, el equipo encargado presentó sus resultados basados en lo descrito en la Figura 2.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos inferir por medio de las Figuras 3 y 1 que se utiliza un mecanismo de Cadena abierta que recrea el movimiento de las extremidades raptorias, por lo que es necesario un actuador o motor por cada junta para que éste funcione correctamente. Esta característica es un punto importante, ya que el mecanismo propuesto en esta tesis busca ser lo más cercano posible a una

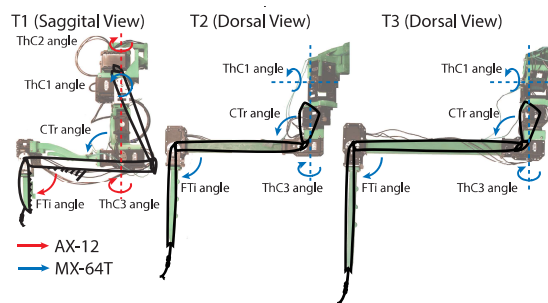


Figura 3: Mecanismo utilizado para recrear las patas raptorias en el MantisBot [1]

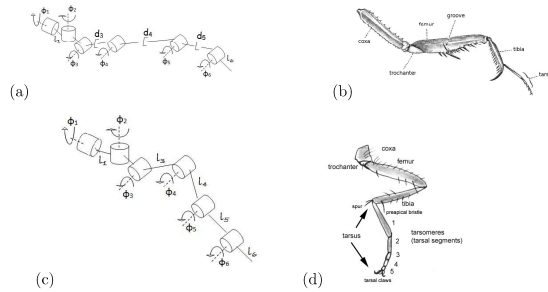


Figura 4: Representación de un mecanismo equivalente de una extremidad raptorial según García [2]

Cadena cerrada con pocos GDL's para obtener resultados parecidos en cuanto al movimiento de las extremidades raptorias de la Mantis.

### Recreación de una extremidad raptorial

Otro antecedente es el de Edgar García[2]. En su trabajo puede encontrarse la Figura 4, y en esta puede apreciarse que el modelado de una pata raptorial ha tendido a ser de cadena abierta. Debido a esto, García presenta ecuaciones basándose en los ángulos manipulables de la Figura 4, por lo que éstas tienden a ser no lineales y extendidas, lo que se desea evitar con la propuesta del mecanismo en el que se basa esta tesis.

Algunas de estas ecuaciones, obtenidas por García [2], pueden observarse en las Figuras 5a, 5b y 5c.

Por último, un antecedente relacionado a recrear la movilidad de un insecto se puede encontrar en la investigación realizada por Lokhande[3]. En dicha investigación, Lokhande llevó a cabo la réplica del movimiento de una araña por medio de un mecanismo conocido como "Mecanismo de Klann", y en esta misma publicación se hace mención de un mecanismo reconocido como de Theo Jansen, que generalmente son complicados y tienden a tener la cualidad de llevar a cabo trayectorias extrañas que sean necesarias para algún tipo de movimiento. Estas dos últimas variantes de un mismo mecanismo pueden servir de guía para la propuesta de algún dispositivo más complejo para recrear el movimiento de la extremidad raptorial de una *M. religiosa*. Dichas propuestas pueden observarse en las Figuras 6a y 6b.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_m = & l_1 c_1 (\dot{\phi}_1) + \frac{1}{2} d_3 c_{123} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) + \frac{1}{2} d_3 s_{123} \\
& - \frac{1}{2} d_3 c_{1-23} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) - \frac{1}{2} d_3 s_{1-23} + \frac{1}{2} d_4 c_{1234} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4) \\
& + \frac{1}{2} d_4 s_{1234} - \frac{1}{2} d_4 c_{1-234} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4) - \frac{1}{2} d_4 s_{1-234} \\
& + \frac{1}{2} d_5 c_{12345} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5) + \frac{1}{2} d_5 s_{12345} \\
& - \frac{1}{2} d_5 c_{1-2345} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5) - \frac{1}{2} d_5 s_{1-2345} \\
& + l_6 c_{13456} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}_6) c_2 - l_6 s_{13456} s_2 (\dot{\phi}_2). \quad (16)
\end{aligned}$$

(a) Ejemplo de ecuación obtenida por García[2] para un cambio en el eje X

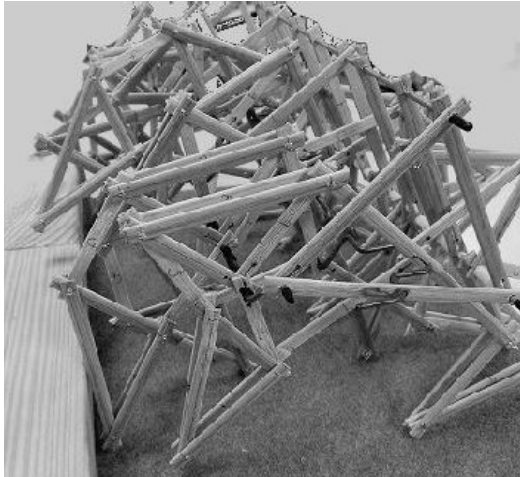
$$\begin{aligned}
\dot{z}_m = & -l_1 s_1 (\dot{\phi}_1) - \frac{1}{2} d_3 s_{1-23} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) + \frac{1}{2} d_3 c_{1-23} \\
& - \frac{1}{2} d_3 s_{123} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) + \frac{1}{2} d_3 c_{123} \\
& - \frac{1}{2} d_4 s_{1-234} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4) + \frac{1}{2} d_4 c_{1-234} \\
& - \frac{1}{2} d_4 s_{1234} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4) + \frac{1}{2} d_4 c_{1234} \\
& - \frac{1}{2} d_5 s_{1-2345} (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5) + \frac{1}{2} d_5 c_{1-2345} \\
& - \frac{1}{2} d_5 s_{12345} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5) + \frac{1}{2} d_5 c_{12345} \\
& - l_6 s_{13456} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}_6) c_2 - l_6 c_{13456} s_2 (\dot{\phi}_2). \quad (18)
\end{aligned}$$

(c) Ejemplo de ecuación obtenida por García[2] para un cambio en el eje Z

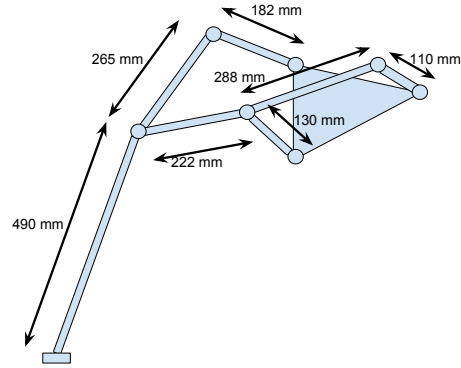
$$\begin{aligned}
\dot{y}_m = & l_1 c_1 (\dot{\phi}_1) + d_3 c_{13} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3) + d_3 s_{13} - d_4 c_{134} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4) \\
& + d_4 s_{134} + d_5 c_{1345} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5) + d_5 s_{1345} \\
& + l_6 c_{13456} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}_6). \quad (17)
\end{aligned}$$

(b) Ejemplo de ecuación obtenida por García[2] para un cambio en el eje Y

Figura 5: Parte del análisis de García[2] para la extremidad raptorial de una *Mantis*



(a) Propuesta de [3] basada en un mecanismo de Theo Jansen



(b) Mecanismo de Klann propuesto por Lockhande

Figura 6: Propuestas hechas por Lockhande [3]

El presente estudio se expone de manera que su enfoque es llevar a cabo un mecanismo bio-inspirado en la especie *Mantis religiosa* (que puede abreviarse también como *M. religiosa*). Debido a que hoy en día la bio-inspiración ha sido un factor innovador en el mundo, ya que ha sido de utilidad en distintos campos, como por ejemplo la aplicación de algoritmos bio-inspirados y el desarrollo de mecanismos basados en aspectos o habilidades únicas de muchos animales.

Por esto y más, se considera factible el hecho de investigar y caracterizar un mecanismo de liberación rápida bio-inspirado en la actividad de caza de la *Mantis religiosa*. El recrear este tipo de modelos permite obtener una representación analítica de ciertos comportamientos en la naturaleza, y asimismo es necesario conocer si dicha representación es capaz de brindar resultados viables para llevar a cabo mecanismos que en conjunto cumplan con tareas específicas.

De manera práctica el desarrollo de mecanismos altamente eficientes puede ser un avance tecnológico innovador, lo que favorecería a nuevos sistemas capaces de llevar a cabo distintas tareas de índole variada en el mundo industrial, médico, etc. También es válido mencionar que a nivel internacional, la robótica bio-inspirada es un campo nuevo, por lo que vale la pena desarrollar un prototipo basado en esta premisa. Por último, la importancia de este trabajo radica también en que actualmente Guatemala es un país donde es necesario promover la investigación científica, por lo que el desarrollo de esta debe fomentarse con proyectos donde su enfoque principal sea lograr la exposición de nuevas ideas basadas en fundamentos válidos, todo esto con la finalidad de enaltecer la investigación científica y sus beneficios en el país.



#### 4.1. Objetivo general

Crear un prototipo de plataforma robótica bio-inspirado en las extremidades raptoriales de la *Mantis religiosa* cumpliendo con el principio de manejo eficiente de energía.

#### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y caracterizar un mecanismo manipulador con consumo energético bajo de alta velocidad y precisión bio-inspirado en la actividad de caza de la *Mantis religiosa*.
- Comparar la tasa de éxito del prototipo con la tasa de éxito de las extremidades raptoriales de la *Mantis religiosa*.
- Implementar una plataforma de pruebas para comprobar el funcionamiento del prototipo bio-inspirado por medio de hardware y software.



Esta investigación es el primer paso para desarrollar un manipulador bio-inspirado en la *M. religiosa*. Por lo tanto, lo que se busca del prototipo a implementar es que éste sea funcional al ser accionado y que sea capaz de tomar o agarrar distintos objetos en distintas posiciones para determinar su funcionalidad. Para el desarrollo del mecanismo se busca que este tenga un movimiento planar, y para efectos de comparación directa se examinará el porcentaje de éxito de captura contra el porcentaje de éxito registrado de una *M. religiosa*.

Para el objetivo de caracterización, se busca describir la cinemática directa y diferencial del mecanismo. Estos aspectos son críticos ya que son la base para relacionar las fuerzas y torques que se generan en las distintas juntas del mecanismo cuando se describa lo que se conoce como "Estática de Manipuladores". Esto permitirá obtener información importante para justificar la bio-inspiración del mecanismo. Debido a la estructura del prototipo, se descarta llegar a realizar un análisis dinámico del mismo.

En cuanto al sistema de control del prototipo, este será considerado como "rústico" en el sentido de que se controlarán solamente los tiempos de carga del mecanismo, ya que en esta fase el objetivo principal es lograr la liberación rápida del mismo y no controlar la trayectoria que este generará al liberarse. Tomando en cuenta esto último y el estudio por medio de estática, se planea justificar completamente el diseño bio-inspirado al obtener los torques y fuerzas teóricas, permitiendo la comprensión directa del porqué se utilizaron los elementos que almacenen energía en el mecanismo final.



### 6.1. *Mantis religiosa*

La *Mantis religiosa* es un insecto perteneciente al orden **Mantodea**, cuya definición se deriva de la palabra griega para profeta o vidente. Este nombre se consideró para describir a las especies, como la *M. religiosa*, ya que la mayoría de estos insectos poseen el hábito de posar con sus extremidades frontales (conocidas también como extremidades Raptoriales) frente a sus caras en manera de rezo (Figura 8). Este orden es relativamente pequeño, ya que existen cerca de 1800 especies reconocidas en 8 familias, siendo la *M. religiosa* una de éstas según Preston Mafham[4]. Dicho espécimen puede observarse en la Figura 7.

Como tal, la *M. religiosa* posee las características consideradas normales en los insectos de este orden: cabezas con movilidad amplia y forma triangular, un tórax conocido como prototórax y dos patas frontales desarrolladas de tal forma que en una parte de ellas existen un tipo de espinas donde su única función es el aprehendimiento de presas vivas, la única preferencia alimenticia de estos insectos. Generalmente los especímenes machos poseen alas, mientras que las hembras no. Como se mencionó anteriormente, existen 8 familias de este tipo de insectos, pero el enfoque en esta investigación se basará en la familia *Mantidae*, de la cual forma parte la *M. religiosa*, por lo que es necesario indicar que de ahora en adelante el término "*Mantis*" o cualquier otro derivado será utilizado para referirse a esta especie en particular media vez no se especifique lo contrario. [4]

De manera general, las Mantis son insectos diurnos con hábitos predatorios muy marcados. En perspectiva, las Mantis tienden a mantenerse al acecho de una presa viva (ignorando cualquier tipo de "sobras" o animales muertos), por lo que las reacciones rápidas y precisas de estos insectos es un aspecto vital para su supervivencia. Parte de la eficiencia de la Mantis al cazar (Preston Mafham [4] indica que en el 85 % de

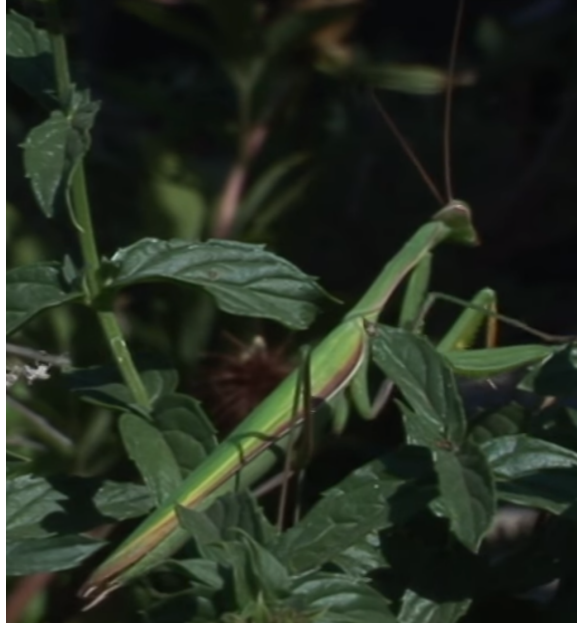


Figura 7: *M. religiosa* en posición de "rezo"

los casos las Mantis son exitosas) se basa en que sus patas raptorales se encuentran desarrolladas de tal forma que se pueden tomar a éstas como trampas móviles, ya que poseen espinas en el fémur y tibia de manera que éstas se encuentran y son las que aseguran que la presa no escape. Lo que se considera también que hace que las Mantis sean tan eficientes es que el movimiento de agarre tarda entre 10 y 30 milisegundos, lo que da una oportunidad de escape mínima a la presa . Es aquí mismo donde entra en juego la movilidad de la cabeza de la Mantis, ya que prácticamente sus patas frontales pueden abalanzarse en cualquier dirección donde ésta esté apuntando. Todas estas características mencionadas anteriormente hacen que la Mantis sea un insecto eficaz en cuanto a su actividad de caza según Preston [4].



Figura 8: Vista cercana de una *M. religiosa*

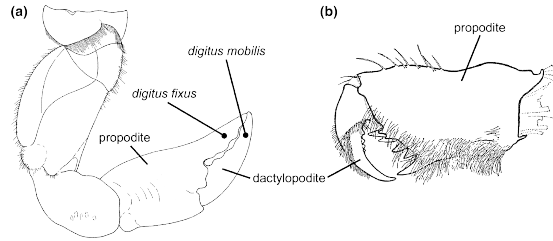


Figura 9: Ejemplo de una extremidad raptorial con Chela (a) y con Sub-chela (b)

### 6.1.1. Estudio de las extremidades raptorias de la *M. religiosa*

Las extremidades raptorias existen en varios linajes de insectos y crustáceos, ya que éstas representan la evolución de extremidades especiales para capturar o sostener presas u objetos. Como tal, existen dos clasificaciones para este tipo de extremidades: aquellas que poseen Chela y las que poseen Sub-Chela. Debido a la falta de un término en español para estas partes, durante este trabajo se utilizará el término "Chela" para describir extremidades que de alguna forma tienen cierto parecido a pinzas o tenazas como puede observarse en la Figura 9. [5]

La primer clasificación puede ser utilizada para sostener comida o presas que el insecto o crustáceo quiere consumir, mientras que la segunda clasificación consiste en que una parte de la extremidad es más larga en contraste con la sección que le sigue. Esta última tiene la cualidad de poder doblarse hacia la sección ventral o interior de la sección anterior de la extremidad. Para tener una idea clara de lo anterior es posible observar la Figura 9 obtenida del trabajo de Weirauch *et al.* [6].

Tomando en cuenta la clasificación anterior, es posible afirmar que las extremidades raptorias de la *M. religiosa* pertenecen al orden de la Sub-Chela, ya que la parte de la extremidad conocida como tibia posee la función de doblarse hacia la parte interior del fémur de la Mantis. Seguido de esto también podemos afirmar que la partes mencionadas anteriormente son las encargadas de hacer que este tipo de extremidades cumplan su función de caza para capturar presas vivas. A continuación se presenta las Figuras 10b y 10a en las cuales podemos observar la configuración de la extremidad de la Mantis.

Basados en la información anterior, es comprensible pensar que la forma de las patas raptorias debe de poseer relación con la velocidad y eficacia para cazar de las Mantis. Según una investigación llevada a cabo por Matthew J. McHenry [5], las juntas que existen entre esqueletos rígidos o exoesqueletos funcionan como engranes que crean el movimiento al amplificar las contracciones musculares. Como parte de sus antecedentes, McHenry menciona que la geometría de un esqueleto es la que dicta la capacidad de mover extremidades a velocidades altas.

Para simplificar la explicación anterior, podemos modelar ciertas extremidades como si fueran un sistema de palanca, donde la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el "fulcro" o punto de apoyo de una palanca (que llamaremos  $D_1$ )

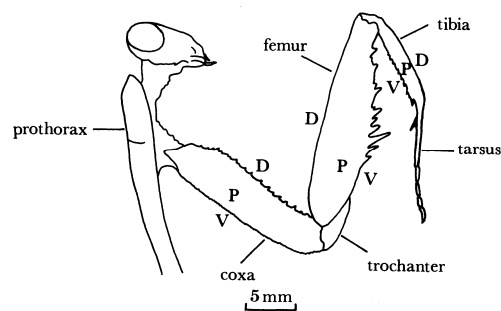
dividido entre la distancia entre el fulcro y la inserción del músculo ( que se llamará  $D_2$  ) nos da como resultado el "gearing" o desplazamiento de ventaja ( que será llamado  $D_A$  ). Esta relación por sencilla que parezca representa un aspecto importante ya que calcula el grado en que una contracción muscular será amplificada para desplazar un elemento esquelético. Esta forma de describir la relación de velocidad es abstracta, y no toma en cuenta muchas de las limitaciones que puede llegar a tener una extremidad, pero a pesar de esto ha resultado ser efectiva. En la Figura 11 podemos tomar en cuenta el análisis planteado por McHenry [5].

Un ejemplo claro de lo anterior es que si se supone que un músculo se contrae a una velocidad constante  $V_i$ , entonces la velocidad de salida del elemento a desplazar será el producto de  $V_i$  y  $D_A$ , por lo que es posible afirmar que la velocidad de salida obedece la siguiente función:  $V_f = V_i * D_A$ . Notando la relación anterior podemos afirmar que mientras más grande sea el factor  $D_A$  podremos manejar valores mayores de velocidad de salida, por lo que mayores valores de "gearing" nos proporcionan mayores velocidades de salida. Un ejemplo es la comparación entre el movimiento de un caballo contra el de un armadillo, donde notablemente existe una relación de "gearing" mayor en la del primero y por eso mismo llega a generar velocidades de salida más altas. En cuanto a la velocidad de contracción  $V_i$ , la relación entre el "gearing" y ésta no es definida, pero mayores valores de "gearing" representan tiempos mayores para contraer un músculo.

En la naturaleza existen muchos animales que poseen niveles de "gearing" elevados, y según McHenry muchos de estos presentan similitudes fundamentales, pero la más importante es que la Segunda Ley de Newton aplicada a rotaciones provee una ecuación que gobierna estos tipos de movimientos. En su trabajo, McHenry menciona que estudió tres sistemas con este principio: las patas de una langosta, la mandíbula de una rana y el apéndice raptorial del camarón mantis. Estos tres sistemas se encuentran impulsados por energía elástica almacenada para luego convertirse en energía cinética, haciendo una conversión tan eficiente que en el caso de la pata de una langosta se puede asumir que la energía se conserva, contrastando con los modelos para el camarón mantis y la rana. Esto último sucede ya que se pierde energía debido a la creación de fuerzas hidrodinámicas en el camarón mantis y a la disipación por



(a) Extremidad de una *M. religiosa*  
(autoría propia)



(b) Nomenclatura de las partes de la extremidad raptorial, obtenida de [7]

Figura 10: Configuración y ejemplo de extremidad raptorial

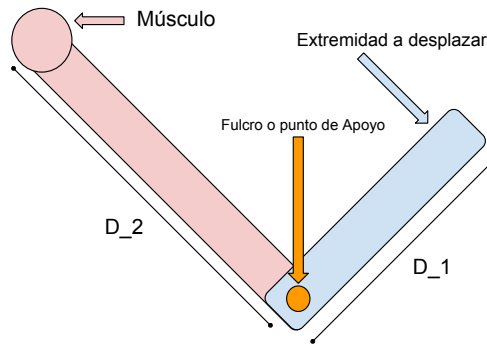


Figura 11: Idea simple para representar una extremidad como palanca (autoría propia)

viscosidad en el músculo de la mandíbula de la rana. [5]

La idea anterior nos da la pauta de que no es regla general que se pueda asumir que la energía se conserva en este tipo de movimientos, ya que se debe tomar en cuenta que la pérdida de energía puede influenciar la relación entre el "gearing" y la velocidad del elemento que se mueve. Por esta misma razón la conversión de la energía elástica a energía cinética debe tomarse como una función de la compresión instantánea de un resorte virtual y la tasa o velocidad angular de la extremidad, mientras que la eficiencia debe medirse como la razón entre la energía cinética máxima dentro de la energía elástica máxima.

En cuanto a una representación más fiel a las extremidades raptorales de una Mantis, podemos notar que en el estudio de McHenry el animal con la extremidad más parecida a este tipo es el camarón mantis. Acerca de este, McHenry hace la observación de que el apéndice raptorial de este espécimen posee una particular forma en "V", lo que ayuda a su análisis. Tomando en cuenta la cualidad anterior, el apéndice del camarón mantis puede modelarse como un esqueleto con forma de "V" con un resorte torsional entre los eslabones que forman el apéndice. Esto nos da la pauta de que la energía elástica se almacena solamente en este resorte virtual, y este elemento es el único encargado de convertir esta energía elástica en cinética. Tomando en cuenta lo anterior, podemos notar que la extremidad raptorial de una Mantis posee esta misma forma en V, y recalcando que la Mantis posee una velocidad impresionante en el movimiento de éstas extremidades podemos asumir que aplicar este mismo principio es válido en el sentido de que la velocidad de salida de la extremidad raptorial es proporcional a la velocidad con la que se "cargó" el movimiento, percatándonos también de que el ambiente en el que se encuentra la Mantis es menos hostil en relación al movimiento que el ambiente en que se encuentra un camarón mantis cuando está sumergido. Pero el fundamento de ese análisis es algo que McHenry presenta de manera sencilla en su trabajo: los mecanismos de desplazamiento estudiados pueden representarse como mecanismos de Cadena cerrada de 4 barras. Esto puede observarse en la Figura 12, obtenida de la publicación hecha por McHenry [5].

Todo lo anterior nos permite asumir que es posible desarrollar un modelo que tome

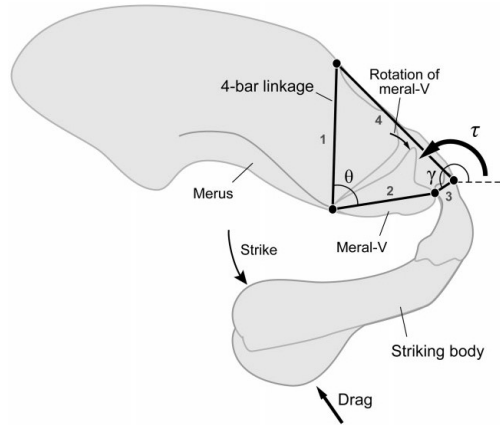


Figura 12: Representación de un mecanismo de 4 barras según McHenry [5] de un Camarón Mantis

en cuenta ciertos aspectos de la fisionomía de la Mantis para describir la velocidad, torque, aceleración, etc. que sufre cada una de las partes de la extremidad raptorial de la misma, notando así también que es posible encontrar una relación de "gearing" en estas extremidades. Como tal podemos afirmar las suposiciones anteriores, ya que de manera general, las Mantis tienden a llevar a cabo movimientos en milisegundos lo que nos indica que un punto de partida válido para el desarrollo de un manipulador es poder aproximar la forma en que la Mantis lleva a cabo la actividad de caza.

## 6.2. Musculatura de las extremidades raptorales

Según Gray[7], las extremidades raptorales de la Mantis están altamente adaptadas para la captura de presas al ser largas, masivas (en comparación con su cuerpo) y equipadas con espinas. Gray describe el movimiento de las extremidades raptorales como preciso y rápido, y depende de la contracción de los músculos flexores de la tibia de dicha extremidad. El estudio de Gray como tal se basa en que estas extremidades y el "golpe" que hacen es interesante desde perspectivas anatómicas, mecánicas y neurobiológicas, aunque se centra sobre todo en el propósito anatómico de dichas extremidades. Según la descripción de Gray de las extremidades raptorales, se basó en observar un espécimen de Mantis en una posición mas o menos horizontal, lo que se muestra en la Figura 10b. Como se puede observar, se mantiene una extremidad en posición de "V". Cabe destacar que el espécimen estudiado es la *Hierodula membranacea*, que comparte la mayoría de características físicas con la *M. religiosa*, por lo que podemos basarnos en el primero para describir la forma en que funcionan los músculos dentro de las articulaciones de dichos especímenes.

## Músculos en las extremidades raptoriales

La forma en que Gray[7] describe los músculos en la *H. membranacea* se basa en definir su origen, que lo define como el acoplamiento dorsal o proximal. Ya definido el origen Gray describe los siguientes pares de músculos utilizando como base la Figura 10b:

- **Musculatura protorácica:** La posición y acoplamiento de los músculos se describen como parecidos a los de la *M. religiosa*.
- **Junta coxa-protorácica:** Esta junta se puede evidenciar en los puntos P-C, y se encuentra conformada por seis grupos primarios funcionales, que funcionan como tres pares antagonistas y se pueden observar en la Figura 13. Estos pares se conocen como *Promotores*, *Remotores*, *Abductores*, *Aductores*, *Rotadores anteriores* y *rotadores posteriores*.
- **Junta coxa-trocánter:** En esta junta existen los pares de músculos conocidos como *Extensores*, los cuales son largas fibras paralelas y nuevamente aparecen como un par antagonista. Generalmente se considera que esta junta posee un único grado de libertad (para extensión o flexión). También podemos encontrar los músculos flexores, los cuáles son pequeños comparados con los extensores. Ambos tipos de músculos pueden apreciarse en la Figura 14.
- **Junta trocánter-fémur:** Existe un solo músculo que opera en esta junta, y se conoce como el músculo femoral reductor. Se encuentra compuesto por dos conjuntos de fibras, y no se presenta algún par antagonista de estas. La Figura 15 posee la vista interna de esta junta.
- **Junta fémur-tibia:** Posee músculos extensores y flexores. El extensor de la tibia se origina desde el fémur y se inserta en la tibia. En cuanto a los músculos flexores de la tibia, existen tres y estos son los que ocupan la mayor parte del volumen del fémur. La Figura 16 evidencia lo anterior.
- **Junta tibia-tarsus:** Existe un extensor y flexor tarsal pequeño que se originan en la tibia y se insertan en el tarsus. Por último se puede observar también que existen tres flexores pre-Tarsales. La Figura 17 muestra la configuración interna de estos músculos en esta junta y nos brinda una idea de cómo se encuentran configurados los músculos de esta junta, así como la configuración de los flexores pre-tarsales.

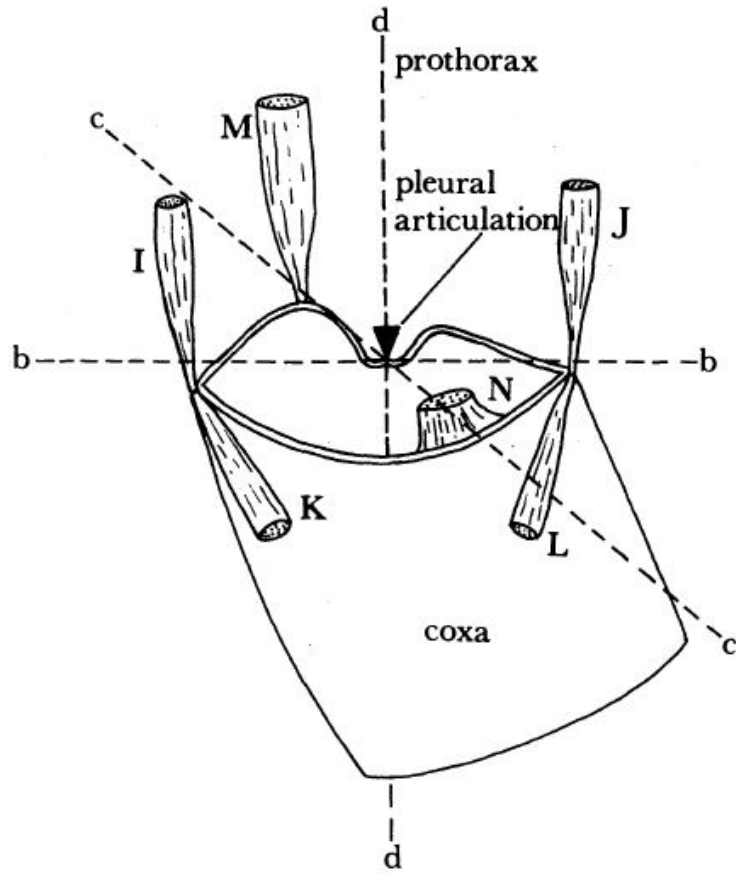


Figura 13: Vista interna de la junta coxa-protorácica

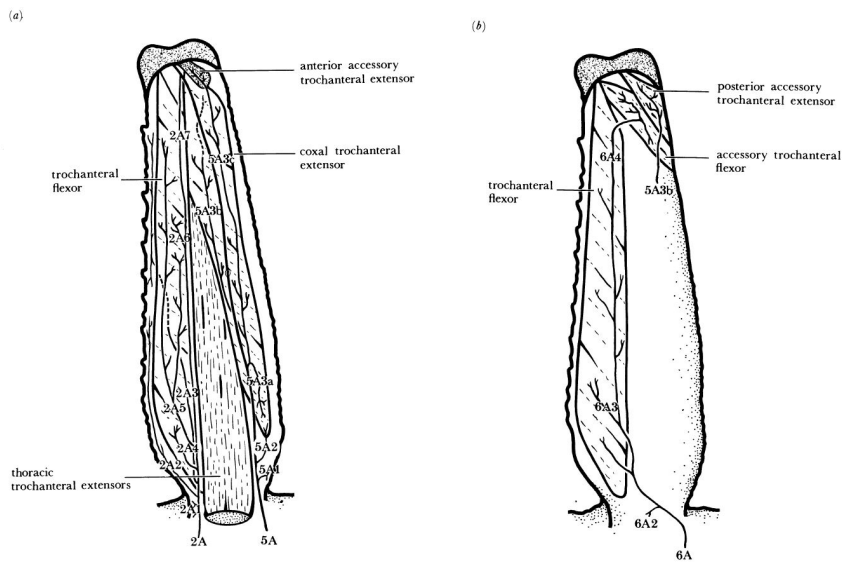


Figura 14: Vista interna de la junta coxa-trocánter

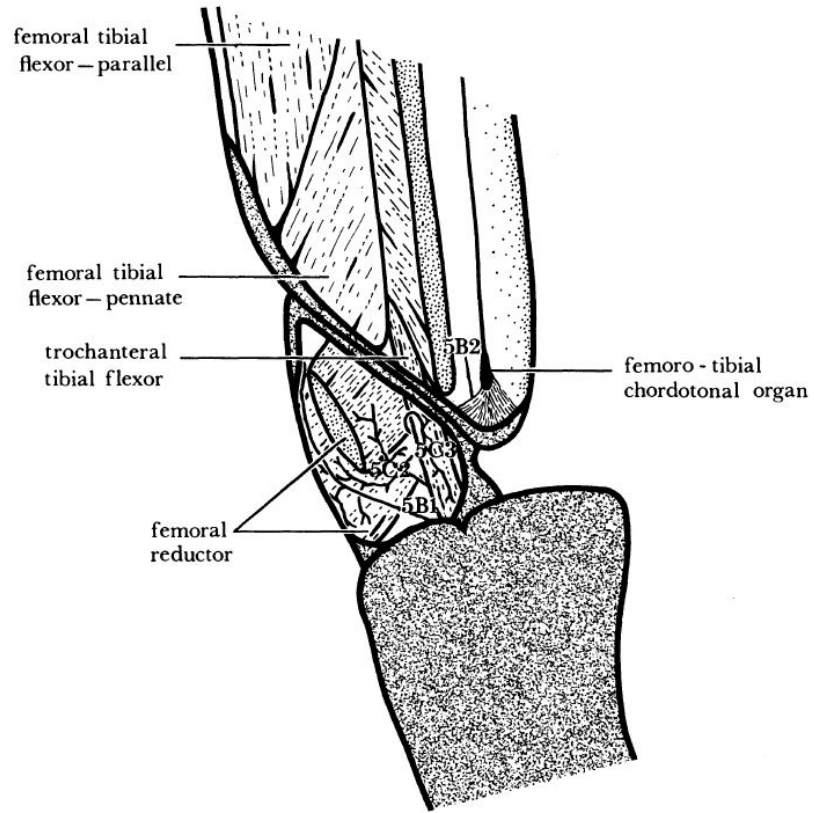


Figura 15: Vista interna de la junta trocánter-fémur

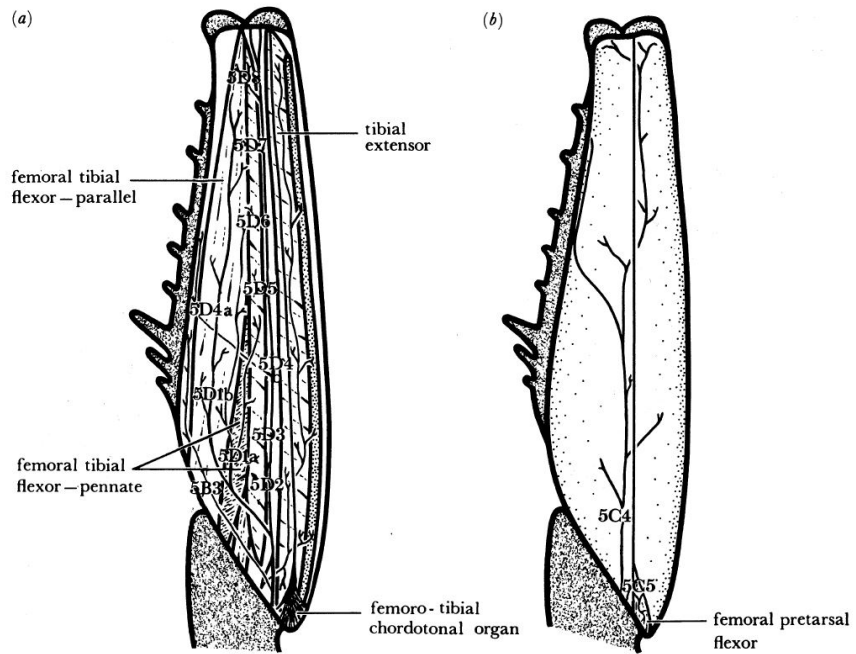


Figura 16: Vista interna de la junta fémur-tibia

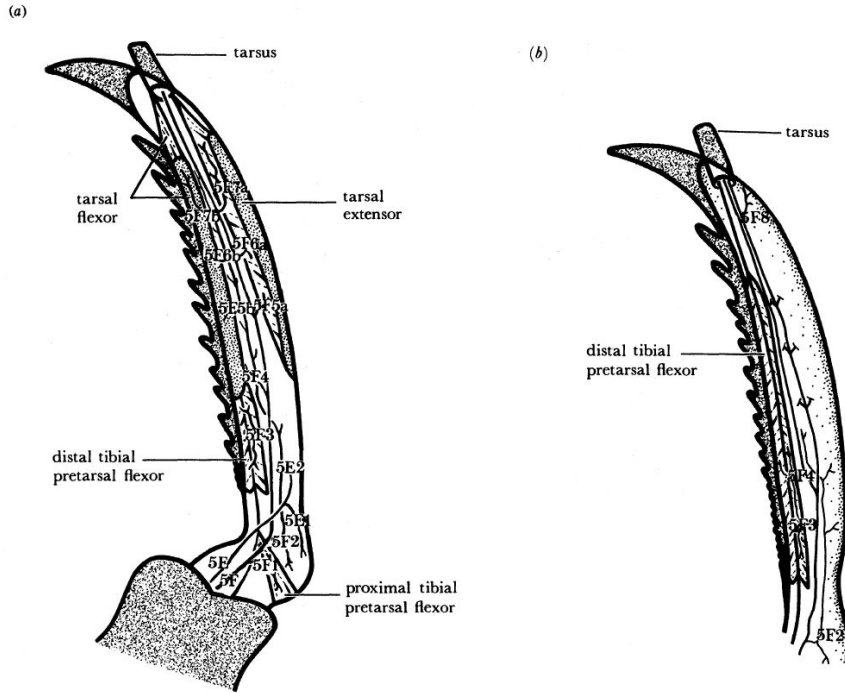


Figura 17: Vista interna de la junta tibia-tarsus

### 6.3. Definición y diseño de mecanismos

Según Norton[8], un mecanismo es un dispositivo que transforma el movimiento en un patrón deseable, de tal manera que se desarrollan fuerzas bajas y se transmita poca potencia. Norton menciona también a Hunt, ya que este define un mecanismo como un medio de transmisión, control o restricción del movimiento relativo. También se define lo que es una máquina, que de manera general es el conjunto de mecanismos que se encuentran diseñados para producir y transmitir fuerzas significativas. En cuanto a la clasificación de máquina o mecanismo, no existe una línea divisora clara, por lo que de manera de convenio se define que un mecanismo no llega a producir fuerzas o niveles de energía significativos, mientras que una máquina sí.

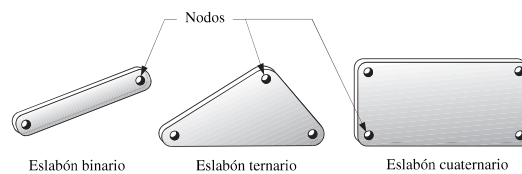


Figura 18: Ejemplos de eslabones, obtenidos de Norton[8]

Otra definición útil de mecanismo es que este es un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada. Ahora, debe definirse también que los eslabonamientos son todos aquellos bloques de construcción básicos que conforman un mecanismo, que a su vez están conformados por eslabones. Estos últimos se definen como cuerpos rígidos que poseen por lo menos dos nodos como puntos de unión con otros cuerpos rígidos o eslabones (Figura 18). Por último, se definen a las juntas como la conexión entre dos o más eslabones, por medio de sus nodos, la cual permite el movimiento o movimiento potencial entre los eslabones conectados.

#### 6.3.1. Proceso de diseño

El proceso de diseño a utilizar se encuentra definido en el libro de Norton[8], y menciona los siguientes puntos:

- **Identificación de la necesidad:** en términos sencillos, se debe saber qué situación se desea mejorar.
- **Investigación preliminar:** es la parte más importante del proceso, y en ella se identifican los parámetros y aspectos pertinentes del problema a solucionar.
- **Planteamiento de objetivo:** debe ser conciso y general; debe ser expresado en términos que se pueda visualizar su función.
- **Especificaciones de desempeño:** no deben confundirse con especificaciones de diseño, y se basan en definir lo que el sistema debe de hacer y no cómo.
- **Ideación e invención:** debe llevarse a cabo un proceso creativo para obtener

una posible solución al planteamiento; generalmente el proceso iterativo comienza aquí.

- **Análisis:** debe de estudiarse el desempeño de la posible solución por medio de técnicas complejas. Deben repetirse tantos pasos iniciales del proceso de diseño como sean necesarios.
- **Selección:** al tener diseños factibles, debe seleccionarse el mejor disponible.
- **Diseño detallado:** generalmente incluye planos y dibujos sobre cada elemento que conforme el diseño a probar. Deben especificarse todas las dimensiones y especificaciones de material necesarias.
- **Creación de prototipos y pruebas:** sirve para revisar la factibilidad del diseño y obtener resultados que puedan medirse acorde al objetivo y requerimientos de desempeño y diseño.
- **Producción:** el prototipo puede pasar finalmente a producirse de manera comercial; generalmente se lleva a cabo sobre la iteración final.

Tomando en cuenta los aspectos anteriores, es necesario mencionar que este proceso no es lineal, es decir, no se lleva a cabo del paso 1 al 10 directamente. Esto se debe a la existencia de iteraciones en el diseño y a la naturaleza del proceso de diseño. También debe mencionarse que siempre existe lugar para mejoras, por lo que no es extraño tener un diseño final, producirlo y luego mejorarlo.

## 6.4. Robótica

### 6.4.1. Cinemática directa de manipuladores

La cinemática directa de un manipulador se basa en el estudio de la geometría de su movimiento en función del tiempo, sin tomar en cuenta las fuerzas que intervienen o crean el movimiento. En palabras más sencillas, es el estudio de los aspectos geométricos y temporales del movimiento de un manipulador sin tomar en cuenta las causas de este. Es importante notar que los manipuladores que se estudian con esto se toman como si fueran una cadena de cuerpos rígidos que se interconectan por medio de juntas. Según Jazar[9], este método de descripción se encuentra restringido por ser una definición puramente geométrica del movimiento para obtener la posición, orientación y las derivadas de éstas en el tiempo del efector final del manipulador.

Debido a que las juntas y brazos de un sistema robótico están modelados como cuerpos rígidos, las propiedades del desplazamiento de estos toman importancia en robótica. Para esto mismo, se utilizan vectores y matrices para desarrollar un acercamiento sistemático y generalizado para describir los aspectos anteriores. Todo es posible solo si se define una referencia global, donde a su vez se tomarán en cuenta las relaciones relativas de los cuerpos rígidos entre sí para describir el movimiento estudiado.

Para definir estas relaciones entre eslabones o cuerpos rígidos, se hace uso de una matriz de transformación que comúnmente se define como  ${}^A T_B$  y que representa una transformación de coordenadas entre los marcos de referencia de cada junta desde un punto A hasta un punto B. Los problemas de cinemática directa se reducen a encontrar una matriz de transformación que relacione el marco de referencia local B de un eslabón con el marco de referencia global G. Esta matriz de transformación conlleva dentro de ella la información de orientación y traslación de un marco a otro, por lo que su configuración o dimensiones pueden variar al estudiarse casos en dos o tres dimensiones.

Es necesario mencionar también que para utilizar la cinemática directa deben utilizarse coordenadas homogéneas para representar vectores de posición y dirección en un espacio tridimensional o bidimensional. Esto se ejemplifica claramente cuando una matriz de rotación de 3x3 puede expandirse a una de 4x4 al incluir el vector de traslación y homogeneizar la transformación de la matriz al agregar una fila de 3 ceros y un 1.

Las matrices homogéneas que expresan las juntas relativas de un robot pueden basarse en un set especial de reglas que se conocen como "Matrices de Denavit-Hartenberg" [9]. La ventaja de utilizar esta técnica es que se posee un algoritmo universal para derivar la cinemática de un manipulador para obtener su ecuación cinemática.

Para ser más formales, una transformación de un marco local B a un marco global G se expresa por

$$r^G = {}^G R_B r^B + {}^G d_B$$

Donde  $r^B$  es el vector posición en B,  $r^G$  es el vector posición del mismo punto expresado en G y  $d$  es el vector posición del origen del marco B con respecto al origen global. Habiendo definido lo anterior, podemos mencionar también que existen dos tipos de problemas importantes en cuanto al análisis cinemático de un manipulador: los conocidos como *Forward kinematics* (o *cinemática directa*) y los problemas de *Inverse Kinematics* (*cinemática inversa*). El primer tipo de problema consiste en conocer los valores de los grados de libertad en cada junta y obtener así la posición en la que se encuentra el efector final, mientras que el segundo tipo consiste en tener la posición del efector final que se desea para obtener las configuraciones de los grados de libertad que hagan que el efector final se encuentre en esa posición. [9]

## Rotación y Traslación

Tomando en cuenta la Figura 19a, podemos definir las matrices de rotación en los distintos ejes de la siguiente manera:



Figura 19: Ejemplos de traslación y rotación, tomados de [9]

$$Q_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad Q_{x,\gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

Los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  representan el desplazamiento angular en los ejes  $Z$ ,  $Y$  y  $X$  respectivamente.

Ahora bien, para describir la traslación del efector final, es necesario interpretar lo que puede observarse en la Figura 19b de la siguiente manera: al trasladarnos del origen global al origen de un marco de referencia local, es necesario moverse ya sea en  $X$  y  $Y$  (o en  $Z$  también si se trabaja en 3 dimensiones) y esto puede representarse por medio de la suma de valores  $X_1$ ,  $Y_1$  o  $Z_1$  a partir de la coordenada de origen.

Por último, tomando en cuenta todos los aspectos anteriores, es posible describir la pose de un objeto (o del efector final), de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} {}^G R_B & \dots & X_t \\ \dots & \dots & Y_t \\ \dots & \dots & Z_t \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Donde el vector columna formado por  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $Z_t$  representa la traslación del efector, tomando en cuenta que  ${}^G R_B$  representa la orientación del efector respecto al origen. Finalmente, para el caso en 2D obtenemos

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & X_T \\ \sin \alpha & \cos \alpha & Y_T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde se observa que la orientación se encuentra definida respecto al eje  $Z$  (ya que solamente en este podemos tomar en cuenta la rotación, mientras que la traslación se define en el plano  $(X, Y)$ ).

Estas transformaciones son importantes, ya que puede tenerse un vector definido en un marco G y al conocer la transformación a un marco local B podemos obtener ese mismo punto en el espacio respecto a B al aplicar la transformación.

### Notación Denavit-Hartenberg

Para esta notación es necesario tomar en cuenta que un robot o manipulador de  $n$  juntas tendrá  $n + 1$  eslabones entre sus cuerpos rígidos. Este número de eslabones o *links* empiezan desde  $n = 0$  para representar el eslabón de tierra y se aumenta de manera secuencial hasta  $n$  de manera que se llegue al efector final. Ahora, la numeración de las juntas comienza desde  $i = 1$  al representar la junta que conecta el primer cuerpo rígido a la tierra o cuerpo rígido base. Con esta notación, el cuerpo rígido en  $i$  se conecta al cuerpo rígido anterior  $i - 1$  y al siguiente cuerpo rígido  $i + 1$  por medio de la junta  $i + 1$ . Esto puede ejemplificarse mejor en la Figura 20 obtenida del trabajo de Jazar [9].

Entonces, basados en este algoritmo es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El eje  $z_i$  se encuentra alineado con el eje de la junta  $i + 1$
- El eje  $x_i$  está definido a lo largo de la línea conocida como *común normal* entre los ejes  $z_{i-1}$  y  $z_i$ , apuntando del primer eje mencionado al segundo
- El eje  $y_i$  está determinado por la regla de la mano derecha, por lo que obtenemos que  $y_i = z_i \times x_i$

Al aplicar este algoritmo, se puede crear un cuadro tomando en cuenta 4 parámetros:  $a_i, \alpha_i, \theta_i$  y  $d_i$ . Estos parámetros se definen en las Figuras 21a y 21b al haber definido el origen de nuestro manipulador según Jazar.[9]

Donde los términos que se muestran en las Figuras 21a y 21b corresponden a las siguientes definiciones:

- **Distancia del eslabón  $a_i$ :** es la distancia entre el eje  $z_{i-1}$  y  $z_i$

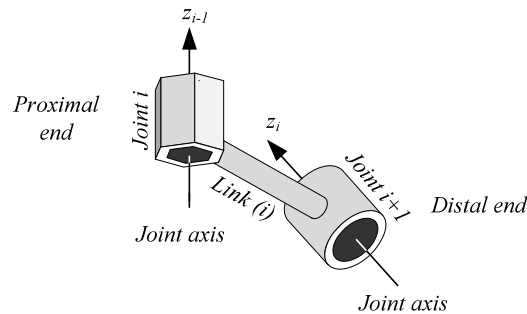


Figura 20: Idea general de la Notación Denavit-Hartenberg

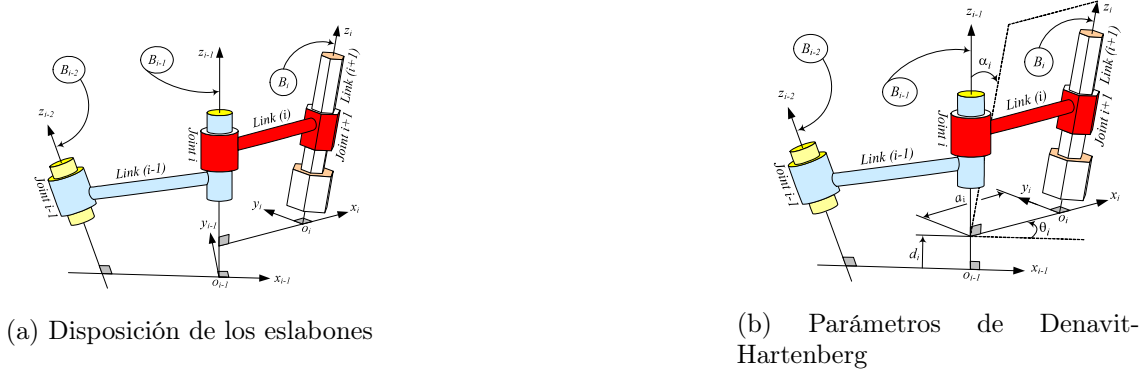


Figura 21: Parámetros de Denavit-Hartenberg y disposición de eslabones

No. de Junta	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$a_1$	$\alpha_1$	$d_1$	$\theta_1$
2	$a_2$	$\alpha_2$	$d_2$	$\theta_2$
...	...	...	...	...
n	$a_n$	$\alpha_n$	$d_n$	$\theta_n$

Cuadro 1: Ejemplo de tabla para parámetros de DH

- **Rotación del eslabón**  $\alpha_i$  : es la rotación requerida del eje  $z_{i-1}$  en el eje  $x_i$  para ser paralelo con el eje  $z_i$
- **Distancia a la junta**  $d_i$  : es la distancia entre el eje  $x_i$  y el  $x_{i-1}$  a lo largo del eje  $z_{i-1}$
- **Ángulo de la junta**  $\theta_i$  : es la rotación requerida del eje  $x_{i-1}$  sobre el eje  $z_{i-1}$  para volverse paralelo al eje  $x_i$

Tomando en cuenta lo anterior, podemos notar que el cuadro a formar con dichos parámetros nos indicará la configuración de un eslabón en relación al eslabón anterior. Por esto mismo, el cuadro de DH (Denavit-Hartenberg) debe quedar parecido al Cuadro 1.

Al implementar el Cuadro 1, podemos definir la matriz de transformación de una junta a otra como

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \mathbf{A}_i = \mathbf{R}_z(\theta_i)\mathbf{T}_z(d)\mathbf{T}_x(a)\mathbf{R}_x(\alpha)$$

Donde la matriz  $R_z$  representa la rotación sobre el eje Z,  $T_z$  un desplazamiento en Z,  $T_x$  un desplazamiento en X y  $R_x$  una rotación sobre el eje X.

#### 6.4.2. Cinemática diferencial

Para poder estudiar el movimiento de manipuladores, es necesario notar que se debe de tomar en cuenta los movimientos infinitesimales o diferenciales del efector

final, que es justamente lo que se considera en la Cinemática Diferencial. Esto nos interesa debido a que al saber cómo se mueve un cuerpo rígido (que forme parte de la cadena de cuerpos rígidos que componen al mecanismo), podemos derivar las relaciones de velocidad entre las distintas partes que lo componen según Niku [10]

Por definición, un movimiento diferencial es un movimiento pequeño, por lo que al medirlo o calcularlo para un diferencial de tiempo pequeño podemos obtener una relación de velocidades (siempre basados en la literatura de Niku [10]). Generalmente, para obtener estas relaciones se utiliza lo que se denota como una velocidad relativa. Esto lo podemos representar de la siguiente forma

$$v_B = v_A + v_{B/A}$$

Donde  $v_B$  es la velocidad de un eslabón B,  $v_A$  es la velocidad de un eslabón A y  $v_{B/A}$  es la velocidad del eslabón B visto desde A. También es necesario mencionar que esta relación puede describirse también en forma matricial, lo que destaca la relación entre este tipo de análisis con el análisis mencionado en la sección anterior, específicamente con un elemento conocido como Jacobiano ( $J$ ).

Basándonos en la teoría de Niku [10], el Jacobiano es una representación de la geometría de los elementos de un mecanismo en el tiempo. Este nos permite la conversión de movimientos o velocidades diferenciales de juntas individuales a velocidades o movimientos de puntos específicos que nos interesan dentro de nuestro mecanismo. Debido a que el Jacobiano está relacionado con el tiempo, su valor tiende a cambiar con el paso de este.

Para comprender de mejor manera el concepto de Jacobiano, es posible tomar un ejemplo de Niku[10]:

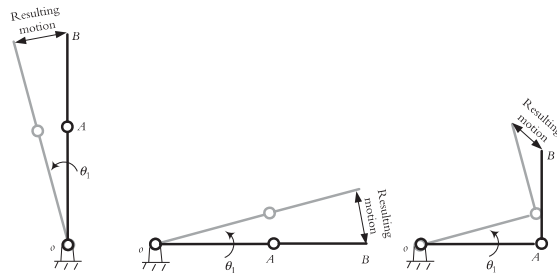


Figura 22: Representación de tres movimientos de un mecanismo de 2 GDL

En la Figura 22, podemos notar que media vez el primer eslabón tenga un movimiento angular  $\theta$  la magnitud y dirección del efector final será distinta en todos los casos (media vez no exista un sistema de control o parecido que obligue a que esto no sea así). Esta dependencia del movimiento resultante puede estudiarse por medio del Jacobiano para saber cómo es que éste afecta a la geometría. Teniendo presente esto, podemos definir al Jacobiano como una representación de la geometría y su relación con las distintas partes que conforman a un manipulador en el tiempo [10]. Con lo

anterior, podemos afirmar que media vez se presentan cambios en la configuración del mecanismo, el Jacobiano cambiará también.

La forma de calcular el Jacobiano se basa en tomar en cuenta los grados de libertad o parámetros de los que depende el movimiento del manipulador, por lo que la definición de este se basa en derivar todas las ecuaciones de posición de los eslabones con respecto a todos estos parámetros. Esto puede observarse a continuación.

Suponiendo que se tenga una serie de ecuaciones  $y_i$  en función de un set de variables  $x_j$  obtenemos  $y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_j)$ , por lo que obtenemos un set de derivadas de la siguiente manera

$$\begin{cases} \delta y_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \delta x_j \\ \dots \\ \delta y_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \delta x_j \end{cases}$$

Y escribiendo esto en forma matricial tenemos

$$\begin{bmatrix} \delta y_1 \\ \dots \\ \delta y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \dots \\ \delta x_j \end{bmatrix}$$

O de una forma más simple como

$$\delta y_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \delta x_j$$

Utilizando lo descrito anteriormente, podemos describir la siguiente relación

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \text{Jacobiano} * \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ d\theta_4 \\ d\theta_5 \\ d\theta_6 \end{bmatrix}$$

O de forma simplificada como

$$D = JD_\theta$$

Donde  $dx, dy$  y  $dz$  representan los movimientos diferenciales a lo largo de los ejes X, Y y Z;  $\delta x, \delta y$  y  $\delta z$  las rotaciones diferenciales en sus respectivos ejes y  $D_\theta$  representa los cambios diferenciales de las juntas. Es necesario tomar en cuenta que si estas matrices se dividen dentro de un diferencial de tiempo  $dt$ , estas matrices representarán velocidades en lugar de movimientos diferenciales.

### 6.4.3. Estática en manipuladores

Los manipuladores pueden estar tanto bajo control de posición o control de fuerzas. Para el primer caso, el robot generalmente debe de seguir ciertas posiciones pre-establecidas, como cortar una plancha en un patrón característico o forma pre-determinada. Tomando el mismo ejemplo de Niku [10] de cortar una plancha en este mismo patrón característico, notando ahora que la plancha no es uniforme en su superficie, es posible encontrar que en algunas de las partes el robot o manipulador no será capaz de cortar completamente la plancha o éste cortará de más, dañando la superficie inferior a la plancha.

Es en este caso donde debemos de tomar en cuenta el control de fuerzas, ya que si se detecta que el robot no está ejerciendo la fuerza necesaria o ejerce fuerza de más durante el corte, será posible corregir esto. Para tomar en cuenta esta noción, debemos de definir una relación entre las fuerzas y torques ejercidos por las juntas y las fuerzas y momentos generados en el efector final del manipulador. Por lo tanto, al conocer estas relaciones sería posible rotar las juntas a tasas específicas para crear las fuerzas y momentos necesarios en el efector final, por lo que el análisis que se presenta a continuación es en relación al efector final. Es por esto que se utilizará la notación  $EF$  en las matrices donde se requiera. [10]

Para definir esta relación, tenemos que comenzar por observar un vector de fuerzas de la siguiente manera

$${}^{EF}F = [f_x \quad f_y \quad f_z \quad m_x \quad m_y \quad m_z]^T$$

Donde los componentes  $f_x, f_y$  y  $f_z$  son las fuerzas ejercidas por el efector final en los ejes  $x, y$  y  $z$ , y los componentes  $m_x, m_y$  y  $m_z$  son los momentos alrededor de estos mismos ejes. Similarmente, ahora definimos las traslaciones y rotaciones del efector final con la siguiente relación

$${}^{EF}D = [dx \quad dy \quad dz \quad \delta x \quad \delta y \quad \delta z]^T$$

Y tomando como base las definiciones anteriores, podemos definir los torques en las juntas como

$$T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]^T$$

Las cuales son los torques (para juntas revolutas) y fuerzas (juntas prismáticas) en cada junta. Nótese que estos torques no están acorde al marco de referencia del efector final, ya que representan las juntas en general del mecanismo.

Y por último, definimos la siguiente entidad

$$D_\theta = [d\theta_1 \quad d\theta_2 \quad d\theta_3 \quad d\theta_4 \quad d\theta_5 \quad d\theta_6]^T$$

Que describe los movimientos diferenciales en las juntas, en cualquier ángulo para revoluta o a cualquier desplazamiento lineal para juntas prismáticas.

Teniendo definidos los aspectos anteriores, es posible utilizar el Método del Trabajo Virtual planteado en las referencias de Niku [10], el cual nos indica que el trabajo total virtual en las juntas es equivalente al trabajo virtual total en el marco del efector final. Esto nos da que

$$\delta W = ({}^{EF}F)^T ({}^{EF}D) = (T)^T (D_\theta)$$

O, en otras palabras, las fuerzas y momentos multiplicados por los desplazamientos en el marco del efector final EF son iguales a los torques o fuerzas multiplicados por los desplazamientos en las juntas. Ahora, es necesario definir la relación directa entre los torques y fuerzas y momentos en el efector final, la cual se define con ayuda del Jacobiano. Es necesario recordar la relación  $D = JD_\theta$ , ya que la podemos reescribir basados en el marco de referencia del efector final como

$${}^{EF}D = ({}^{EF}J)D_\theta$$

para luego substituir de forma que tengamos la siguiente relación

$$({}^{EF}F)^T ({}^{EF}J)(D_\theta) = T^T (D_\theta) \implies ({}^{EF}F)^T ({}^{EF}J) = T^T$$

Para finalmente obtener la relación

$$T = ({}^{EF}J)({}^{EF}F)$$

La cual implica que las fuerzas y momentos en las juntas pueden determinarse en base al grupo de fuerzas y momentos del efector final. Debido a que el Jacobiano se conoce por medio de un análisis previo para movimientos diferenciales, el controlador de un manipulador formal debería ser capaz de calcular las fuerzas y momentos en las juntas. Esto permite que la fuerza de cada junta pueda ser controlada al estarla monitoreando o calculando constantemente.

Es necesario notar que este tipo de control puede llevarse a cabo por medio de sensores también, por lo que existen manipuladores que son capaces de percatarse del objeto que están moviendo para relegar esta información al controlador del mismo.

#### 6.4.4. Robótica bio-inspirada

Según Liu[11], la robótica bio-inspirada es un tema interdisciplinario entre la robótica y biología. También indica que se encuentran relacionadas dos grandes áreas técnicas, de las cuales la primera se encarga de encontrar una aplicación a ideas biológicas, mientras que la segunda lidia con la premisa de cómo aplicar tecnología de robótica para entender de mejor manera los sistemas biológicos, así como simular estos.

Las dos áreas mencionadas anteriormente se conocen normalmente como Biomimética y modelado o análisis bio-robótico. Ambas áreas cubren casi todos los temas técnicos de la robótica, incluyendo el diseño inspirado en la biología, control de movimiento, sensores y accionamiento de sistemas robóticos. Un ejemplo claro de esto puede ser un robot humanoide, como el que se muestra en la Figura 23 tomada de Liu [11].



Figura 23: Robot humanoide HRP-2, desarrollado en Japón

## Diseño bio-inspirado

Uno de los mayores problemas de esta disciplina es que los mecanismos para robots buscan imitar el movimiento de animales y otras criaturas vivas. Dichos mecanismos varían entre animales aunque tengan la misma función, como por ejemplo la forma en que los humanos y perros caminan. Se considera que el verdadero reto en este aspecto es como realizar un movimiento biológico por medio de un mecanismo, ya que el movimiento biológico es llevado a cabo por el conjunto de músculos, esqueletos, juntas y tejidos en un cuerpo deformable (en la mayoría de casos). Lo anterior es un reto debido a que actualmente no se conoce actuador alguno que sea igual de suave que un músculo o tejido, o alguna junta que genere un movimiento complicado y suave como las juntas de un humano o animal. Por esto mismo, en la robótica bio-inspirada es crucial generar o crear mecanismos simples que generen este tipo de movimientos.

Dándole importancia a los aspectos anteriores, es fácil pensar que este tipo de diseño depende de gran manera de los sensores y actuadores a utilizar. El desarrollo de actuadores que funcionen de manera similar a los músculos es un aspecto que hace años ha sido una de las metas de la robótica, ya que los músculos generan fuerza al contraerse las fibras de estos. Ahora, tomando en cuenta los sensores que pueden utilizarse en este tipo de diseños, muchas de las investigaciones para estos sensores radican en la Visión por Computadora y en el desarrollo de sensores táctiles. Para esto podemos encontrar dos grandes aspectos para el desarrollo de los mismos:

- Diseño de sensores basados en sensores biológicos como la piel, ojos, oídos, etc.
- Detección de estímulos biológicos para aplicaciones de robótica

Para Liu[11], la robótica bio-inspirada es un área reciente y de crecimiento rápido, ya que incluye áreas de la ingeniería electrónica y mecánica, así como incluye tópicos como diseño robótico, de sensores y actuadores. Pero también se recalca que esto no serviría de algo sin un sistema de control, por lo que se toma en cuenta la teoría de sistemas de control. Ejemplos de teoría de control aplicada a la robótica bio-inspirada pueden encontrarse en "algoritmos genéticos" y en robótica de "Enjambre" (*Swarm robotics*) entre otros.

## 6.5. Estadística: análisis de la varianza

El análisis de la varianza fue desarrollado por el estadístico y biólogo Ronald Fisher. Dicho estudio consta de distintos modelos estadísticos que, en su forma más simple, son un procedimiento general para aislar las fuentes de variabilidad en un conjunto de muestras. El propósito de estos modelos es determinar hasta dónde o cómo afecta el valor de una variable independiente los resultados, para poder inferir sobre una población por medio del uso de un Intervalo de Confianza y bajo ciertos requisitos de la muestra según Girden [12].

De manera simple, el análisis de la varianza se conoce como ANOVA (de Analysis of Variance, en inglés). Generalmente, la técnica de ANOVA se basa en comparar 3 o más grupos con una sola variable. En el caso más general, la hipótesis nula que maneja esta técnica se basa en que todas las medias de los distintos grupos son iguales, teniendo como hipótesis alternativa que al menos una de éstas es distinta al resto. Esto se traduce de la siguiente manera:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

$$H_1 : \mu_j \neq \mu_i$$

Donde  $H_0$  se conoce como hipótesis nula y  $H_1$  como la hipótesis alternativa;  $\mu_i$  y  $\mu_j$  son distintos y corresponden a cualesquiera grupos de la muestra.

La ventaja de esta técnica es que muchas veces es difícil tener la misma cantidad de muestras por grupo, algo que resulta trivial para la comparación por medio de ANOVA ya que compara las varianzas por medio de la distribución F (que compara las varianzas entre las muestras con la varianza **dentro** de las muestras). Dicha distribución comprueba si dos varianzas son iguales, aunque se puede decir también que la prueba ANOVA es una generalización de la técnica conocida como "T de Student".

Ahora, los requisitos para poder aplicar este tipo de análisis son los siguientes:

- Todas las poblaciones involucradas deben de tener una distribución normal (aunque esto suele ignorarse si se tiene una cantidad de muestras mayor a 20 por grupo, ya que se toman como que estas medias muestrales son aproximadamente normales)
- Todas las poblaciones tienen la misma varianza, media vez los tamaños de las muestras sean muy dispares
- Las muestras son aleatorias simples e independientes unas de otras

Para darle validez a este estudio, es necesario tomar en cuenta el nivel de significación estadística  $\alpha$ . Este valor nos permite determinar si nuestro estudio posee un resultado estadísticamente significativo. Mientras menor sea este valor en nuestro

estudio, podemos concluir que dichos resultados no son debidos al azar, lo que le da importancia al mismo.

Luego de fijar un intervalo de confianza adecuado mediante nuestro valor  $\alpha$ , es posible llevar a cabo el análisis por medio de esta prueba y comparar el valor  $p$  obtenido con el valor de  $\alpha$ . Para interpretar dichos valores, se puede llegar a las siguientes conclusiones luego de aplicar la técnica ANOVA: si el valor  $p$  es mayor que el de  $\alpha$ , no es posible rechazar la hipótesis nula por lo que no podríamos concluir sobre nuestro experimento, pero si  $\alpha$  llega a ser mayor o igual a  $p$  es posible rechazar la hipótesis nula, por lo que quedaría demostrado que como mínimo una de las medias es distinta a las demás. Esto, en su expresión más simple, significa que la variable estudiada por medio de esta técnica influye en la probabilidad del resultado. Ahora, tomando en cuenta el valor F de la prueba, puede concluirse que entre más grande sea este, es menos probable que las medias de las muestras sean iguales.

Por último, existen pruebas ANOVA para dos o tres variables, por lo que esta es una técnica de estadística inferencial importante, y es posible utilizar herramientas como Excel para obtener dichos factores e índices para concluir sobre nuestras muestras.

La metodología utilizada en esta investigación se considera modular debido a que cada objetivo específico posee su propia metodología para llevarse a cabo. En cada apartado se hará distinción de la metodología implementada por objetivo.

### 7.1. Diseño y caracterización

Se llevó a cabo la recopilación de información para tener la idea general de cómo la *M. religiosa* mueve sus extremidades raptoriales para poder cazar a sus presas. Seguido de esto, se llevó a cabo la recopilación de información para seleccionar los elementos necesarios para almacenar energía y liberarla de manera rápida para el accionamiento del mecanismo a desarrollar. Para este aspecto se llevó a cabo la selección de los resortes torsionales para recrear el movimiento de la Mantis.

Luego de haber recopilado la información, se procedió a la etapa de diseño del mecanismo a implementar. Se llevó a cabo una simulación inicial por medio de Simscape en MATLAB para validar el movimiento del mecanismo y se procedió al corte láser en MDF para poder probar las distintas ideas para crear el mecanismo. Seguido de esto se implementó un estudio y una documentación comparativa por medio del software de análisis de vídeo Kinovea. Esta metodología se realizó para cada una de las iteraciones que el mecanismo requirió, con constantes cambios para el mejoramiento del mismo. Para la última iteración se describió al prototipo por medio de su cinemática directa, para lograr una simulación en MATLAB sobre las trayectorias que cada junta recorre al momento de accionarlo, así como se utilizaron las constantes de los resortes torsionales obtenidas en el laboratorio de Física de la Universidad del Valle

de Guatemala. Para las regresiones obtenidas, puede referirse al Anexo 16.5.

## 7.2. Comparación del porcentaje de éxito

Para cumplir con este objetivo se llevó a cabo una recopilación sobre el porcentaje de éxito que posee una *M. religiosa* al momento de atrapar a sus presas. Para llevar a cabo la comparación, se hicieron tres pruebas, siendo una de estas a nivel muestral mientras que en las otras dos se buscó llegar a conclusión inferencial. En dichas pruebas se intentó hacer que el mecanismo atrapara dos distintas geometrías para calcular la tasa de éxito basado en los intentos en los cuales el objeto fue atrapado satisfactoriamente. También se hizo un análisis de la varianza para concluir si es estadísticamente correcto afirmar que la posición del objeto afecta a la probabilidad de que el prototipo lo atrape.

Para la producción de las dos distintas geometrías se hará uso de una impresora 3D.

## 7.3. Plataforma de pruebas

Para el cumplimiento de este objetivo se obtuvo la iteración final del mecanismo a implementar. Seguido de esto se diseñó la plataforma de pruebas para obtener el área de funcionamiento del mecanismo con un accionamiento correcto del mismo. Se evaluaron distintas opciones sobre actuadores a utilizar, así como la definición del mecanismo de activación del mecanismo. También se definió el control necesario para manipular de manera correcta el dispositivo implementado.

Esta metodología se llevó a cabo al utilizar una cortadora láser para la fabricación de la plataforma de pruebas, así como su armado y la realización de pruebas para definir si el funcionamiento del mecanismo resultó ser satisfactorio o no.

Como puede observarse de la sección 6.1 a la 6.2 del Marco Teórico (capítulo 6), la *Mantis* presenta características que la hacen especial para llevar a cabo la tarea de caza. Estas características son esenciales en el sentido de poder llevar a cabo un mecanismo bio-inspirado, por lo que es conveniente enumerarlas de la siguiente forma:

1. La *M. religiosa* posee un tiempo promedio de ataque de  $30ms$
2. Posee una tasa de éxito del 85 %
3. Su extremidad raptorial en forma de "V" es capaz de transformar energía elástica en cinética de forma rápida
4. El hecho de que su extremidad raptorial se clasifique como de Sub-Chela le da la libertad de poder atrapar a sus presas y mantenerlas captivas (ver Figura 24 como referencia)
5. Una característica importante de las patas de la Mantis es que éstas son grandes en comparación con su cuerpo.
6. Existe un área específica donde la Mantis es capaz de capturar a su presa sin importar en qué parte del área se encuentre ésta última, pero fuera de ésta es improbable que lo logre, basados en la investigación de Correte. [13]

Tomando en cuenta las características anteriores, es válido basarse en la forma y en el modelo planteado (ver Figura 11) que describe las extremidades raptorias de caza de la Mantis como una palanca. Estrictamente hablando, la bio-inspiración de este prototipo busca recrear el movimiento de dichas extremidades, para luego poder encontrar aplicación alguna que se vea beneficiada con el movimiento recreado, siendo de preferencia esta atrapar objetos. Un punto de partida válido es recrear el

movimiento por medio de un mecanismo de 3 o 4 barras de Cadena cerrada, de tal forma que las restricciones impuestas sobre el mismo logren imitar el movimiento de la Mantis, como lo explica McHenry[5] en su investigación.

## 8.1. Simulaciones y diseño iterativo

Debido a que la *M. religiosa* presenta movimientos precisos y eficaces, es propio asumir que de alguna manera al basarse en la anatomía de la misma se pueda llevar a cabo un mecanismo capaz de copiar esos movimientos y emplearlos en una aplicación de manipulación. Para el diseño de este mecanismo se decidió llevar a cabo simulaciones por medio de Simulink de MATLAB, ya que presenta un módulo conocido como Simscape que es capaz de simular movimientos y reacciones de mecanismos por medio de eslabones. Este software permite tomar en cuenta los posibles escenarios a enfrentarse durante el desarrollo del prototipo de manipulador. El concepto general proviene de la observación hecha por Bryan Corrette[13] en su investigación titulada como "Prey Capture in the Praying Mantis [...]". De dicha investigación podemos mostrar la Figura 24.

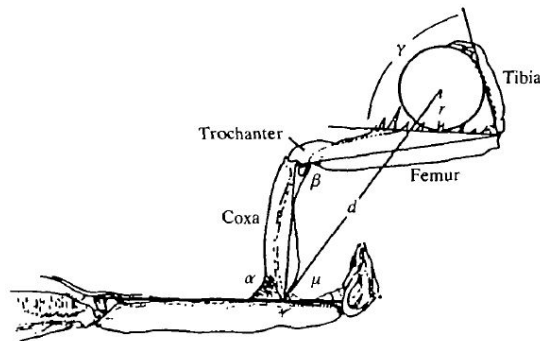


Figura 24: Mecanismo raptorial de la *M. religiosa*, obtenido de Correte [13]

Nuevamente podemos notar que, a pesar de que el espécimen de Mantis estudiado es distinto, se mantienen las mismas indicaciones especificadas en la Figura 10a en cuanto a las partes indicadas de la extremidad raptorial. En la misma investigación, Corrette [13] menciona que la Mantis investigada conlleva los mismos factores que los mencionados anteriormente en el Marco Teórico ( Capítulo 6 ), pero agrega que además para que ésta sea exitosa la presa debe estar adentro de una zona de ataque. Dicha zona reside justo frente al prototórax (para referencia, se puede observar la Figura 10b), y como tal la Figura 24 nos brinda ya de por sí un sistema de coordenadas para poder utilizar cuando se obtengan los resultados del mecanismo.

Asimismo, es necesario mostrar una referencia sobre el movimiento a reproducir. Para esto mismo puede citarse a Maldonado [14] por la obtención de la Figura 25. En esta figura es posible observar de manera cualitativa el movimiento que realiza la *M. religiosa* al momento de cazar a su presa, y esto fue documentado por medio de una cámara con capacidad de capturar 240 cuadros por segundo.

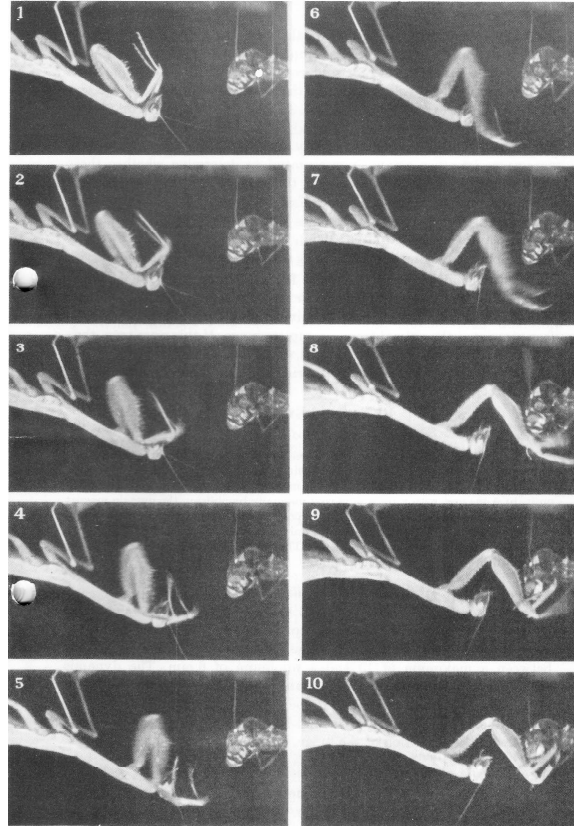


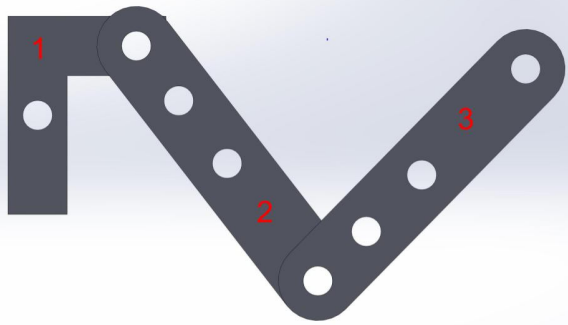
Figura 25: Secuencia del movimiento de caza de la *Mantis religiosa* por Maldonado[14]

### 8.1.1. Simulación con Simscape y primeras 2 iteraciones

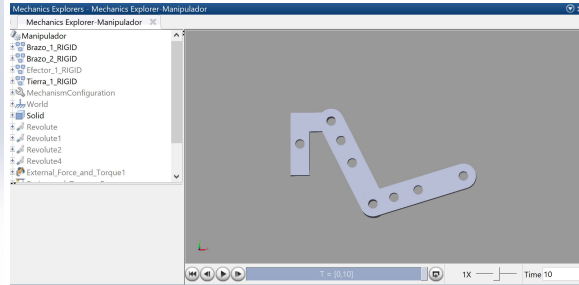
Para llevar a cabo las simulaciones se hizo uso del software MATLAB y su extensión Simulink. A su vez, se instaló el módulo de Simscape para llevar a cabo simulaciones físicas con eslabones. El desarrollo de los eslabones se llevó a cabo en el software SolidWorks 2013 (aunque posteriormente se hizo uso de Autodesk Inventor 2019), así como su posterior ensamblaje en el mismo para poder exportarlo hacia Simscape. El primer diseño del mecanismo puede apreciarse en la Figura 26b. En dicha figura se puede apreciar que los eslabones están marcados como *1, 2 y 3*, siendo estos la tierra, Coxa y fémur respectivamente para simular el movimiento natural de la Mantis.

Para llegar a obtener la simulación de la Figura 26b se hizo uso de la nomenclatura presentada en la Figura 26a de la misma manera, y por medio del diagrama de bloques fue posible agregar resortes virtuales entre el eslabón 3 y 2, y entre los eslabones 1 y 2 para comprobar el funcionamiento de la simulación.

Otra opción que Simscape ofreció en el entorno fue el de poder visualizar la forma en que se comportaba el mecanismo sujeto a distintos estímulos: cambiando las constantes de fuerza de cada resorte se podían apreciar cambios en la velocidad, posición y aceleración en las juntas e incluso ofrece la opción de cambiar la constante



(a) Mecanismo en SolidWorks

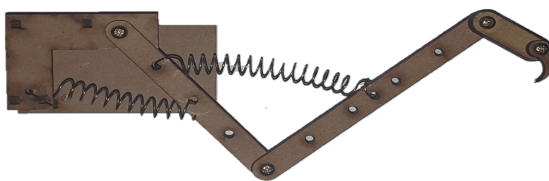


(b) Mecanismo en Simscape

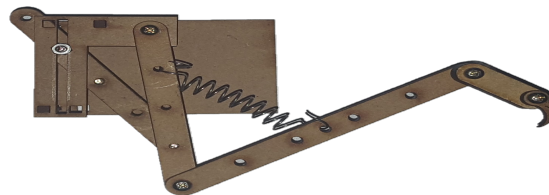
Figura 26: Representaciones del mecanismo en SolidWorks y Simscape

de gravedad para simulaciones donde no nos interesa el efecto de esta última.

Con los resultados obtenidos en esta simulación se decidió llevar a cabo dos iteraciones del mismo mecanismo con una ligera modificación entre uno y otro: para el primer mecanismo (Figura 27a) se decidió utilizar dos resortes, mientras que para el segundo mecanismo a implementar (Figura 27b) se utilizó un único resorte y una junta prismática para controlar el rango en que el prototipo de manipulador podía llegar.



(a) Diseño 1



(b) Diseño 2

Figura 27: Diseños propuestos para las primeras pruebas del manipulador

### 8.1.2. Diseños 3 y 4

Para las iteraciones 3 y 4 del mecanismo, fue necesario tomar en cuenta sobre cual de los primeros dos diseños se iteraría, y se decidió iterar sobre el diseño 2 (Figura 27b). La selección del diseño se debió a las trayectorias obtenidas para ambas inercias utilizadas (Figura 38), ya que se presentaron menos variaciones en las mismas (Figuras 39 y 40).



Figura 28: Diseños 3 y 4

Dichos diseños presentaron el cambio de que ahora se implementó el resorte torsional en la unión entre los eslabones que simulan ser el fémur y Coxa de las extremidades raptorales. Otro cambio significativo fue la inclusión de un tope mecánico para asegurar que el último eslabón (que simula ser la tibia) se mantenga siempre en una posición que asegure que cuando el resorte torsional imponga su restricción, la misma inercia del eslabón haga que este cierre sobre el eslabón que reemplaza al fémur de la extremidad raptorial. Esas características se pueden evidenciar en la Figura 28a.

El diseño 4 como tal contiene las características del diseño 3, pero se llevó un paso más allá la bio-inspiración para tratar de obtener como resultado que la tibia del mecanismo quedara atrapada sobre el fémur del mismo, lo cual fue descartado posteriormente en otros diseños.

### 8.1.3. Diseños 5 y 6

Tomando en cuenta las características y resultados de los diseños 3 y 4, se tomó la decisión de incluir dentro del diseño 4 una nueva iteración. En esta iteración se haría uso de 5 "Poleas" sobre las cuales se pretende que se mantenga un hilo que sea capaz de preparar la tibia y de preparar al mecanismo para que cuando la tensión se libere este actúe como se desea. Dicha implementación puede observarse en la Figura 29.

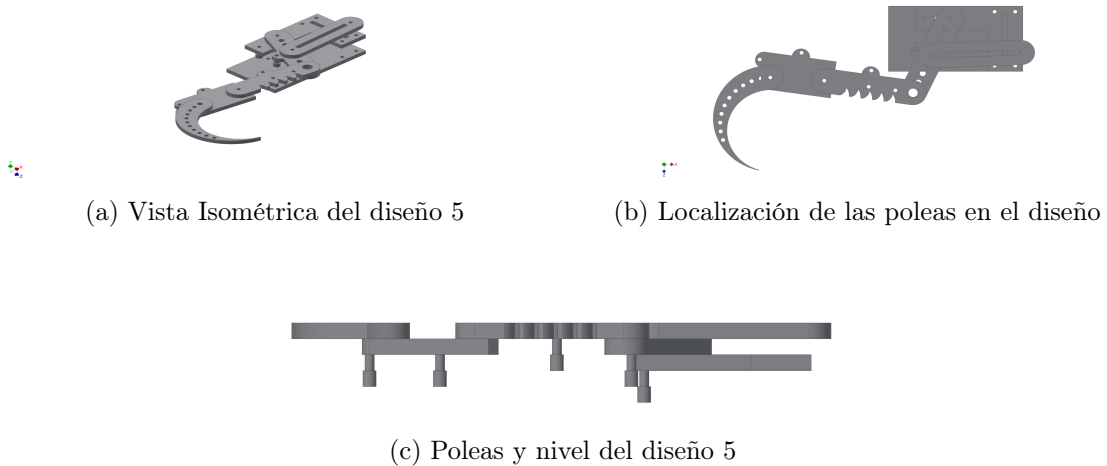


Figura 29: Vista general del diseño 5

Pueden observarse ciertos puntos en la Figura 29b, los cuales representan la posición de las poleas para preparar y cargar el mecanismo. La implementación del mecanismo permitió avanzar en el sentido de que ahora ya se podía contar con el principio de accionamiento del mismo, por lo que se obtuvo un avance significativo en cuanto a la dinámica con la que el dispositivo se comportará. También puede evidenciarse que debido a que se utilizó MDF como material de manufactura, el grosor del mismo debe ser tomado en cuenta para el diseño de los mecanismos. Este último aspecto es importante ya que se desea mantener el nivel lo más semejante posible entre eslabones. Dicho nivel puede apreciarse en la Figura 29c.

En cuanto al diseño 6, se decidió implementar las mismas localizaciones de las poleas, solo que esta vez se agregó un resorte torsional en la junta de la tibia y el tope mecánico para asegurar que esta siempre regrese a su posición natural en el trayecto. También se cambió el resorte torsional entre el fémur y la Coxa por un resorte torsional de mayor rigidez y se agregó un desfase para poder cargar al mecanismo. La implementación de ambos mecanismos se encuentra en la Figura 30



Figura 30: Diseños 5 y 6

Luego de tomar en cuenta los diseños anteriores, se agregaron 5 poleas impresas en 3D y se cambió la forma de la garra. Dichos cambios pueden observarse en la Figura 31.



Figura 31: Implementación de poleas en el mecanismo

#### 8.1.4. Diseño 7

Luego de obtener los resultados con los diseños 5 y 6, se llevaron a cabo nuevas modificaciones para el mecanismo de manera general, siendo éstas una modificación del tope mecánico, una reducción considerable en el número de poleas (de cinco poleas solo una quedó) y la inclusión de un ángulo para que el prototipo funcionara correcta-

mente. Dicho mecanismo se encuentra en la Figura 32, donde además podemos notar la designación de eslabones en el prototipo.



Figura 32: Séptima iteración del mecanismo

Dicho mecanismo mostró mejoras enormes, ya que modificó el eslabón de tierra, se agregó un cojinete en la junta entre la tierra y el eslabón 3, y como puede observarse el tope mecánico posee una serie de agujeros que sirven para darle cierto desfase al resorte torsional para intentar capturar objetivos más grandes, y se utiliza a la misma polea para posicionar a la garra durante el accionamiento. El eslabón 5 sufrió un cambio en la junta también, ya que ahora en vez de poseer solamente un tornillo que lo uniera con el eslabón 4 se utilizan dos para mantener la junta fija sin importar que tanto se torsione el resorte de la garra. Para este último elemento, se decidió imprimir este con un 100 % de relleno, ya que las garras de MDF que se utilizaron se tendían a romper en demasía.

Si se observa más detenidamente la Figura 32, puede apreciarse también un tope mecánico entre el eslabón 4 y 3, así como una forma más bio-inspirada de manera general. Por último, la Figura 32 representa la pose de referencia del mecanismo para describir su cinemática directa, así como se numeran los eslabones que lo conforman.



---

### Plataforma implementada

---

La idea detrás de implementar una Plataforma es la de poder utilizarla para someter al dispositivo a un tipo determinado de disturbio o perturbación. Con esto en mente, el diseño de la misma debe basarse en el prototipo final durante el desarrollo de esta investigación, así como en el área efectiva sobre la cual el mecanismo funcionará. También es necesario definir la forma de accionar el mecanismo así como los parámetros sobre los que deberá de operar.

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó la plataforma de manera que se tome en cuenta la geometría y forma de accionar al mecanismo. Ahora, para este paso fue necesario pasar por una serie de ideas y mecanismos para el diseño final de la misma. A continuación se presentan algunas de las ideas que se tomaron en cuenta para accionar al mecanismo.

#### **Mecanismo de Geneva**

Una de las ideas más prometedoras fue la de utilizar un mecanismo de Geneva de forma que este accionara al mecanismo por medio de un motor DC y un servo. Se decidió utilizar este mismo como intermediario entre el motor DC y el mecanismo ya que al integrar un motor sobre el mecanismo se podría cargar pero no liberar correctamente. Esto último se debe a que la caja reductora del motor no permitiría una liberación rápida al no poder girar a la velocidad adecuada los engranes que la conforman. Dicha propuesta puede observarse en la Figura 33.

Otra de las ideas que se tomaron en cuenta fue la de modificar al mecanismo de Geneva de tal forma que se lograra asegurar que este girara de manera continua, y

por eso mismo se diseñó una base para que este girara, con la ayuda de un cojinete, sobre su eje y así liberar al mecanismo. Esta idea se veía prometedora ya que un motor DC o servo de rotación continua sería capaz de cargar al mecanismo por medio de un balancín, mientras que la rueda de Geneva giraría y cargaría al mecanismo por medio de un hilo. Seguido de esto un servo funcionaría como impedimento por medio de contacto directo con la rueda de inercia para evitar que el mecanismo se liberara de manera innecesaria. A pesar de que esta idea se llegó a implementar, sucedía que al accionar al mecanismo la rueda de inercia de Geneva no sería sencilla de empezar a colocar en movimiento, lo que desembocaba en que el mecanismo intentaba moverse de manera rápida para ser detenido por la misma rueda. La base que se utilizó junto al cojinete puede apreciarse en la Figura 34.

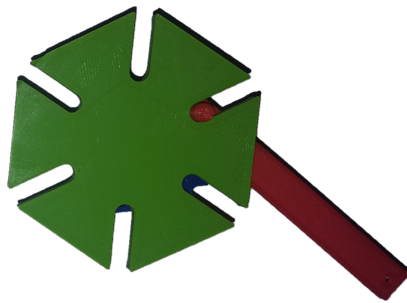


Figura 33: Idea general con el mecanismo de Geneva

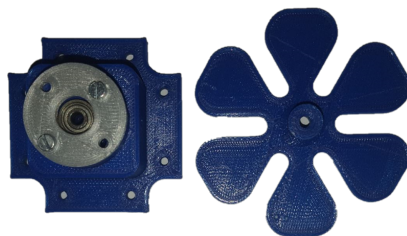


Figura 34: Concepto con la modificación del mecanismo de Geneva

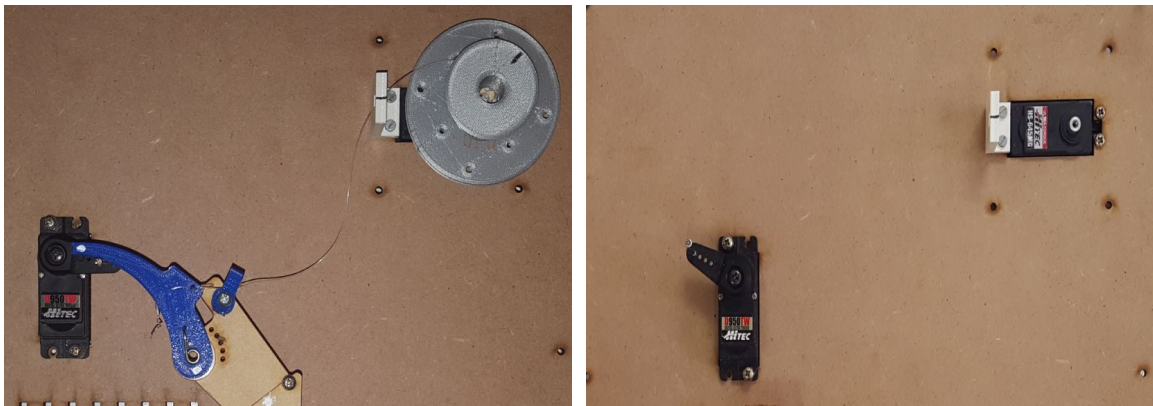
## Liberación por medio de una caja de desacople

Para evitar que la caja reductora del motor para accionar al mecanismo fuera un obstáculo, se buscó la forma de implementar un tipo de caja de desacople para desacoplar al motor. Esta idea se concibió de manera que un servo impulsara al motor DC o servo hacia el mecanismo, para que este cargara al mismo. Luego de haber hecho esto, se buscaría que el mismo servo que impulso al motor accionador lo desacoplara, pero esto último complicaba de sobremanera el diseño tanto del mecanismo como de la plataforma. Esto se debió a que al poseer dos resortes torsionales en el mecanismo se debía de buscar la forma de acoplar dos cajas de esta naturaleza sobre el mecanismo; esto último solamente quedó como una posible solución al momento de una siguiente fase del manipulador.

## Liberación por medio de dos servos

Luego de intentar llevar a cabo la liberación con un mecanismo de Geneva y por medio de una caja de desacople, entre otros, se decidió implementar una manera más sencilla de liberar al mecanismo. Esta idea consistió de cargar al mecanismo por medio de un hilo de pescar (para que este fuera lo más ideal posible) con un servo de rotación continua sobre un carrete, para que luego el mecanismo fuera detenido por otro servo colocado en una locación estratégica. Este segundo servo serviría de tope para que el primero pudiera desenredar el hilo que se encontraba en el carrete. Esto haría que luego de transcurrido cierto tiempo, el segundo servo se quitara del camino para dejar que el mecanismo se comportara naturalmente sin alguna restricción (aparte de las que se integran en el mismo).

Este método de liberación fue efectivo, y a pesar de que se trata de un lazo abierto de control, es posible seguirlo modificando de manera que este pueda llegar a ser un lazo cerrado. Para dichos comentarios, puede referirse a la sección de **Recomendaciones** (Capítulo 14). Este método de liberación puede observarse en las Figuras 35a y 35b.



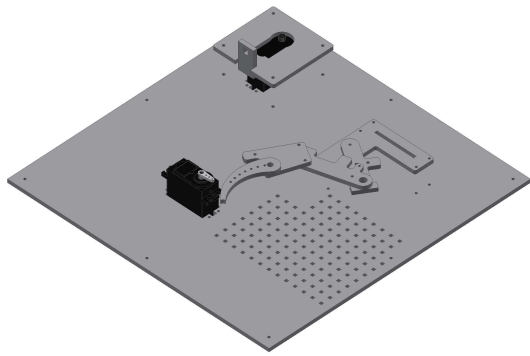
(a) Mecanismo de Liberación en acción

(b) Posición de los Servos para el accionamiento

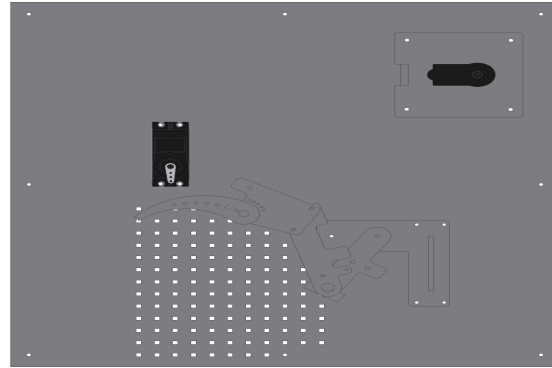
Figura 35: Idea general del mecanismo de liberación

## Plataforma de pruebas

Al seleccionar finalmente al mecanismo de liberación ( Figura 35 ), se llevó a cabo el diseño de la plataforma de pruebas. Esta se basó en las dimensiones necesarias para que el mecanismo de liberación y el prototipo de manipulador funcionaran sobre la misma. También se incluyó un área sobre la cual podía colocarse un objeto y así obtener el porcentaje de éxito en el agarre del prototipo. El diseño puede observarse en la Figura 36.



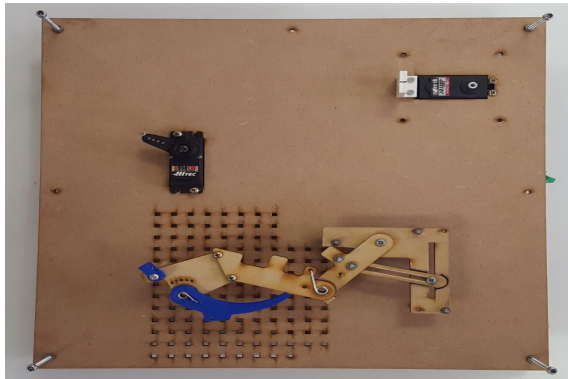
(a) Vista isométrica



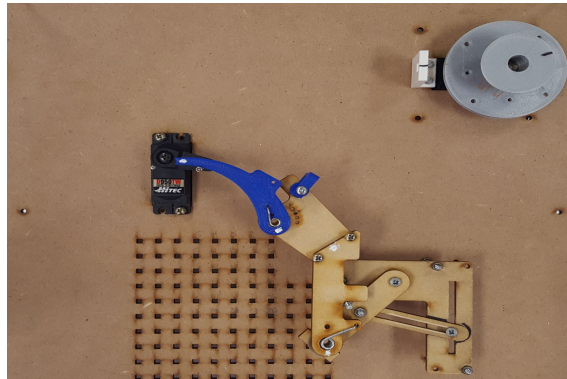
(b) Vista de planta

Figura 36: Plataforma de pruebas

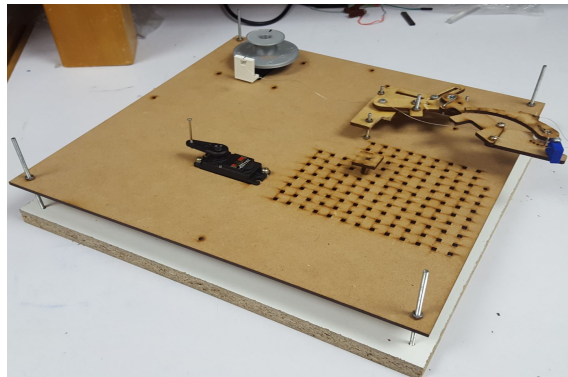
Como puede apreciarse en la figura anterior, se dispuso de un patrón regular para llevar a cabo las pruebas por medio del posicionamiento de objetos en una matriz de  $8 \times 13$  espacios. La implementación de dicha plataforma puede observarse en las Figuras 36a, 37b y 37c.



(a) Vista de Planta



(b) Accionando el mecanismo



(c) Vista isométrica

Figura 37: Implementación de la plataforma de pruebas

Los servos seleccionados para llevar a cabo la tarea de carga del mecanismo fueron

los siguientes:

- Servo de rotación continua Hi-Tec HS-645MG, para llevar a cabo la carga del prototipo al enrollar un hilo sobre el carrete
- Servo de alto torque Hi-Tec D950-TW para mantener al prototipo en posición mientras se desenrolla el carrete donde se cargó el prototipo

## Consumo energético

Debido a que el prototipo implementado debía ser considerado como de bajo consumo energético, es necesario tomar en cuenta respecto a qué referencia se mida esto. Pero antes de comparar la potencia utilizada para el accionamiento del mismo, es prudente mencionar que la potencia máxima requerida fue de  $1W$  a  $1.5$ . Esto se debe a que existe un momento en el cual al accionar los servos para cargar el mecanismo, se necesita una corriente de por lo menos  $300mA$  a  $350mA$ . Debe tomarse en cuenta que dichos servos se encuentran alimentados por  $5V$  y en base a esta información nos es posible calcular el número presentado anteriormente.

En cuánto al consumo energético del prototipo per se, es posible mencionar que al utilizar el principio del "gearing" este debería tender a ser bajo ya que se aprovecha la energía elástica almacenada en las "extremidades", que en este caso se logra al implementar los dos resortes torsionales. Esto podemos referenciarlo con lo expuesto por McHenry[5] en cuanto a la forma de modelar ciertas extremidades con forma de "V" por medio de una junta hecha por un resorte torsional. Otro aspecto importante del comportamiento del prototipo es que cumple con la noción de que entre más "gearing" posea, más grande será el tiempo de carga para obtener un movimiento de liberación rápido, por lo que se cumple la relación inversamente proporcional entre la velocidad de carga y la velocidad de liberación del prototipo. Podemos corroborar esto al tener un tiempo promedio en el orden de los segundos al cargarlo y un tiempo promedio en el orden de milisegundos al liberarlo.

Ahora, tomando en cuenta que el prototipo depende solamente de un accionamiento externo al inicio de su movimiento, podemos mencionar que esto representa una ventaja sobre otros mecanismos de Cadena abierta que deben ser continuamente actuados. Esto se considera ya que podemos notar que el prototipo es capaz de almacenar la energía en sus juntas para luego aprovechar esta misma y el momento generado por las inercias de los eslabones que lo conforman. Finalmente, al desear calcular el consumo energético total del mecanismo debe tomarse en cuenta la dinámica del mismo, que lastimosamente se encuentra fuera del alcance de esta tesis.

A pesar de lo anterior, sí es posible comparar la potencia requerida para accionar al mecanismo (la cual es de  $2W$ ) con distintos elementos eléctricos y electrónicos, como por ejemplo un LED, una resistencia conectada a voltaje o una bombilla. Hoy en día, un LED consume en promedio de  $20mA$  a  $27mA$ , y tomando en cuenta que este puede estar conectado a  $5V$ , podríamos afirmar que la potencia requerida para

accionar al mecanismo sería aproximadamente quince veces la de un LED común. Poniendo esto mismo bajo comparación con un bombillo regular de  $10W$ , podemos afirmar que el prototipo sería cinco veces más eficiente que este último. Debido a la dimensión de los objetos con los que podemos comparar al prototipo en cuanto a la potencia requerida, podemos afirmar que este prototipo de manipulador puede ser considerado como de bajo consumo energético, sobretodo al tomar en cuenta la velocidad con la que este se libera.

### 10.1. Diseños 1 y 2

Los resultados obtenidos con los diseños planteados anteriormente fueron interesantes, ya que no son fáciles de predecir. Esto se debe a que ambos diseños poseen tanto sus ventajas como desventajas, pero ambos compartieron un conjunto de características que, por el momento, presentan obstáculos los cuales superar. Estas características son las siguientes:

- Ambos diseños sufrieron las consecuencias de no utilizar un resorte torsional entre eslabones, ya que éstos se deformaban de manera extraña y muchas veces los movimientos generados no eran constantes
- El diseño 1 (Figura 27a) es más susceptible a la inercia a mover, pero ambos diseños presentaron susceptibilidades a la posición inicial y la inercia a mover.
- La posición inicial de la inercia utilizada dicta la trayectoria a seguir de la misma, por lo que es necesario colocar un tope mecánico de tal forma que siempre se asegure el mismo tipo de movimiento
- El punto de aplicación de la fuerza en el diseño 1 se encuentra en un lugar poco recomendado para colocar un actuador, por lo que es necesario pensar sobre alguna forma en la que un actuador pueda ser colocado para generar el movimiento deseado, mientras que el diseño 2 tendió a ser más predecible en cuanto a su comportamiento.

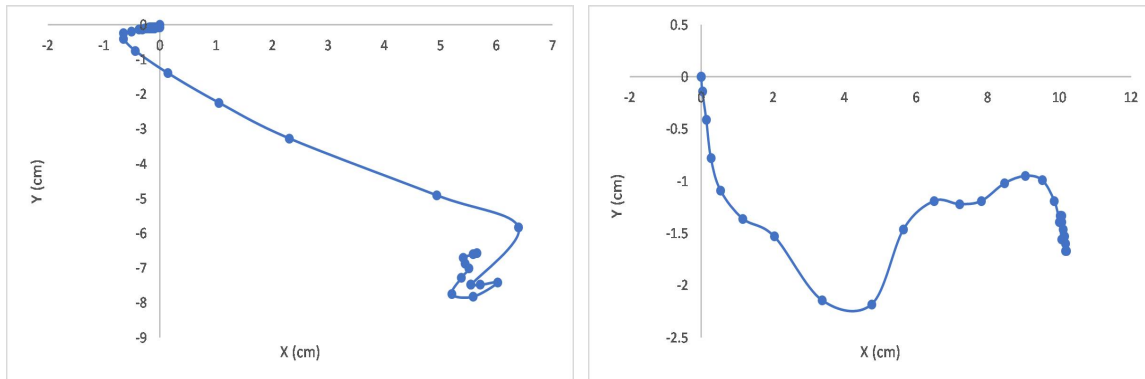
Para obtener los resultados anteriores, se hizo uso del Software Kinovea para poder obtener las trayectorias de los actuadores mostrados en la Figura 38, y poder



Figura 38: Inercias utilizadas para las pruebas del Diseño 1 y 2

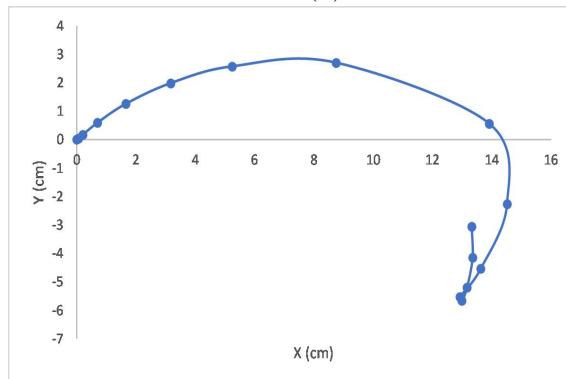
comparar los resultados obtenidos con distintas inercias a movilizar. Es importante mencionar que las dimensiones utilizadas para los mecanismos son, en promedio, dos veces mayores que las dimensiones de una *M. religiosa*. A esto debe sumársele que la inercia en un mecanismo equivalente aumenta en un factor exponencial respecto al de la inercia de la Mantis, lo que causó que en promedio los movimientos de retorno para los agarres fuera en promedio 10 veces mayor que lo que se tarda una Mantis real (en promedio se obtuvo un tiempo de retorno de  $250ms$ , mientras que una Mantis se tarda entre  $25ms$  y  $37ms$ ).

En cuanto a las trayectorias que se obtuvieron para ambos diseños, estas se encuentran en las Figuras 39a, 39b y 39c. Es necesario indicar que cada una de éstas Figuras (así como las de las demás iteraciones donde se muestran las trayectorias) poseen el origen posicionado donde la inercia se encontraba al inicio del movimiento.



(a) Trayectoria utilizando Inercia 1

(b) Uso de inercia 1 con distinta posición inicial



(c) Trayectoria con cambio de inercia

Figura 39: Trayectorias obtenidas para el mecanismo 1

Mientras que las trayectorias obtenidas para el Mecanismo 2 pueden observarse en las Figuras 40a y 40b. Comparando las Figuras 39 y 40 podemos notar que las del mecanismo 2 son más uniformes y suaves, siendo esta la razón por la cual se decidió iterar sobre este diseño.

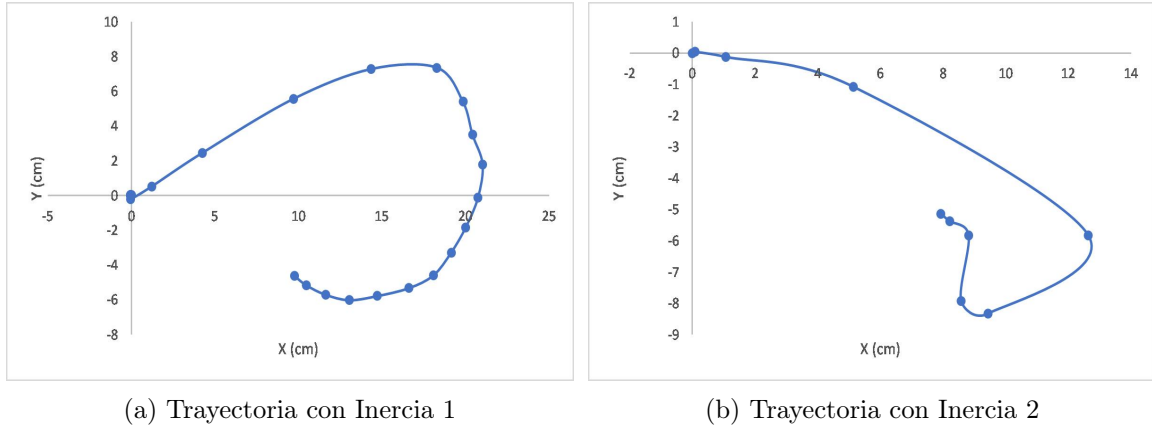


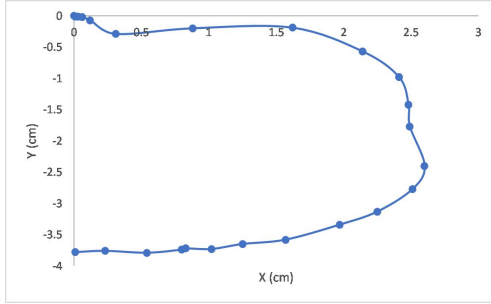
Figura 40: Trayectorias de los mecanismos 1 y 2

## 10.2. Diseños 3 y 4

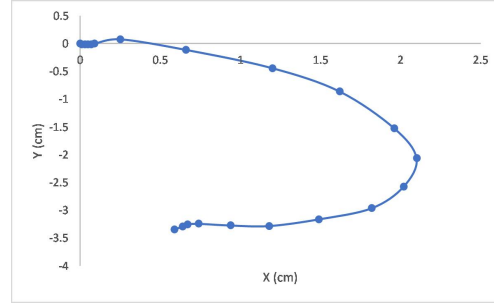
Para los diseños 3 y 4 se obtuvieron una serie de resultados que indicaban que se marchaba por el camino correcto. Durante estas pruebas se hizo uso de una nueva restricción planar por medio de un eslabón de soporte y la tierra del mecanismo. Esta restricción resultó beneficiosa debido a que hizo que el mecanismo se comportara como se desea, al transferir el momento del fémur hacia la tibia por medio del tope mecánico que se agregó al mismo. También se llegó a la conclusión de que la restricción impuesta por el tope mecánico hace que el dispositivo sea independiente de la inercia que se encarga de simular la tibia. Se agregó también un tope en el fémur para que la tibia se encontrara con este y quedara prensada en el mismo. Aunque el intento de atrapar la tibia por medio de otro tope no funcionó, sí permitió abrir un camino para una nueva idea implementable en la siguiente iteración. Al obtener este resultado por medio del diseño 3, se diseñó la iteración 4 de tal forma que el fémur fuera el encargado de atrapar a la tibia para que el dispositivo completara la secuencia de agarre. Este diseño dió una luz nueva en cuanto a la forma en que el mecanismo debía de atrapar al objetivo, pero se priorizó colocar a la tibia en la posición deseada y en diseñar una forma para cargar el mecanismo por medio de una cuerda. Las trayectorias obtenidas se encuentran en las Figuras 41a y 41b.

## 10.3. Diseños 5 y 6

Para la implementación del diseño 5, se llevó a cabo la simulación de poleas por medio de tornillos M3 que sirvieron para tensionar de distintas maneras la cuerda



(a) Trayectoria del mecanismo 3

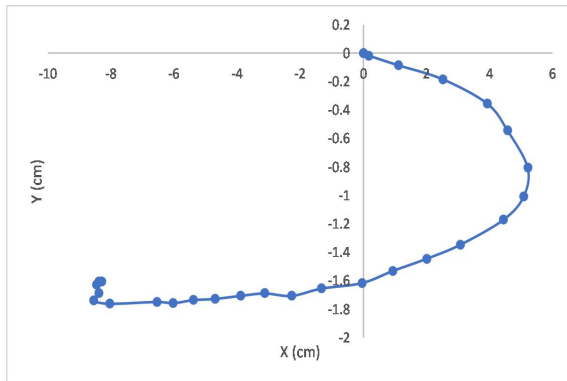


(b) Trayectoria del mecanismo 4

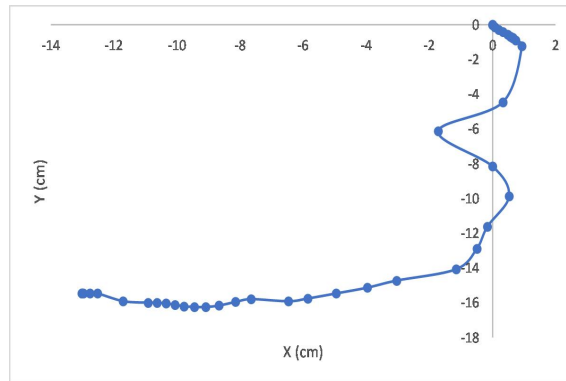
Figura 41: Trayectorias de los mecanismos 3 y 4

utilizada para cargar el mecanismo. Esto permitió comparar de manera cualitativa la forma en que se comporta el mecanismo con la secuencia que generalmente sigue una *M. religiosa* para su movimiento de caza. Ahora, para el diseño 6, se obtuvieron resultados alentadores en el sentido de que la restricción impuesta por el resorte torsional en la tibia hace que ésta siempre regrese a su posición inicial durante el trayecto. Este último aspecto también posee sus desventajas, ya que ahora es necesario aplicar una especie de liberación síncrona para lograr que el movimiento de agarre se dé cuando se desea. Para esto último deben de investigarse dispositivos de liberación todavía.

Las trayectorias obtenidas para estas dos iteraciones se encuentran en las Figuras 42a y 42b.



(a) Trayectoria del mecanismo 5



(b) Trayectoria del mecanismo 6

Figura 42: Trayectorias de los mecanismos 5 y 6

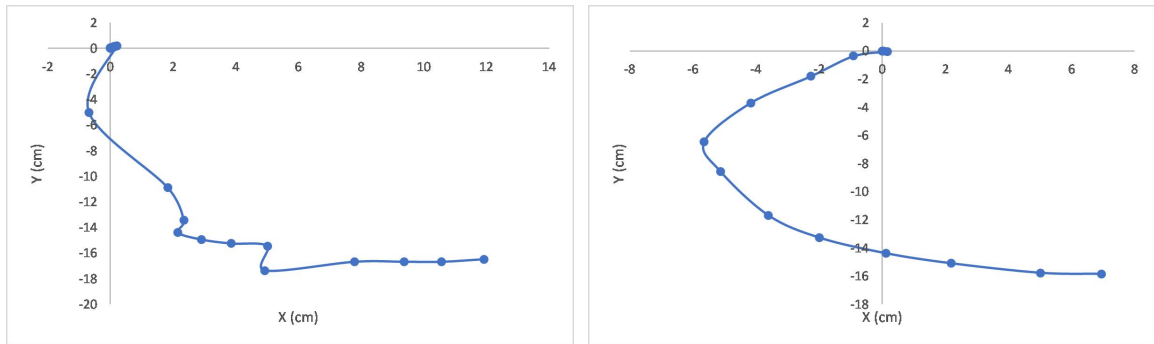
Como podemos observar, estas trayectorias se encuentran mucho mejor definidas y en la mayoría de ellas se puede considerar que se tiene una curva suave, lo que indica que las restricciones que se han impuesto sobre el mecanismo funcionan de manera correcta. También podemos mencionar que el hecho de que ahora se tenga también una forma de "activar" al mecanismo con una cuerda es análogo a los tendones que existen en las extremidades de la Mantis, por lo que podemos justificar la bioinspiración en el sentido de que se tomaron principios biológicos para obtener un

movimiento que simule la rapidez, eficiencia y precisión de la Mantis. Este último aspecto se ve reflejado en el hecho de que las restricciones impuestas hacen que la trayectoria obtenida sea siempre la misma.

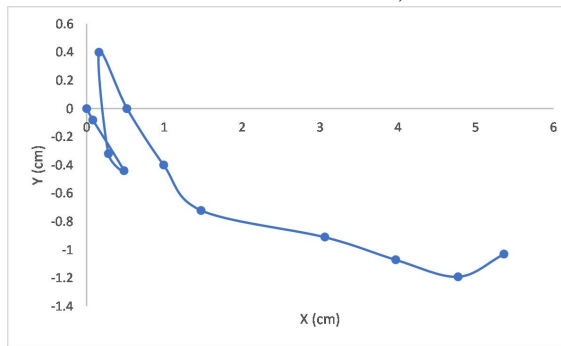
En cuanto a la implementación de las poleas impresas en 3D (Figura 31 ) se puede mencionar que ésta no fue exitosa. Esto se debió a que los distintos torques y fuerzas que actuaban sobre las poleas deformaban demasiado al prototipo al momento de accionarlo, lo que nos permite decir que este cambio no fue una solución implementable. En cuanto a las trayectorias generadas por este prototipo podemos afirmar que fueron parecidas a la de la Figura 42b.

## 10.4. Diseño 7

Para esta iteración del mecanismo se llevaron a cabo varios cambios, y al momento de redactar esta investigación se consideró que este diseño funcionaría como el diseño final a implementar. Los resultados obtenidos fueron alentadores, ya que el tiempo promedio del movimiento de retorno fue de aproximadamente  $108mS$ , lo cual se obtuvo con el software Kinovea. También podemos mencionar que la trayectoria seguida por el actuador final resultó ser extraña, lo cual puede apreciarse en la Figura 43a.



(a) Trayectoria del Efector final (colocado al final de la "garra") (b) Trayectoria de la Junta No. 3 (segundo resorte torsional)



(c) Trayectoria de la Junta No.2 (primer resorte torsional)

Figura 43: Trayectorias del mecanismo 7, con el origen posicionado en los marcos de referencia

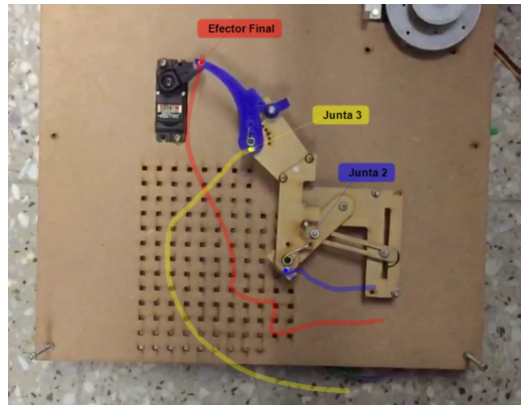
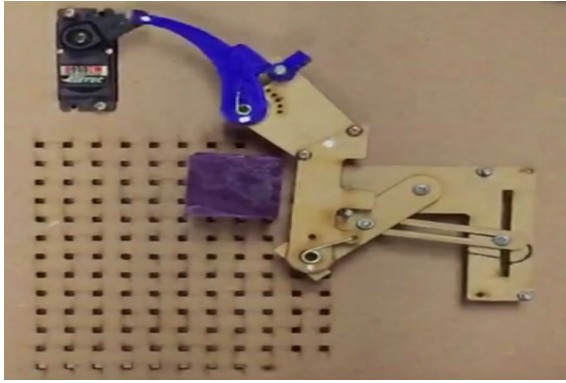


Figura 44: Trayectorias obtenidas sobre los puntos importantes del prototipo

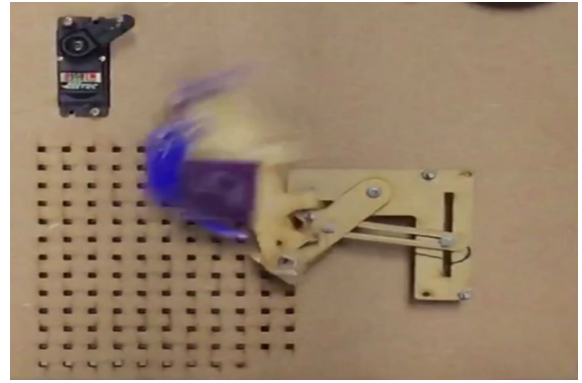
Como se observa en la Figura 43b, la trayectoria de la junta 3 (donde se conecta el eslabón 6 con el eslabón 5, que le da cierta inclinación) es bastante uniforme; esto mismo no puede notarse en la Figura 43c, ya que presenta un ligero "salto" entre las coordenadas del movimiento. Esto definitivamente se debe a la forma en que la garra se cierra y la misma inercia de esta interviene en la forma de movimiento de esta junta. Para tener una idea más clara de cómo se obtuvieron estas trayectorias y las anteriores, puede observarse la Figura 44 de referencia.

En la Figura 44, podemos observar en rojo la trayectoria del efecto final, en amarillo la trayectoria de la junta 3 y en azul la trayectoria de la junta 2. A pesar de lo mencionado anteriormente, la presencia de estas trayectorias en el prototipo dieron un resultado muy optimista para el mismo, ya que éstas colaboraron a que el tiempo de acción del mecanismo se redujera considerablemente en comparación con la iteración anterior.

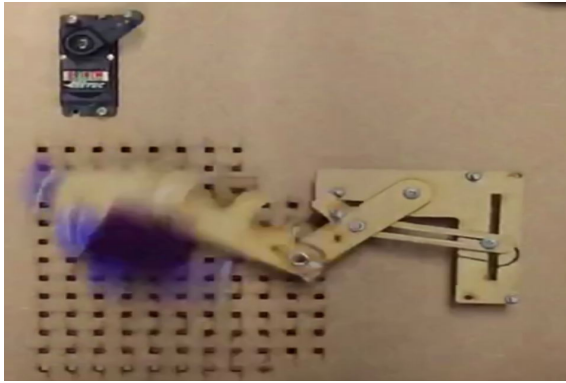
Por último, en la Figura 45 podemos observar en secuencia el movimiento que se obtiene del prototipo al accionarlo. En dichas Figuras es posible observar el inicio del movimiento (Figura 45a) al ser liberado el prototipo, así como la forma en que este atrapa al objeto (Figura 45b) y la manera en que este es manipulado (Figuras 45c, 45d y 45e) hasta que el prototipo llega al final de su movimiento (Figura 45f). Toda esta secuencia de movimientos puede compararse con la de la Figura 25, donde puede observarse de manera prominente la bio-inspiración del prototipo.



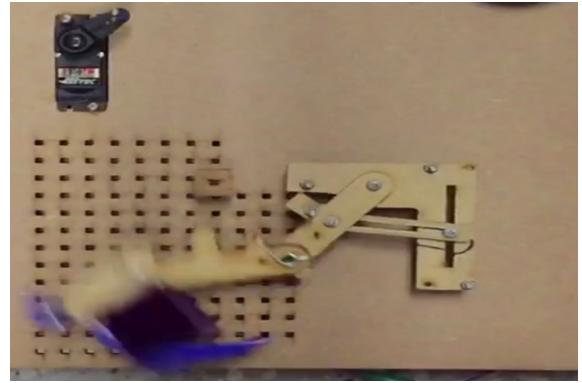
(a) Inicio del Movimiento



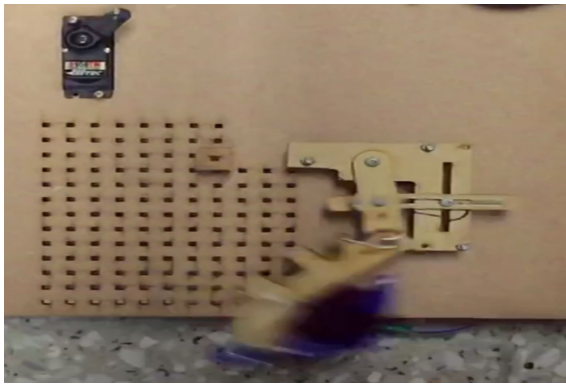
(b) Captura del Objeto (10 mS)



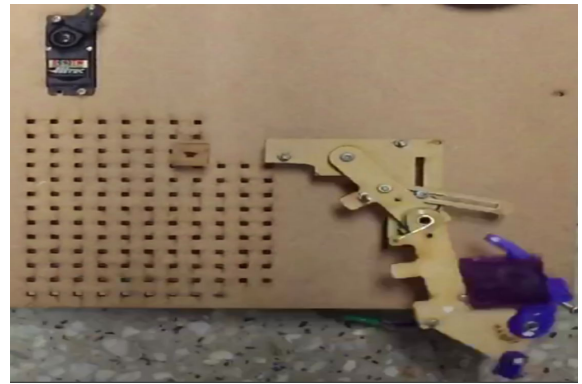
(c) Manipulación del Objeto (I) (18 mS)



(d) Manipulación del Objeto (II) (27 mS)



(e) Manipulación del Objeto (III) (52 mS)



(f) Final del Movimiento (82 mS)

Figura 45: Secuencia del prototipo al capturar un objeto en la posición 11 de la Plataforma

## 10.5. Comparación de tiempos

Tomando en cuenta siempre que la *Mantis religiosa* se tarda entre  $25mS$  a  $37mS$  al accionar sus extremidades raptoriales, es necesario indicar que el propósito del prototipo bio-inspirado presentado no era el de vencer este tiempo. Más bien, el propósito del prototipo en cuanto a tiempo nos referimos era el de obtener un tiempo lo más cercano posible a la referencia expuesta anteriormente.

Habiendo clarificado lo anterior, podemos decir que para comparar qué tan rápido es el movimiento del mecanismo debemos de separar al mismo en dos: el primero es el movimiento de carga, mientras que el segundo es el movimiento de liberación. Es precisamente este segundo movimiento el que nos interesa estudiar, ya que se espera que sea en este donde el prototipo sea capaz de manipular objeto alguno. Por esto mismo se hizo uso del software Kinovea para medir el tiempo transcurrido desde que el prototipo se encontraba en la posición descrita en la Figura 45a hasta la posición descrita por la Figura 45f. Los tiempos promedio de este trayecto se presentan en el Cuadro 2.

Diseño	Figura	Tiempo Promedio ( $mS$ )
1	27a	192.5
2	27b	143.5
3	28a	197.0
4	28b	180.6
5	30a	212.6
6	30b	205.7
7	32	90.5

Cuadro 2: Tiempos obtenidos para los distintos diseños

Nuevamente podemos mencionar que al ser la iteración 7 la más bio-inspirada, se obtuvo un tiempo promedio mucho menor respecto al de las otras iteraciones, aunque esto provoque que las trayectorias de las juntas y el efector final del manipulador posean trayectorias atípicas (Figuras 43a, 43b y 43c).

---

Cinemática directa y simulación del prototipo final

---

Por medio de la implementación de la notación Denavit-Hartenberg fue posible definir cinemáticamente al prototipo. Dicha convención dió como resultado el Cuadro de parámetros 3:

No. de Junta	$a_i$ (cm)	$\alpha_i$	$d_i$ (cm)	$\Theta_i$
1	5.0000	0	0	$q_1 + 140.3^\circ$
2	6.0642	0	0	$q_2 + 59.8^\circ$
Junta fija	2.8184	0	0	$90.5^\circ$
3	5.8202	0	0	$q_3 + 136.8^\circ$

Cuadro 3: Parámetros Denavit-Hartenberg

Con el Cuadro anterior podemos notar que existe una junta definida como "Junta fija", la cual quiere decir que esta solo nos sirve para describir como se observa al prototipo desde el punto de referencia definido. Esta descripción nos sirve para poder obtener la Figura 46 de MATLAB.

Ahora, aunque el mecanismo mostrado en la Figura 46 sea anatómicamente correcto con el observado en la Figura 32, en realidad la cadena cinemática que describe a las juntas se obtiene de el Cuadro 4 que se encuentra representado cinemáticamente como se observa en la Figura 47.

No. de Junta	$a_i$ (cm)	$\alpha_i$	$d_i$ (cm)	$\Theta_i$
1	5.0000	0	0	$q_1 + 140.3^\circ$
2	7.8990	0	0	$q_2 - 39.7^\circ$
3	5.9310	0	0	$q_3 + 176.5^\circ$

Cuadro 4: Parámetros Denavit-Hartenberg reales

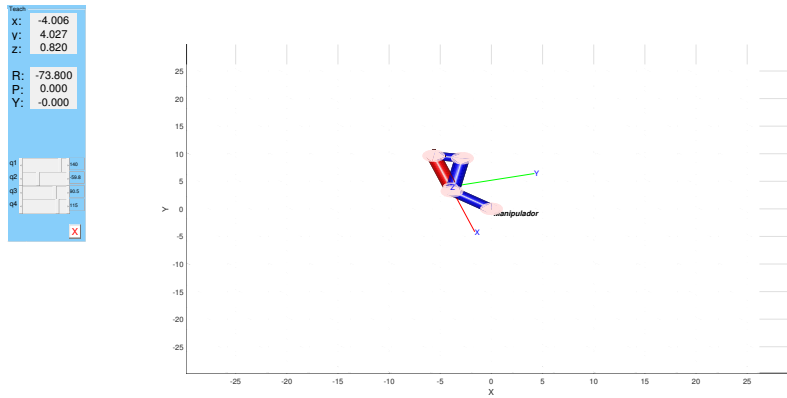


Figura 46: Representación cinemática real del prototipo

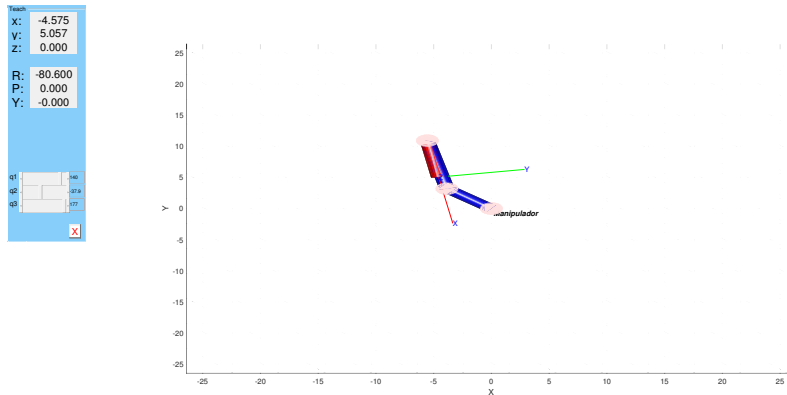


Figura 47: Representación cinemática correcta del prototipo

Y media vez se tenga la cadena cinemática que describe al prototipo, es posible llegar a obtener el análisis estático del mismo por medio de la introducción de los valores de cada grado de libertad. Dichos valores deben variar para obtener las poses iniciales y finales del movimiento a analizar. Con esto, la lista de torques obtenidos debe variar según las constantes de los resortes utilizadas y al tener esto junto con la inversa del Jacobiano es posible llegar a obtener la forma en que se desplazan las componentes X e Y de las fuerzas que se presentan en cada junta. Para ejemplificar esto se muestran las Figuras 48 y 49.

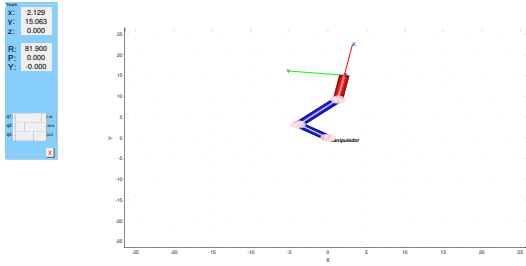


Figura 48: Posición inicial a estudiar

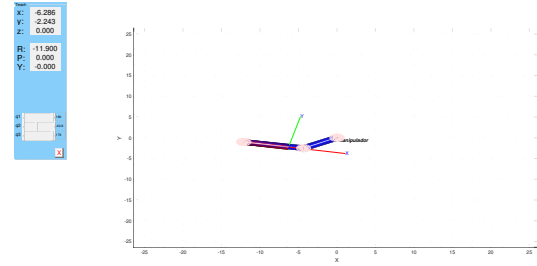


Figura 49: Posición final del mecanismo

Para realizar la simulación del prototipo por medio de cinemática directa en MATLAB es necesario tomar en cuenta la forma en que se comporta el prototipo. Con esto me refiero a que en ciertos puntos de la trayectoria del mismo ya no se presentan cambios en las juntas 2 y 3 del mismo. Esto se debe a que la junta 3 al quedarse estática ya no presenta torque alguno en la misma, y lo mismo sucede con la junta 2. Estos saltos representan discontinuidades en la forma de obtener tanto la fuerza en Y y X para el efector final, por lo que es evidente la limitación de estudiar este prototipo sin tomar en cuenta su dinámica, ya que como se observa en la Figura 43c existen saltos que son causados por la misma inercia de los eslabones del prototipo, lo que hace que este sistema no se considere como lineal.

Independientemente de esto, se obtuvieron las Figuras 50, 51 y 52. En dichas figuras se hace obvio que como tal la cinemática directa se queda corta para describir la forma en que se comporta el efector final del prototipo al tomar en cuenta las restricciones que se imponen sobre el mismo. Esto queda fuertemente evidenciado por los saltos que se presentan al inicio y durante las trayectorias del mecanismo.

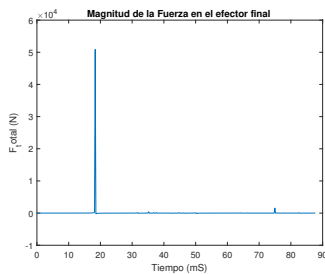


Figura 50: Magnitud de la fuerza en el efector final

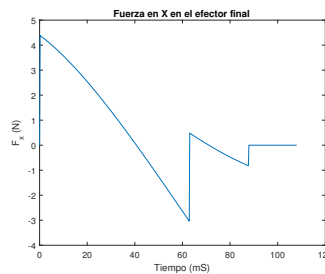


Figura 51: Magnitud de la fuerza en X del efector final

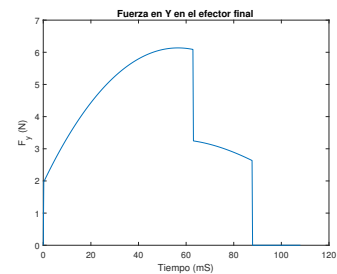


Figura 52: Magnitud de la fuerza en Y del efector final

Observando las figuras anteriores, es importante remarcar que para obtener un análisis completo del prototipo es necesario estudiar la dinámica de este. Lastimosamente, este trabajo no se adentra en este aspecto, pero siempre queda el espacio para seguir con el desarrollo de este prototipo y estudiarlo de esta forma para futuras fases.

Por último, se presenta también por medio de las Figuras 53, 54 y 55 la forma en que los distintos torques de las juntas se comportan durante el movimiento de retorno

del prototipo.

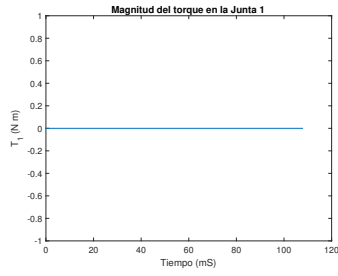


Figura 53: Magnitud del torque en la junta 1

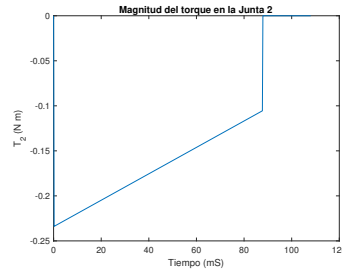


Figura 54: Magnitud del torque en la junta 2

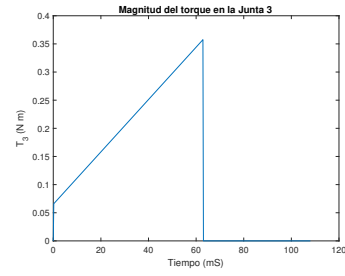


Figura 55: Magnitud del torque en la junta 3

Y tomando en cuenta la forma en que el mecanismo funciona, podemos afirmar que estos torques representan de manera correcta el comportamiento en la Junta No. 1; pero no podemos afirmar lo mismo con las juntas 2 y 3 ya que no se está tomando en cuenta que el torque en estas juntas puede sobrepasar la posición natural de los resortes torsionales al accionarse el prototipo de manipulador.

El programa hecho en MATLAB puede encontrarse en el Anexo 16.1, así como también puede encontrarse el Jacobiano analítico y Cinemática Directa obtenidos en el Anexo 16.2.

---

### Análisis estadístico sobre el porcentaje de éxito

---

Para llevar a cabo la estadística de qué tan exitoso es el prototipo implementado, se realizaron dos tipos de pruebas. A grandes rasgos, la primera prueba sirvió de manera muestral para obtener el área dónde el prototipo fue capaz de atrapar como mínimo una vez a un objeto, mientras que la segunda consistió en realizar cuatro réplicas para determinar el porcentaje de éxito de forma poblacional. Para esto se utilizaron dos objetos, siendo el de la Figura 56 el objetivo de capturar para la prueba muestral mostrada en la Figura 58 y para una iteración de la prueba ANOVA, mientras que el de la Figura 57 se utilizó solamente para la segunda prueba ANOVA realizada. Dichos objetos se diferenciaban en que el objeto 1 poseía una forma cilíndrica con un diámetro de  $15\text{ mm}$  y  $20\text{ mm}$  de alto, mientras el objeto 2 es un prisma con  $15\text{ mm}$  de ancho por  $15\text{ mm}$  de largo. Ambos objetos poseían una altura total de  $24\text{ mm}$ .

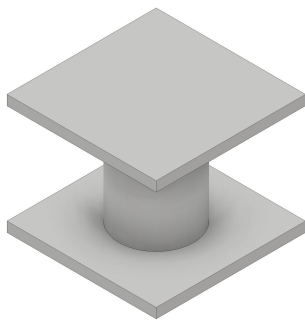


Figura 56: Objeto utilizado para la prueba muestral y ANOVA

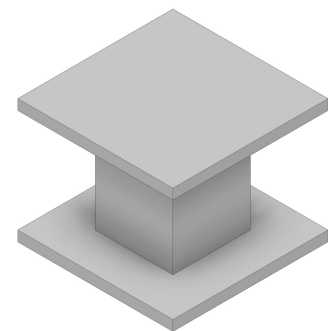


Figura 57: Objeto utilizado para la segunda iteración de la prueba ANOVA



Objeto	$\alpha$	$F$	$P$
1	0.05	9.683	$3.591 \times 10^{-17}$
2	0.05	13.197	$1.553 \times 10^{-21}$

Cuadro 5: Resultados obtenidos para la prueba ANOVA

estudiados son significativamente distintas, ya que éstos le brindan significancia estadística a este estudio. Como podemos notar, para ambos objetos sucede lo mismo a pesar de que su geometría sea distinta. Esto lo podemos afirmar al obtener un valor  $p$  mucho menor al de  $\alpha$  en los dos casos; aunque es necesario mencionar que no es posible comparar dichos resultados entre sí, ya que para cada una de las dos pruebas la única variable que se tomó en cuenta fue la posición y no la forma del objeto. Esto último nos indica que solamente podemos afirmar que la posición del objeto afecta de manera estadísticamente significativa la probabilidad de que sea capturado.

En cuanto a la comparación sobre el porcentaje de éxito del prototipo, lo más cercano que se estuvo a estar del 85 % de éxito de la *M. religiosa* fue un 60 % para las pruebas realizadas con el Objeto 1 ( Figura 56) y un 72.5 % con el objeto 2 (Figura 57). Esto puede observarse en la Figura 60, donde nuevamente se obtuvo un mapa de probabilidades basados en los objetos y cuántas veces el prototipo fue capaz de capturar a estos. Nuevamente, las tablas donde se encuentran los intentos exitosos de captura se encuentran en el Anexo 16.4.

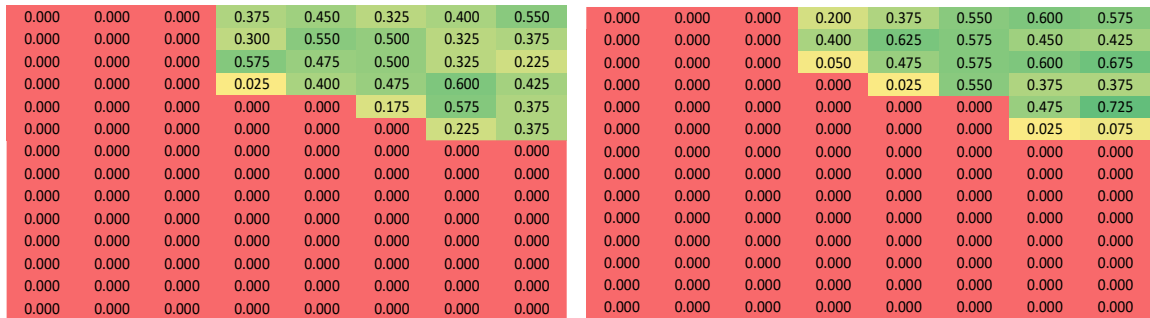


Figura 60: Resultados de la prueba Anova para el objeto 1 y 2

Estos resultados nos indican que para ciertas posiciones dentro del área examinada, existen algunos puntos donde el hecho de que el prototipo pueda atrapar al objetivo no es trivial. Dichos mapas de probabilidad demuestran esto en aquellas celdas que superan al 60 % de probabilidad. Aunque el prototipo se encuentra cerca del porcentaje de éxito de la *Mantis religiosa*, se denota que es necesario como mínimo una iteración más del mismo para poder lograr un porcentaje de éxito mayor o igual al de la *Mantis religiosa*. Por último, puede observarse en las Figuras 60a y 60b que las regiones obtenidas, junta con la de la Figura 58, son muy similares por lo que al complementar esto con el análisis ANOVA podemos inferir que a nivel poblacional la posición del objetivo sí afecta estadísticamente hablando a la probabilidad de que este sea capturado.



1. Para concluir este trabajo, es necesario indicar que sí fue posible completar el objetivo general de crear una plataforma de prototipo bio-inspirado en la *Mantis religiosa*. Esto es posible debido a la premisa de que los mecanismos bio-inspirados deben de ser sencillos. Ahora, también fue posible basarse en el principio de manejo eficiente de energía o "compliance", el cual se basa en la forma de los esqueletos, exo-esqueletos, etc. para almacenar y manejar, de alguna manera, eficientemente la energía que se gasta al crear movimiento. Como parte de esto puede verse que se llegó a un movimiento capaz de ser preciso y rápido en su reproducción, que siempre estuvo basado en la forma de las extremidades raptorales de la *Mantis religiosa*.
2. Para el diseño y caracterización del mecanismo se hizo uso de la cinemática directa, cinemática diferencial y estática de manipuladores. Acorde a esto también se logró implementar un prototipo de bajo consumo energético al consumir como máximo 1.5W en su etapa más exigente, que resultó ser el accionamiento del mismo. A pesar de describir al prototipo, estas técnicas se vieron limitadas por las restricciones impuestas por el mismo diseño del prototipo, por lo que siempre queda oportunidad para mejorar este análisis.
3. En cuanto a la comparación de la tasa de éxito del prototipo, este llegó como máximo a un 72.5% en una posición dentro la plataforma de pruebas. Este valor a pesar de estar cerca al 85% de la *Mantis religiosa*, puede mejorarse aunque esto requiera de cambios en el diseño del prototipo. También debe considerarse la geometría de los objetos a manipular, ya que esto representa un factor determinante para que el prototipo presentado sea funcional.
4. La plataforma implementada para llevar a cabo las pruebas para comprobar el funcionamiento del prototipo fue un éxito, ya que en esta se pudo obtener tanto el área donde el prototipo es funcional así como el porcentaje en que este lo

es. Esto se logró con la implementación de un Arduino Mega para controlar los servos marca Hi-Tec utilizados, y una fuente de poder para alimentar a estos últimos.

5. Por último, los resortes torsionales implementados en el prototipo permitieron un movimiento rápido y preciso, ya que este movimiento no variaba sin importar cuántas veces se repitiera el experimento. También debe notarse que utilizar MDF como material de manufactura por medio de corte láser y la impresión 3D de objetos y eslabones permitió tener libertad en cuanto al diseño del prototipo ya que no existían mayores restricciones en cuanto a la manufactura del mismo.

- Como primer recomendación, es preciso mencionar que las geometrías de los objetos con que el prototipo tiene mayor eficiencia al capturar son las presentadas en el Anexo 16.3. Esta recomendación se basa en que se llevaron a cabo pruebas con distintos objetos (más de 9 objetos distintos, Anexo 16.3) pero en ninguna de éstas el prototipo fue capaz de tener una captura exitosa. Otro punto basado en esto son las pruebas estadísticas, las cuales podrían compararse al llevar a cabo pruebas ANOVA de 2 o 3 variables para poder comparar los resultados entre sí.
- También debe considerarse cerrar el lazo del mecanismo de accionamiento, ya que actualmente este se encuentra funcionando en una modalidad de "open-loop" o lazo abierto. Para esto es posible introducir, por ejemplo, un optoacoplador para llevar la cuenta de cuántas vueltas se han dado para determinar si ya se encuentra en posición el dispositivo.
- Otra recomendación importante se basa en obtener la dinámica del sistema. Durante esta investigación se llegó a la conclusión de que el estudio por medio de la cinemática directa del mecanismo no es suficiente para poder comprender como funciona totalmente, por lo que la aplicación de la teoría de control moderno, y más específicamente, la ecuación universal del manipulador puede ser una entidad poderosa de aplicar para la caracterización del prototipo. Esto se debe a que al tomar en cuenta las inercias, así como las restricciones y no linealidades del sistema, pueden llevar a obtener un modelo dinámico robusto.
- Si bien la implementación de la plataforma de pruebas fue un éxito, se podría mejorar esto respecto a la forma de uno de los eslabones del prototipo. Se recomienda cambiar la forma del eslabón 4, lo que se debe a que en muchas de las repeticiones experimentales sobre el porcentaje de éxito, resultaba que el mecanismo atrapaba al objetivo pero debido al comportamiento de las inercias, velocidades y fuerzas este venció el agarre del mecanismo y se soltaba. La garra del mecanismo también podría ser modificada para intentar capturar el mayor

número de objetos posibles, todo esto con el objetivo de obtener un porcentaje de éxito mayor o igual al presentado por la *Mantis religiosa*. También se recomienda encontrar otra manera para liberar al mecanismo, ya que la forma actual de hacerlo depende de enredar y desenredar correctamente el hilo para llevar a cabo la carga y liberación del prototipo.

- Por último, poner en práctica distintas técnicas de manufactura con distintos materiales para comparar cómo estos pueden afectar el comportamiento o funcionamiento del prototipo. Esto podría basarse en que, posiblemente, un material más elástico podría producir que el eslabón 6 ("garra") del prototipo aumente la probabilidad de capturar algún objeto.

- 
- [1] N. S. Szczecinski, D. M. Chrzanowski, D. W. Cofer, D. R. Moore, A. S. Terrasi, J. P. Martin, R. E. Ritzmann y R. D. Quinn, “MantisBot: A platform for investigating mantis behavior via real-time neural control”, en *Biomimetic and Biohybrid Systems*, S. P. Wilson, P. F. Verschure, A. Mura y T. J. Prescott, eds., vol. 9222, Cham: Springer International Publishing, 2015, págs. 175-186, ISBN: 978-3-319-22978-2. DOI: 10.1007/978-3-319-22979-9\_18. dirección: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-22979-9\\_18](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-22979-9_18) (visitado 29-04-2018).
- [2] E. M. García, D. U. Escalera y E. L. González, “Velocity kinematics redundancy control of multi-joint manipulability jacobians”, *AVANZA*, vol. 3, n.º 0, 6 de oct. de 2014, ISSN: BN 9786079224523. dirección: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/avanza/article/view/11> (visitado 29-04-2018).
- [3] N. G. Lokhande y V. B. Emche, “Mechanical spider by using klann mechanism”, vol. 1, n.º 5, pág. 4, 2013.
- [4] K. Preston-Mafham, *Grasshoppers & Mantids of the World*, 1st edition. Facts on File, 1 de ene. de 1991, 192 págs., ISBN: 978-0-7567-7071-6.
- [5] M. J. McHenry, “When skeletons are geared for speed: The morphology, biomechanics, and energetics of rapid animal motion”, *Integrative and Comparative Biology*, vol. 52, n.º 5, págs. 588-596, 1 de nov. de 2012, ISSN: 1540-7063. DOI: 10.1093/icb/ics111. dirección: <https://academic.oup.com/icb/article/52/5/588/682722> (visitado 13-02-2018).
- [6] C. Weirauch, D. Forero y D. H. Jacobs, “On the evolution of raptorial legs – an insect example (hemiptera: Reduviidae: Phymatinae)”, *Cladistics*, vol. 27, n.º 2, págs. 138-149, 1 de abr. de 2011, ISSN: 1096-0031. DOI: 10.1111/j.1096-0031.2010.00325.x. dirección: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1096-0031.2010.00325.x/abstract> (visitado 13-02-2018).
- [7] P. T. A. Gray y P. J. Mill, “The musculature of the prothoracic legs and its innervation in hierodula membranacea (mantidea)”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, vol. 309, n.º 1140, págs. 479-503, 30 de abr. de 1985, ISSN: 0080-4622, 2054-0280. DOI: 10.1098/

rstb.1985.0094. dirección: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/309/1140/479> (visitado 22-02-2018).

- [8] R. L. Norton y J. E. Murrieta Murrieta, *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill, 2009, OCLC: 435986775, ISBN: 978-970-10-6884-7.
- [9] R. N. Jazar, *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control (2nd Edition)*. Springer Science & Business Media, 14 de jun. de 2010, 889 págs., Google-Books-ID: VffGAAAQBAJ, ISBN: 978-1-4419-1750-8.
- [10] S. B. Niku, *Introduction to robotics: analysis, control, applications*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2011, 466 págs., ISBN: 978-0-470-60446-5.
- [11] D. Sun e Y. Liu, *Biologically Inspired Robotics*, 1.<sup>a</sup> ed. CRC Press, 2012, 330 págs., ISBN: 978-1-4398-5497-6.
- [12] E. R. Girden, *ANOVA: Repeated Measures*. SAGE, 1992, 88 págs., Google-Books-ID: JomGKpjnfPcC, ISBN: 978-0-8039-4257-8.
- [13] B. J. Corrette, “Prey capture in the praying mantis *Tenodera aridifolia sinensis*: coordination of the capture sequence and strike movements”, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 148, págs. 147-180, ene. de 1990, ISSN: 0022-0949.
- [14] H. Maldonado, L. Levin y J. C. B. Pita, “Hit distance and the predatory strike of the praying mantis”, *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, vol. 56, n.º 3, págs. 237-257, 1967, ISSN: 0340-7594, 1432-1351. DOI: 10.1007/BF00333669. dirección: <http://link.springer.com/10.1007/BF00333669> (visitado 26-09-2018).

## CAPÍTULO 16

---

Anexos

---

## 16.1. Código de MATLAB para llevar a cabo la simulación del prototipo

```
1 %  
2 Delbert Francisco Custodio Vargas  
3 Universidad del Valle de Guatemala  
4 Trabajo de Graduacion: Mecanismo bio–inspirado en la M.  
   religiosa  
5 %  
6  
7 %  
8 Opcion para revisar la posicion inicial del prototipo por  
   medio de la  
9 Robotics Toolbox de Peter Corke. Para este programa, la  
   posicion  
10 inicial del prototipo es la posicion de carga antes de  
   liberarse  
11  
12 J1 = Revolute('d',0 , 'a', 5, 'alpha', 0);  
13 J2 = Revolute('d',0 , 'a', 7.899, 'alpha', 0);  
14 J3 = Revolute('d',0 , 'a', 5.931, 'alpha', 0);  
15  
16 Mantis = SerialLink([J1, J2, J3], 'name', 'Manipulador');  
17 q0 = [ 140.3*pi/180, (-90.9)*pi/180, (32.5)*pi/180];  
18 Mantis.plot(q0, 'zoom', 1)  
19 Mantis.teach()  
20 %  
21  
22 %Variables simbolicas , donde q1, q2 y q3 representan los  
   valores  
23 %descritos en la seccion de Resultados  
24 syms q1 q2 q3 dq1 dq2 dq3  
25  
26  
27 %Matrices de rotacion tomando en cuenta los offset obtenidos  
   por medio de  
28 Denavit–Hartenberg; estos offset son distintos debido a que  
   sirven para  
29 %describir la geometria del manipulador como tal , y no la  
   forma inicial.  
30 rotz_1 = [ cos(q1+ (140.3*pi)/180), -sin(q1+ (140.3*pi)/180),  
            0, 0; sin(q1+ (140.3*pi)/180), ...  
            cos(q1+ (140.3*pi)/180), 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];  
31  
32 rotz_2 = [ cos(q2- (37.9*pi)/180), -sin(q2- (37.9*pi)/180),  
            0, 0; sin(q2- (37.9*pi)/180), ...  
            cos(q2- (37.9*pi)/180), 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];  
33
```

```

34 rotz_3 = [ cos(q3+ (176.5*pi)/180), -sin(q3+ (176.5*pi)/180),
           0, 0; sin(q3+ (176.5*pi)/180), ...
35           cos(q3+ (176.5*pi)/180), 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];
36
37 %Traslaciones en X en metros como parte de la notacion de DH
38 transl = transl(5/100, 0, 0);
39 trans2 = transl(7.899/100, 0, 0);
40 trans3 = transl(5.8202/100, 0, 0);
41
42 %Matrices de transformacion para cada una de las juntas
43 T1 = rotz_1*trans1; %Junta 2
44 T2 = T1*rotz_2*trans2; %Junta 3
45 T_ef = simplify(T2*rotz_3*trans3); %Efector Final
46
47 %Primeras 2 filas del Jacobiano
48 J1 = [ diff(T_ef(1,4), 'q1'), diff(T_ef(1,4), 'q2'), diff(T_ef
           (1,4), 'q3')];
49 J2 = [ diff(T_ef(2,4), 'q1'), diff(T_ef(2,4), 'q2'), diff(T_ef
           (2,4), 'q3')];
50
51 %Obtencion del Jacobiano de velocidad angular (cuando se
           necesite)
52 R = T_ef(1:3,1:3);
53 dR = simplify(diff(R, 'q1')*dq1+diff(R, 'q2')*dq2+diff(R, 'q3')*
           dq3);
54 Jw = vpa(vex(simplify(dR*R.)),2);
55
56 %En este caso, Jw = [ 1, 1, 1] porque solo existe rotacion
57 %en el eje Z
58 J = [J1; J2; 1, 1,1];
59
60
61 % %Constantes de Resortes en N*m/rad
62 k1 = 0.1476;
63 k2 = 0.1147;
64
65 % %Ciclo para calcular la fuerza en el efector final como
           funcion del
66 % tiempo
67
68 n = 500; %Cantidad de iteraciones que se haran para obtener
           las distintas
69 %fuerzas sobre el efector final
70
71 tau = simplify([0; k1*q2; k2*q3]); %La primer casilla es cero
           debido a que

```

```

72 %un cojinete se encuentra en esa posicion; las otras dos
    representan los
73 %resortes torsionales
74
75 %inicializacion del vector Range o de Fuerzas en x,y y
    Momentos en z
76 F = [0;0;0];
77
78 %Se utilizan los offsets desde que el mecanismo se encuentra
    cargado
79 q1 = 140.3*pi/180;
80 q2 = ((-90.9*pi)/180);
81 q3 = (32.5*pi)/180 ;
82 tau_2 = [0;0;0];
83 for i = 1:n
84
85
86
87     %Se define un paso del desfase maximo/n
88     q1 = q1 + (69.7*pi/180)/n;
89
90     %La junta 2 tiende a terminar su recorrido antes de que
        la junta 1 lo
91     %haga por lo que el paso es mas grande
92     q2 = q2 + ( 50.1*pi/180)/(0.8148*n);
93
94     %La junta 3 termina su recorrido antes de que la junta 1
        y 2 lo hagan
95     q3 = q3 + (146.4*pi/180)/(0.5833*n);
96
97     %Se definen los limites en los que actuan los topes
        mecanicos
98     if (i >= round(0.8148*n))
99         q2 = (-90.9+50.1)*pi/180;
100        tau(2,1) = 0;
101     end
102
103     if (i >= round(0.5833*n))
104         q3 = (32.5+146.4)*pi/180;
105        tau(3,1) = 0;
106     end
107
108     F = [F, (subs(J)^-1).'*subs(tau)]; %obtencion de las
        fuerzas y momento
109     tau_2 = [tau_2 ,subs(tau)];
110 end

```

```

111 % size(tau_2)
112 [x,y] =size(F);
113 Fx = 0;
114 Fy = 0;
115 F_tot = 0;
116 for i= 2:y
117     Fx = [Fx, F(1,i)];
118     Fy = [Fy, F(2,i)];
119     F_tot = [F_tot, sqrt(Fx(1,i)^2 + Fy(1,i)^2)*tan(Fy(1,i)/
        Fx(1,i))];
120 end
121
122 t = [0:108.0/n:108];
123 figure
124 plot(t,tau_2(1,:))
125 title('Magnitud del torque en la Junta 1');
126 xlabel('Tiempo (mS)');
127 ylabel('T_1 (N m)');
128 figure
129 plot(t,tau_2(2,:))
130 title('Magnitud del torque en la Junta 2');
131 xlabel('Tiempo (mS)');
132 ylabel('T_2 (N m)');
133 figure
134 plot(t,tau_2(3,:))
135 title('Magnitud del torque en la Junta 3');
136 xlabel('Tiempo (mS)');
137 ylabel('T_3 (N m)');
138 figure
139 plot(t,F_tot)
140 title('Magnitud de la Fuerza en el efector final');
141 xlabel('Tiempo (mS)');
142 ylabel('F_total (N)');
143 figure
144 plot(t,Fx)
145 title('Fuerza en X en el efector final');
146 xlabel('Tiempo (mS)');
147 ylabel('F_x (N)');
148 figure
149 plot(t,Fy)
150 title('Fuerza en Y en el efector final');
151 xlabel('Tiempo (mS)');
152 ylabel('F_y (N)');
153
154 %
155

```

```

156 %Opcion para visualizar la pose final del prototipo
157
158 J1 = Revolute('d',0 , 'a', 5, 'alpha', 0);
159 J2 = Revolute('d',0 , 'a', 7.899, 'alpha',0);
160 J3 = Revolute('d',0 , 'a', 5.931, 'alpha',0);
161
162
163 Mantis2 = SerialLink([J1, J2, J3], 'name', 'Manipulador');
164 q0 = [ q1, q2, q3];
165 Mantis2.plot(q0, 'zoom',1)
166 Mantis2.teach()
167 %

```

## 16.2. Cinemática directa y Jacobiano analítico

```

[      sin(q1 + q2 + q3 + 0.16), cos(q1 + q2 + q3 + 0.16),    0, 0.058*sin(q1 + q2 + q3 + 0.16) - 0.079*sin(q1 + q2 + 0.22) - 0.05*sin(q1 + 0.88)]
[ -1.0*cos(q1 + q2 + q3 + 0.16), sin(q1 + q2 + q3 + 0.16),    0, 0.079*cos(q1 + q2 + 0.22) - 0.058*cos(q1 + q2 + q3 + 0.16) + 0.05*cos(q1 + 0.88)]
[      0,      0, 1.0,      0]
[      0,      0,      0, 1.0]

```

Figura 61: Cinemática directa obtenida de MATLAB

```

[ 0.058*cos(q1 + q2 + q3 + 0.16) - 0.079*cos(q1 + q2 + 0.22) - 0.05*cos(q1 + 0.88), 0.058*cos(q1 + q2 + q3 + 0.16) - 0.079*cos(q1 + q2 + 0.22), 0.058*cos(q1 + q2 + q3 + 0.16)]
[ 0.058*sin(q1 + q2 + q3 + 0.16) - 0.079*sin(q1 + q2 + 0.22) - 0.05*sin(q1 + 0.88), 0.058*sin(q1 + q2 + q3 + 0.16) - 0.079*sin(q1 + q2 + 0.22), 0.058*sin(q1 + q2 + q3 + 0.16)]
[      1.0,      1.0,      1.0]

```

Figura 62: Cinemática diferencial obtenida de MATLAB

### 16.3. Ejemplos de geometrías utilizadas

#### Geometrías no recomendadas

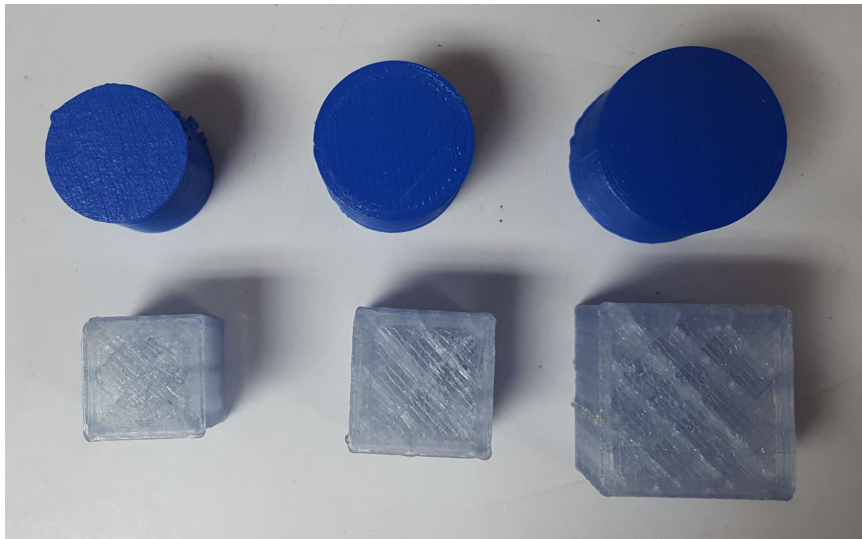


Figura 63: Geometrías no recomendadas (set 1)

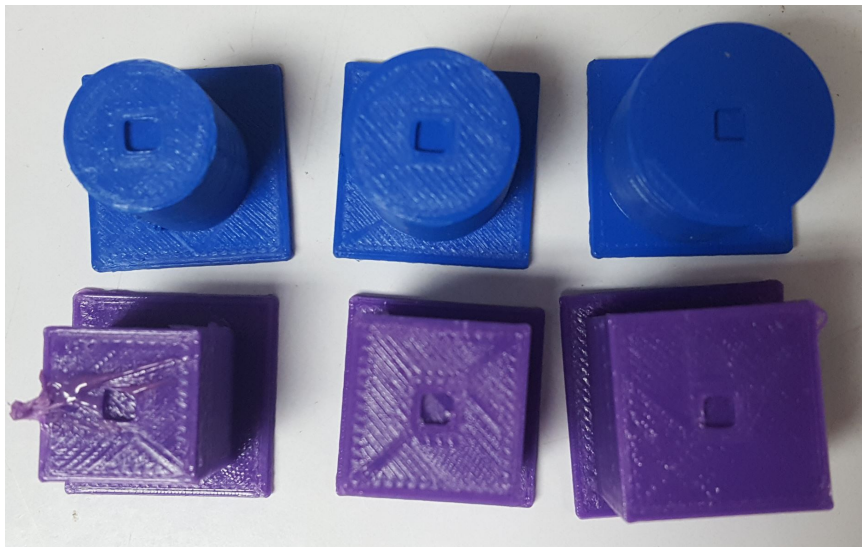


Figura 64: Geometrías no recomendadas (set 2)

## Geometrías recomendadas

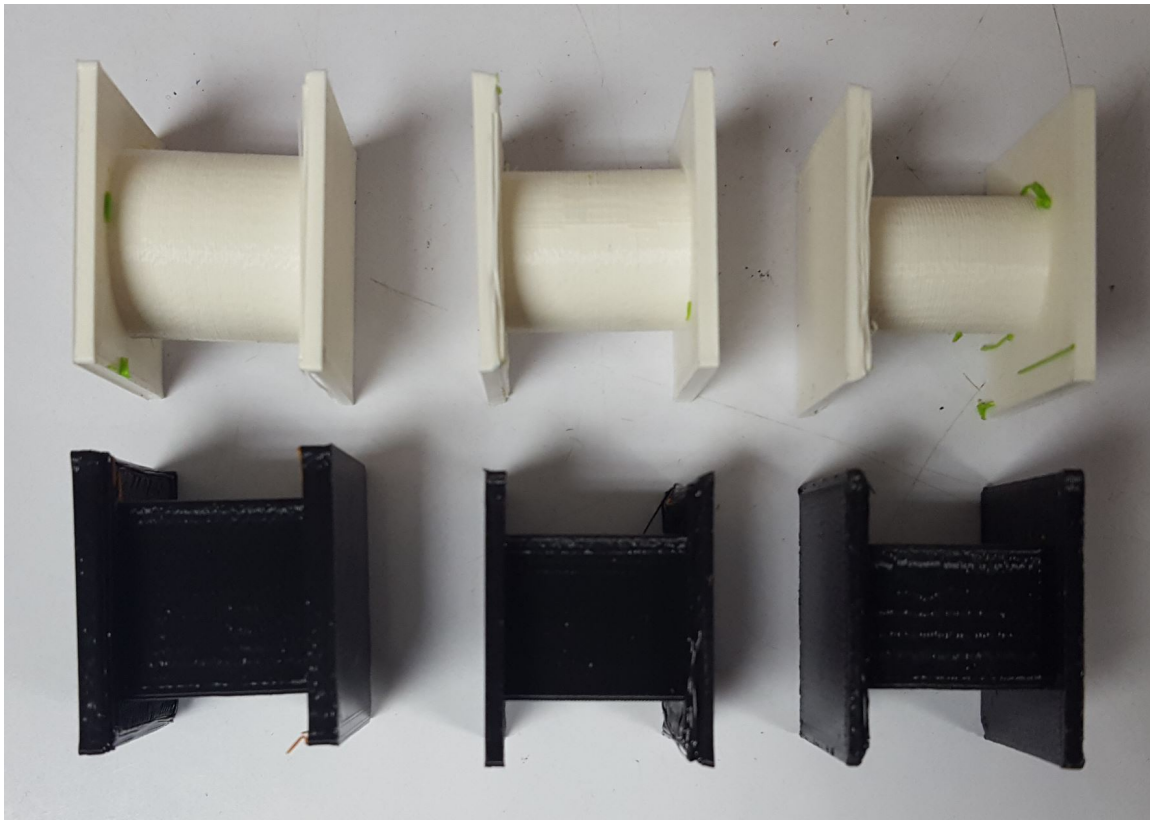


Figura 65: Geometrías recomendadas para su captura

## 16.4. Resultados prueba ANOVA

A continuación se detallan las tablas obtenidas para la realización de la prueba ANOVA en Excel. Dichas tablas contienen los valores obtenidos por medio de la pestaña de Análisis, y es necesario indicar que cada réplica del experimento constó de 10 repeticiones. Es importante hacer notar que el porcentaje de éxito mostrado se basa solamente en relacionar las capturas exitosas con el total de la muestra, que en este caso fue de 40 muestras por cada posición. Dichas posiciones se numeraron de derecha a izquierda, de arriba hacia abajo en una matriz de  $5 \times 6$ .

Posición	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Probabilidad de éxito
P1	6	5	6	5	0.550
P2	5	4	3	4	0.400
P3	2	2	4	5	0.325
P4	4	3	6	5	0.450
P5	5	3	4	3	0.375
P6	4	1	5	5	0.375
P7	4	3	3	3	0.325
P8	5	5	6	4	0.500
P9	7	3	7	5	0.550
P10	5	3	2	2	0.300
P11	2	1	3	3	0.225
P12	4	6	0	3	0.325
P13	6	5	6	3	0.500
P14	6	6	4	3	0.475
P15	7	6	4	6	0.575
P16	5	4	4	4	0.425
P17	6	4	6	8	0.600
P18	4	6	5	4	0.475
P19	4	5	3	4	0.400
P20	0	0	1	0	0.025
P21	5	3	3	4	0.375
P22	6	6	5	6	0.575
P23	0	0	3	4	0.175
P24	0	0	0	0	0.000
P25	0	0	0	0	0.000
P26	5	7	2	1	0.375
P27	1	3	3	2	0.225
P28	0	0	0	0	0.000
P29	0	0	0	0	0.000
P30	0	0	0	0	0.000

Cuadro 6: Réplicas obtenidas para el estudio ANOVA para el objeto 1

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
P1	4	22	5.500	0.333
P2	4	16	4.000	0.667
P3	4	13	3.250	2.250
P4	4	18	4.500	1.667
P5	4	15	3.750	0.917
P6	4	15	3.750	3.583
P7	4	13	3.250	0.250
P8	4	20	5.000	0.667
P9	4	22	5.500	3.667
P10	4	12	3.000	2.000
P11	4	9	2.250	0.917
P12	4	13	3.250	6.250
P13	4	20	5.000	2.000
P14	4	19	4.750	2.250
P15	4	23	5.750	1.583
P16	4	17	4.250	0.250
P17	4	24	6.000	2.667
P18	4	19	4.750	0.917
P19	4	16	4.000	0.667
P20	4	1	0.250	0.250
P21	4	15	3.750	0.917
P22	4	23	5.750	0.250
P23	4	7	1.750	4.250
P24	4	0	0.000	0.000
P25	4	0	0.000	0.000
P26	4	15	3.750	7.583
P27	4	9	2.250	0.917
P28	4	0	0.000	0.000
P29	4	0	0.000	0.000
P30	4	0	0.000	0.000

Cuadro 7: Resultados obtenidos para la prueba ANOVA en Excel para el objeto 1

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	4.462	29	0.153862	9.683627	3.59144E-17	1.593489
Within Groups	1.430	90	0.015889			
Total	5.892	119				

Cuadro 8: Resumen del análisis ANOVA obtenido por medio de Excel para el objeto 1

Posición	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Probabilidad de éxito
P1	4	8	5	6	0.575
P2	5	5	7	7	0.600
P3	5	8	5	4	0.550
P4	4	4	3	4	0.375
P5	3	1	2	2	0.200
P6	5	3	4	5	0.425
P7	4	9	2	3	0.450
P8	2	10	4	7	0.575
P9	5	9	6	5	0.625
P10	4	3	4	5	0.400
P11	6	7	6	8	0.675
P12	5	8	6	5	0.600
P13	8	6	5	4	0.575
P14	6	3	5	5	0.475
P15	0	0	0	2	0.050
P16	5	5	1	4	0.375
P17	5	5	4	1	0.375
P18	7	8	2	5	0.550
P19	1	0	0	0	0.025
P20	0	0	0	0	0.000
P21	6	8	8	7	0.725
P22	6	5	3	5	0.475
P23	0	0	0	0	0.000
P24	0	0	0	0	0.000
P25	0	0	0	0	0.000
P26	2	1	0	0	0.075
P27	1	0	0	0	0.025
P28	0	0	0	0	0.000
P29	0	0	0	0	0.000
P30	0	0	0	0	0.000

Cuadro 9: Réplicas utilizadas para el estudio ANOVA para el objeto 2

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
P1	4	23	5.750	2.917
P2	4	24	6.000	1.333
P3	4	22	5.500	3.000
P4	4	15	3.750	0.250
P5	4	8	2.000	0.667
P6	4	17	4.250	0.917
P7	4	18	4.500	9.667
P8	4	23	5.750	12.250
P9	4	25	6.250	3.583
P10	4	16	4.000	0.667
P11	4	27	6.750	0.917
P12	4	24	6.000	2.000
P13	4	23	5.750	2.917
P14	4	19	4.750	1.583
P15	4	2	0.500	1.000
P16	4	15	3.750	3.583
P17	4	15	3.750	3.583
P18	4	22	5.500	7.000
P19	4	1	0.250	0.250
P20	4	0	0.000	0.000
P21	4	29	7.250	0.917
P22	4	19	4.750	1.583
P23	4	0	0.000	0.000
P24	4	0	0.000	0.000
P25	4	0	0.000	0.000
P26	4	3	0.750	0.917
P27	4	1	0.250	0.250
P28	4	0	0.000	0.000
P29	4	0	0.000	0.000
P30	4	0	0.000	0.000

Cuadro 10: Resultados obtenidos para la prueba ANOVA en Excel para el objeto 2

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	787.7417	29	27.16351	13.19684	1.5529E-21	1.593489
Within Groups	185.2500	90	2.058333			
Total	972.9917	119				

Cuadro 11: Resumen del análisis ANOVA obtenido por medio de Excel para el objeto 2

## 16.5. Regresiones obtenidas para los resortes torsionales

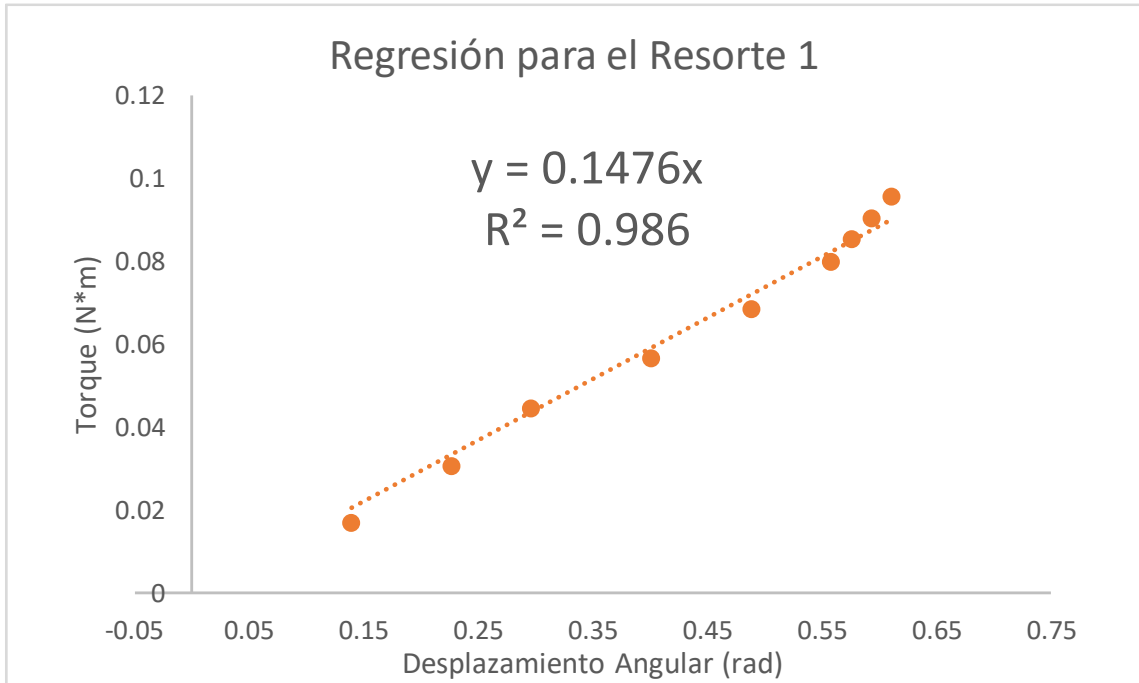


Figura 66: Regresión para el resorte 1

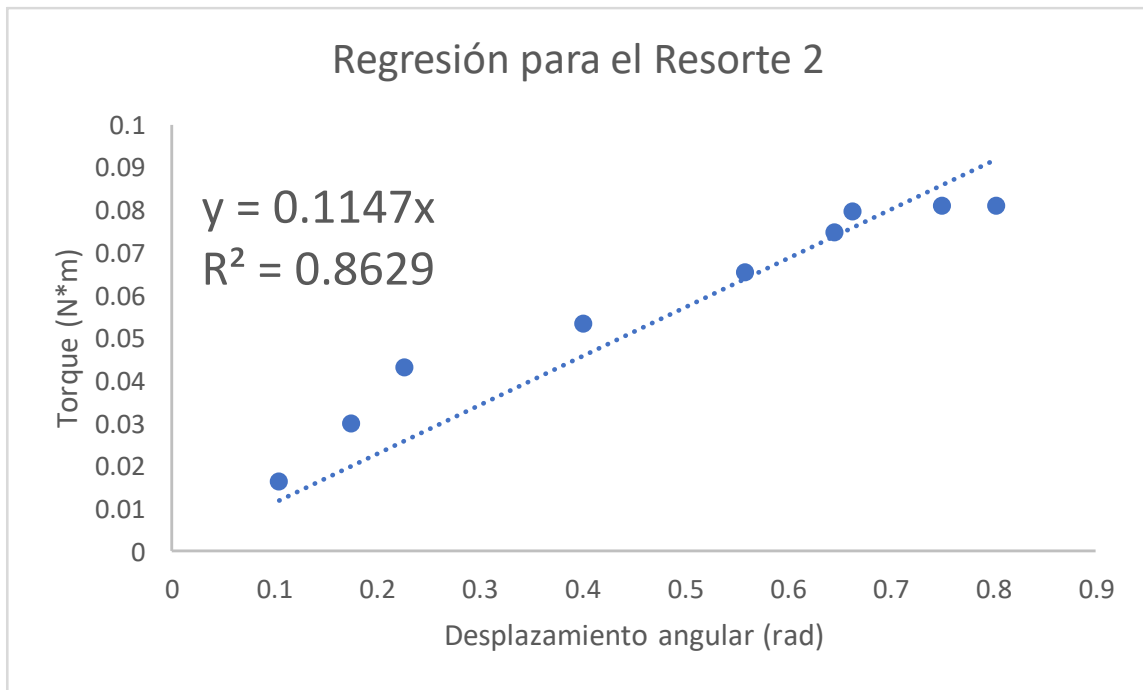


Figura 67: Regresión para el resorte 2

## 16.6. Videos en Youtube

A continuación se incluye un link el cual su finalidad es brindar acceso a una Lista de Reproducción en el sitio Youtube para observar el funcionamiento del mecanismo: Mecnismo Bio-Inspirado en la *Mantis Religiosa*

## 16.7. Planos

Al final de este documento se integran los planos para el mecanismo 7.

***Mantis religiosa*** es un insecto perteneciente al orden Mantodea, cuya definición se deriva de la palabra griega para profeta o vidente [4].. 13

**ANOVA** es una prueba estadística para comparar las varianzas poblacionales y determinar si estas son iguales o no [12]. 35, 36, 65–67

**Cadena abierta** son todos aquellos mecanismos que no forman contornos cerrados con sus eslabones [8]. 3, 4, 51

**Cadena cerrada** son todos aquellos mecanismos que crean una cadena cinemática que forma uno o varios contornos considerados cerrados [8]. 5, 17, 40

**Chela** es una de dos clasificaciones para los tipos de extremidades raptoriales [6]. 15

**Cinemática Diferencial** descripción de los cambios infinitesimales de un cuerpo rígido; utiliza el Jacobiano. 29

**cinemática directa de un manipulador** es el estudio de los aspectos geométricos y temporales del movimiento de un manipulador sin tomar en cuenta las causas de éste. 24

**Coxa** parte de la morfología de la extremidad raptorial de la *Mantis religiosa*, y se considera como el segundo segmento que conforma a las extremidades frontales de ésta. 41, 43, 44, 66

**extremidad raptorial** se conoce así a todas aquellas extremidades que se especializan en la captura de objetos o presas. 17, 18

**fulcro** es el punto de apoyo de una palanca. 15, 16

**fémur** forma parte de la morfología de la extremidad raptorial de la *Mantis religiosa*, y se considera como el tercer eslabón de la misma. 14, 15, 19

**gearing** es la relación que describe la velocidad de una estructura esquelética al liberarse un músculo previamente contraído [5] . 16–18

**Intervalo de Confianza** es el intervalo en el cuál se estima que estará un número con cierta probabilidad, basado en una muestra y es válido para parámetros de índole poblacional [12]. 35, 66

**Jacobiano** representación de la geometría de los elementos de un mecanismo en el tiempo. 29, 32, 62, 64

**juntas** son las conexiones entre dos o más eslabones por medio de los nodos de éstos, y permitir así el movimiento de dichos eslabones[8]. 23, 24, 27, 29, 34

**manipulador** Serial: término utilizado en robótica para describir una serie de eslabones en serie unidos por juntas revolutas con la finalidad de manipular objetos [9]. 11, 40, 48, 52, 60, 64

**Mantidae** es la familia a la que pertenece la *Mantis religiosa*. 13

**MantisBot** es una plataforma desarrollada por [1] en Case Western Reserve University. 3

**matriz de transformación** representa una transformación de coordenadas desde un marco de referencia A hasta un marco de referencia B. 25

**mecanismo** es un dispositivo que se encarga de transformar un movimiento en un patrón deseable sin generar niveles de fuerzas o energía significativos [8]. 23, 29, 30, 32, 34, 44, 45, 47

**máquina** es el conjunto de mecanismos que fueron diseñados para producir fuerzas y niveles de energía significativos. 23

**Método del Trabajo Virtual** es un método que relaciona las fuerzas y momentos que se encuentran en las juntas de un manipulador con los desplazamientos de las mismas. [10]. 32

**nivel de significación estadística**  $\alpha$  nos permite determinar la significancia estadística de un estudio poblacional. 35, 66

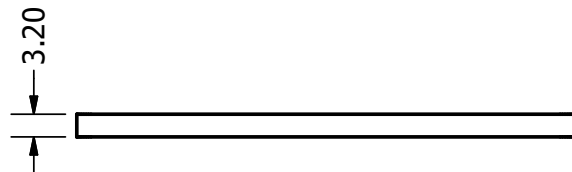
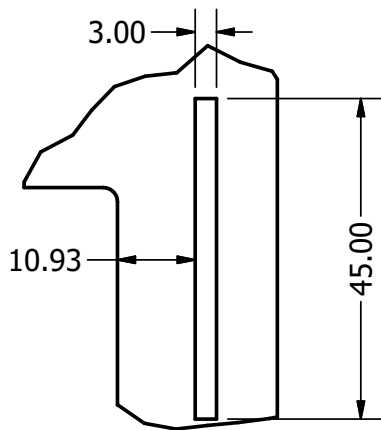
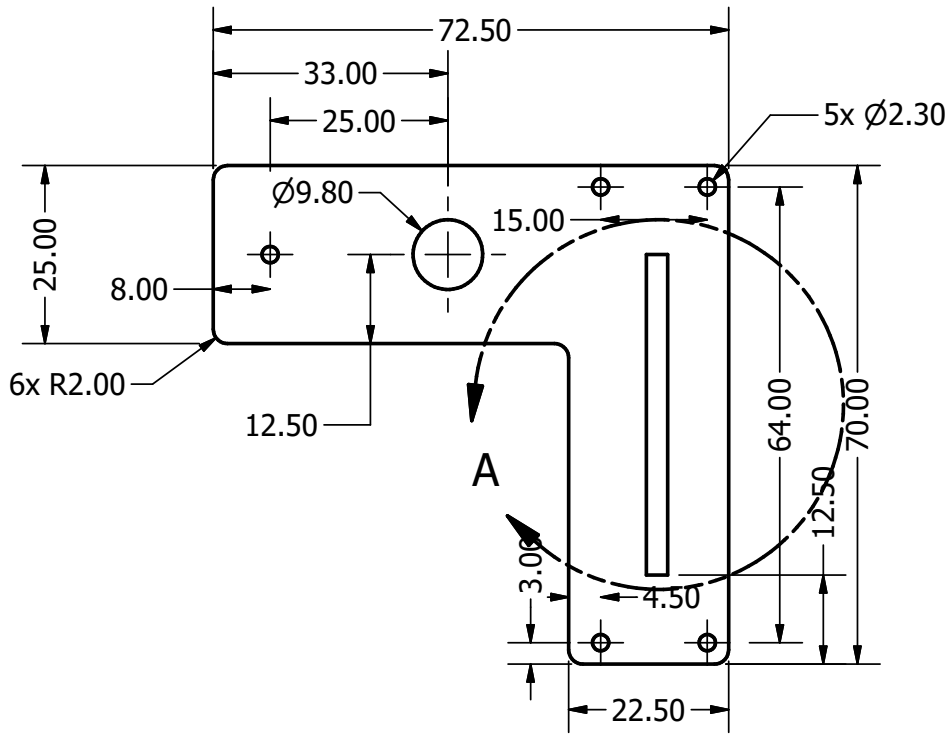
**prototórax** es el primero de los tres segmentos que conforman el tórax de los insectos [4] . 13, 40

**Sub-Chela** es la clasificación de la extremidad raptorial de la *Mantis religiosa* y sirven para apresar o capturar presas u objetos [6]. 15, 39

**tarsus** se considera como el último eslabón de la cadena cinemática que describe a la extremidad raptorial de la *Mantis religiosa*. 19

**tibia** forma parte de la morfología de la extremidad raptorial de la *Mantis religiosa*, y se considera como el quinto eslabón de la misma. 15, 18, 19, 43, 44, 55, 56

**trocánter** se considera como la junta que se encarga de unir la coxa y el fémur de la *Mantis religiosa* . 19



DETAIL A  
SCALE 1 : 1

TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±  
.XX ± 0.2  
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR  
**Delbert Custodio**      FECHA  
**05/10/2018**

DISEÑADO POR  
**Delbert Custodio**      FECHA  
**05/10/2018**

REVISADO POR  
**NA**      FECHA  
**NA**

APROBADO POR  
**NA**      FECHA  
**NA**

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Mecanismo Bio-Inspirado M. Religiosa**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
info@uvg.edu.gt

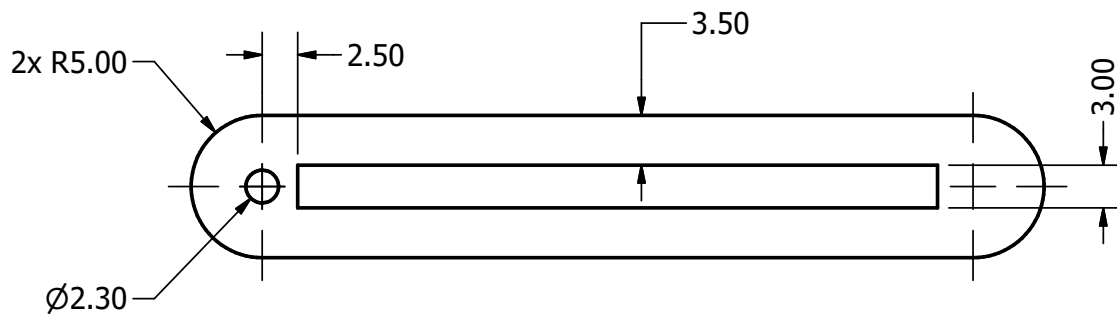
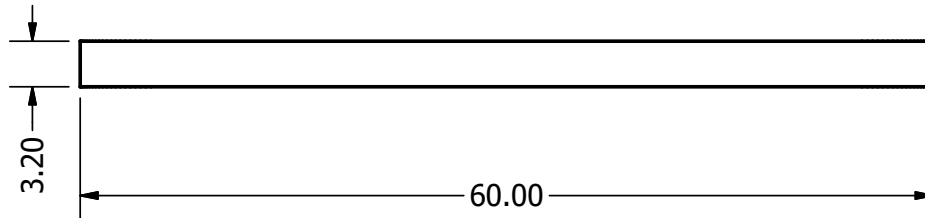
TÍTULO:  
**Eslabón 1  
(Tierra)**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

MATERIAL  
**Generic**  
TRATAMIENTO  
  
MASA: N/A



FORMATO  
**A4**      ESCALA: 1:1      UNIDADES: mm  
PÁGINA 1 DE 8      REV



TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES  
 LINEAL .X ±  
 .XX ± 0.2  
 .XXX ±  
 ANGULAR ±  
 FRACCIONES ±  
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR  
 Delbert Custodio  
 FECHA  
 05/10/2018

DISEÑADO POR  
 Delbert Custodio  
 FECHA  
 05/10/2018

REVISADO POR  
 NA  
 FECHA

APROBADO POR  
 NA  
 FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
 Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:  
 Eslabón 2  
 (Soporte)

NÚMERO DE DIBUJO: 2

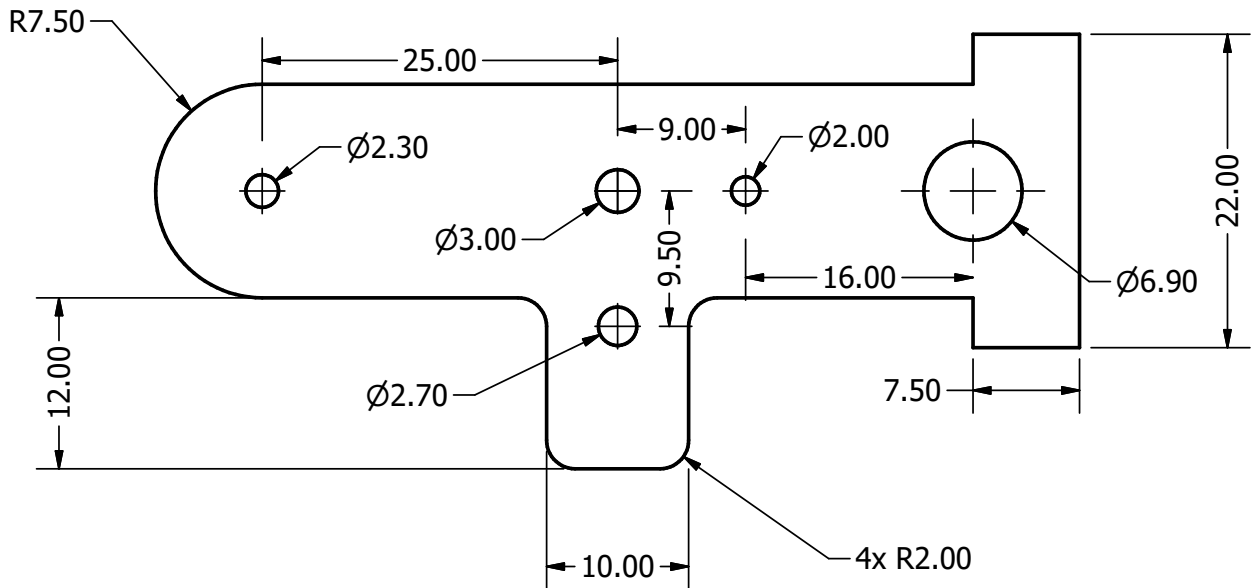
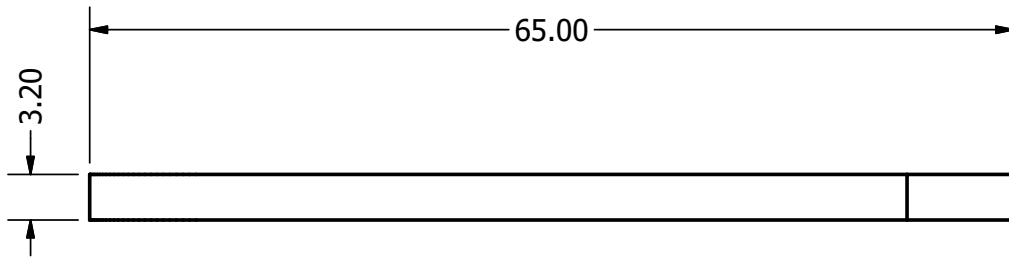
MATERIAL  
 Generic  
 TRATAMIENTO  
 MASA: N/A



FORMATO  
 A4

ESCALA: 2:1  
 PÁGINA 2 DE 8

UNIDADES: mm  
 REV



TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±  
.XX ± 0.2  
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

DISEÑADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

REVISADO POR **NA** FECHA

APROBADO POR **Na** FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Eslabón 3 (Coxa)**

NÚMERO DE DIBUJO: **3**

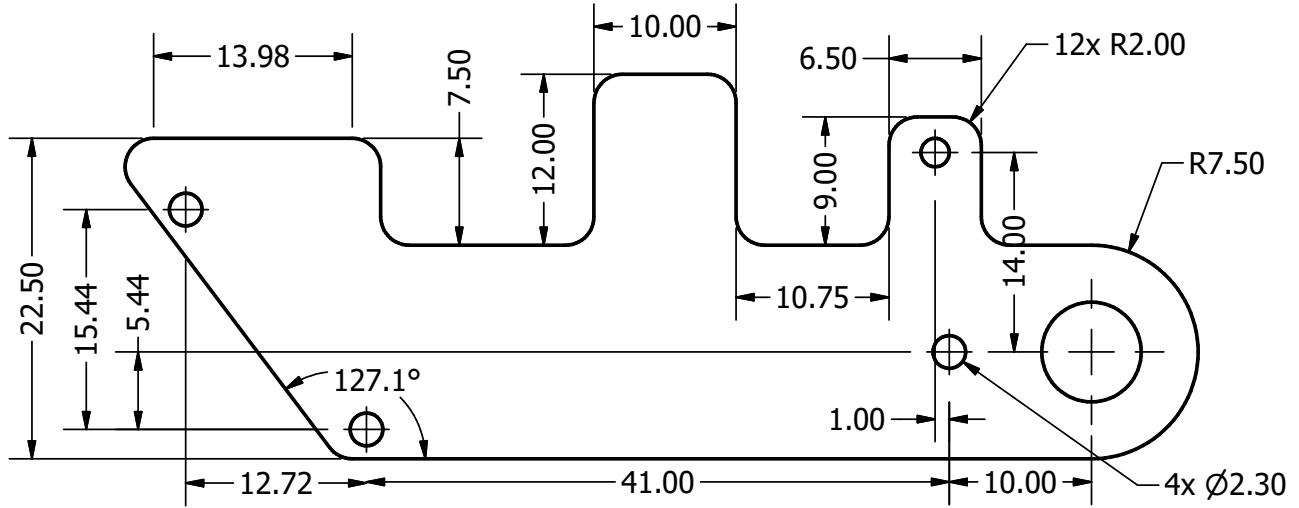
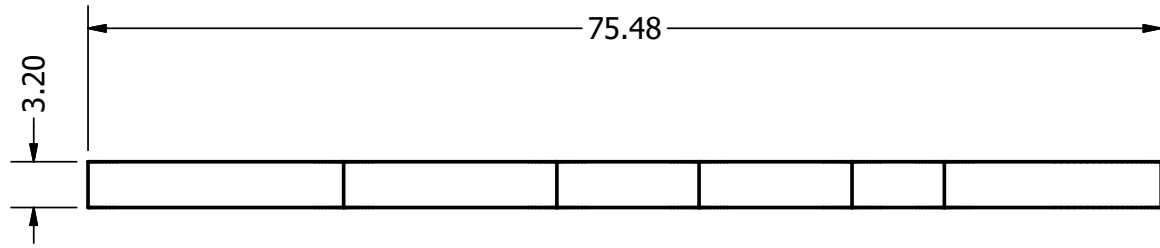
MATERIAL  
**Generic**  
TRATAMIENTO  
  
MASA: **N/A**



FORMATO  
**A4**

ESCALA:  
**PÁGINA 3 DE 8**

UNIDADES: mm  
REV



TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.

**TOLERANCIAS GENERALES**


LINEAL .X ±  
.XX ± 0.2  
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR <b>Delbert Custodio</b>	FECHA <b>05/10/2018</b>
DISEÑADO POR <b>Delbert Custodio</b>	FECHA <b>05/10/2018</b>
REVISADO POR <b>NA</b>	FECHA
APROBADO POR <b>NA</b>	FECHA



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Eslabón 4 (Fémur)**

MATERIAL  
**Generic**

TRATAMIENTO

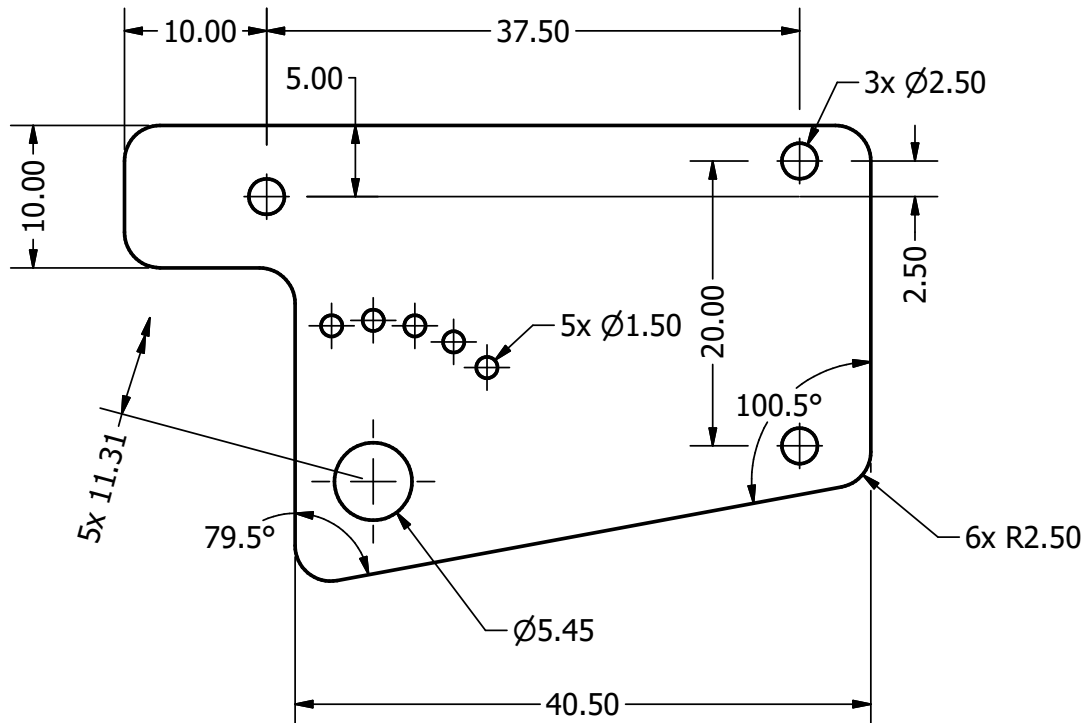
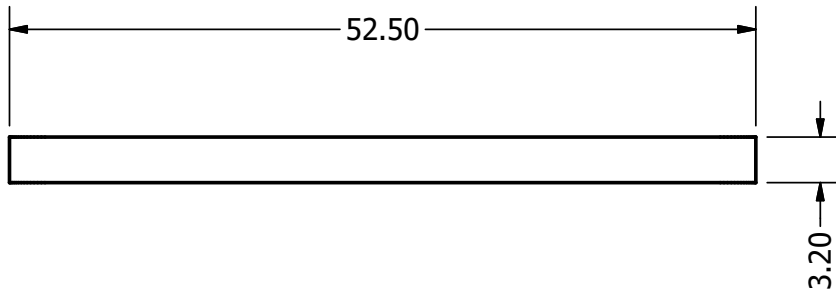
MASA: **N/A**



NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

NÚMERO DE DIBUJO: <b>4</b>	FORMATO <b>A4</b>	ESCALA: <b>2:1</b>	UNIDADES: <b>mm</b>
		PÁGINA <b>4</b> DE <b>8</b>	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

**TOLERANCIAS GENERALES**

LINEAL .X ±  
.XX ± 0.2  
.XXX ±  
ANGULAR ±  
FRACCIONES ±  
RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

DISEÑADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

REVISADO POR **NA** FECHA

APROBADO POR **NA** FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Eslabón 5 (Tope Mecánico)**

NÚMERO DE DIBUJO: **5**

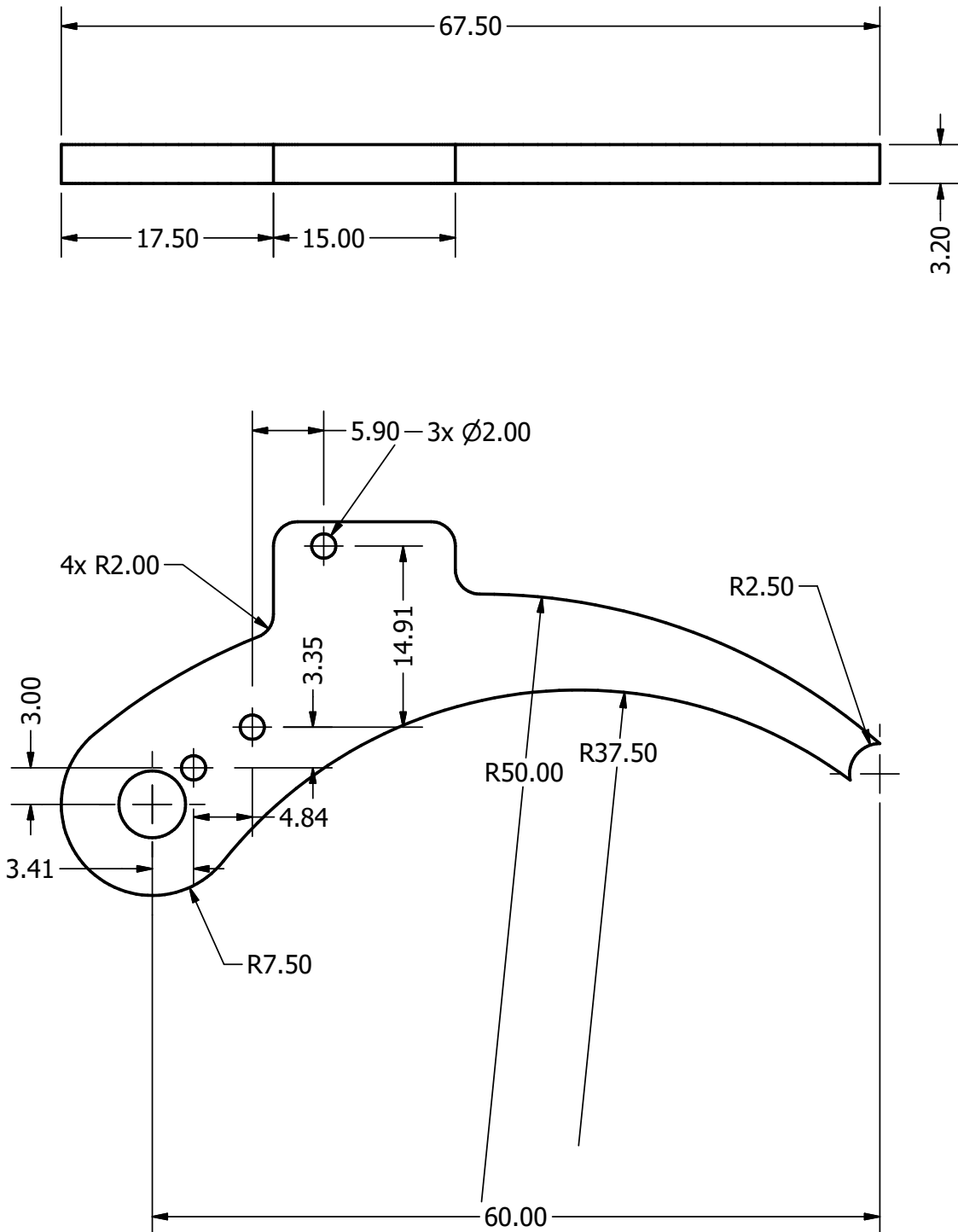
MATERIAL  
**Generic**  
TRATAMIENTO  
  
MASA: **N/A**



FORMATO  
**A4**

ESCALA: **2:1**  
PÁGINA **5** DE **8**

UNIDADES: **mm**  
REV



TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

**TOLERANCIAS GENERALES**  
 LINEAL .X ±  
 .XX ± 0.2  
 .XXX ±  
 ANGULAR ±  
 FRACCIONES ±  
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

DISEÑADO POR **Delbert Custodio** FECHA **05/10/2018**

REVISADO POR **NA** FECHA

APROBADO POR **NA** FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 info@uvg.edu.gt

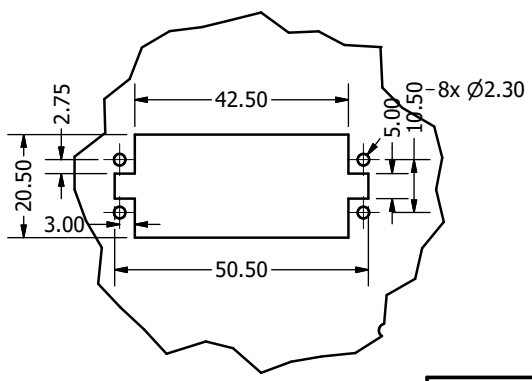
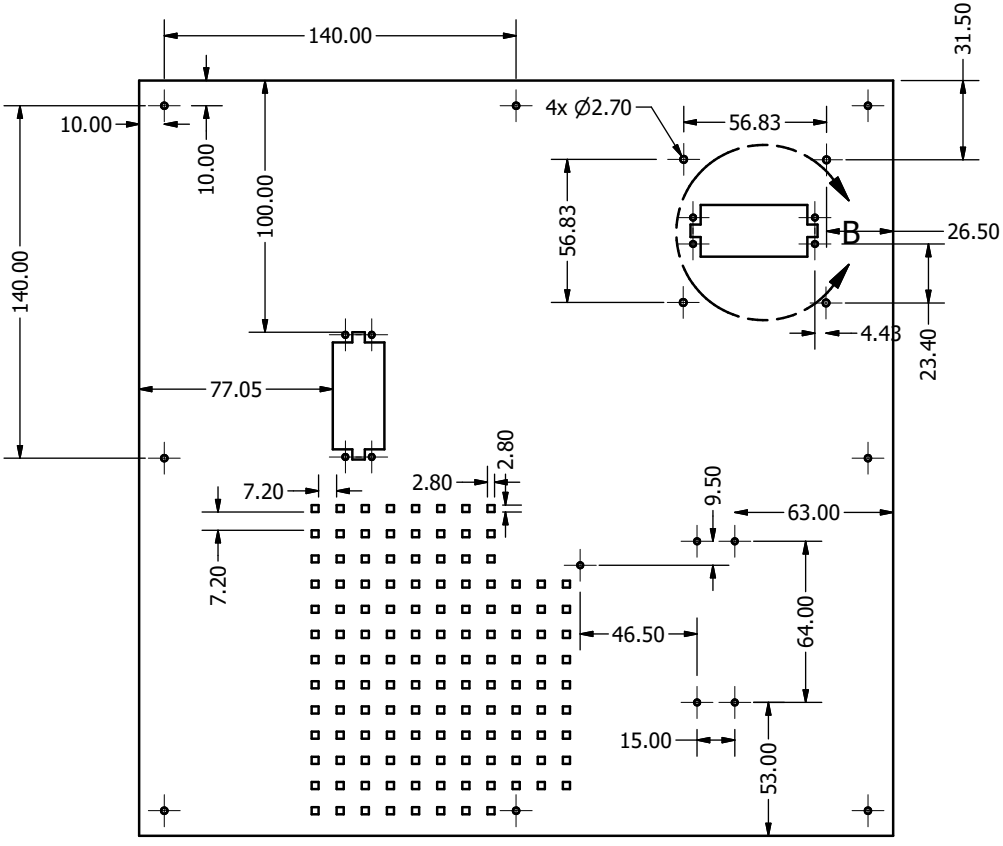
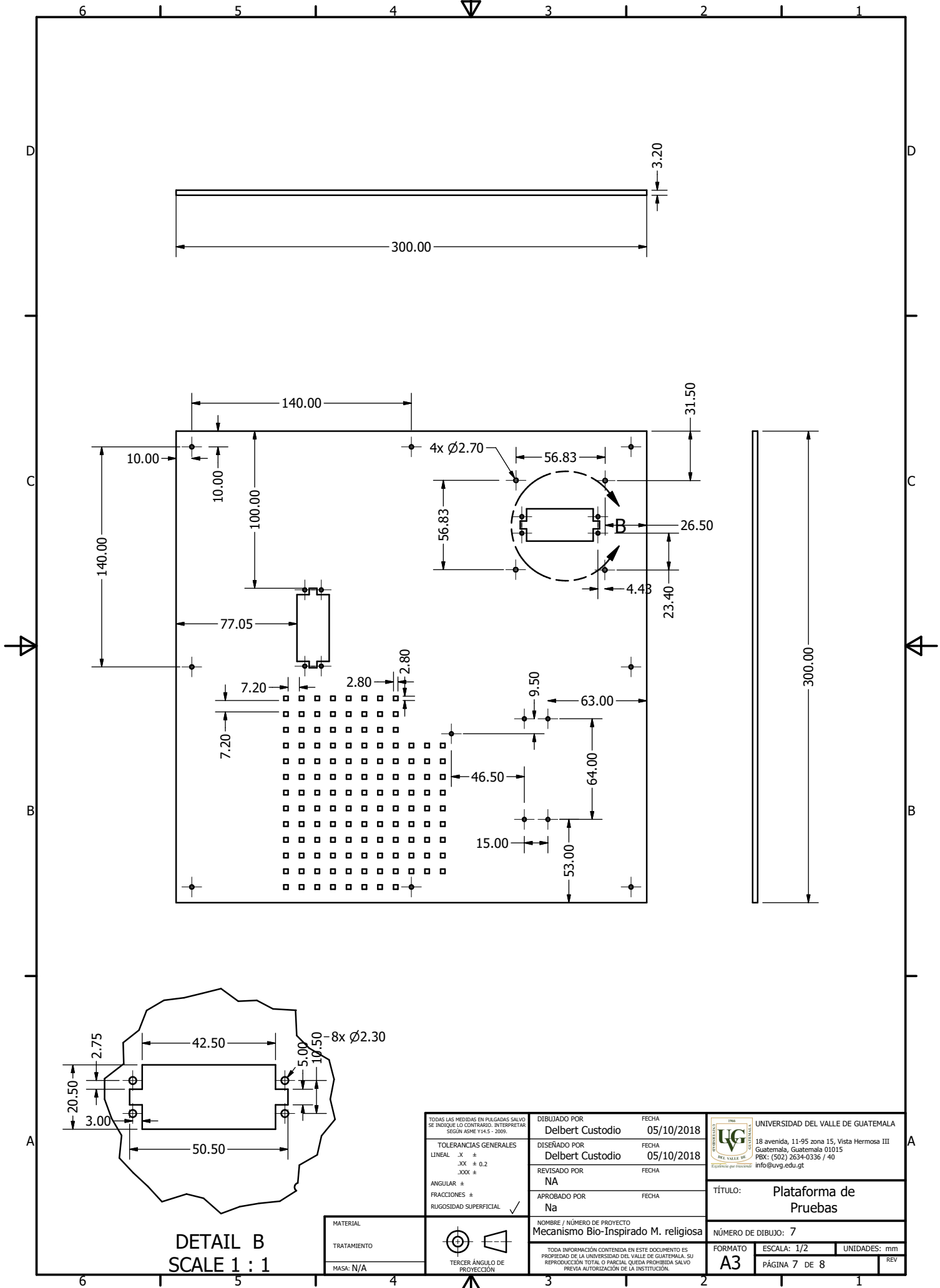
TÍTULO: **Eslabón 6 (Tibia / Garra)**

NÚMERO DE DIBUJO: **6**

MATERIAL **Generic**  
 TRATAMIENTO  
 MASA: **N/A**



FORMATO **A4** ESCALA: **2:1** UNIDADES: **mm**  
 PÁGINA **6** DE **8** REV



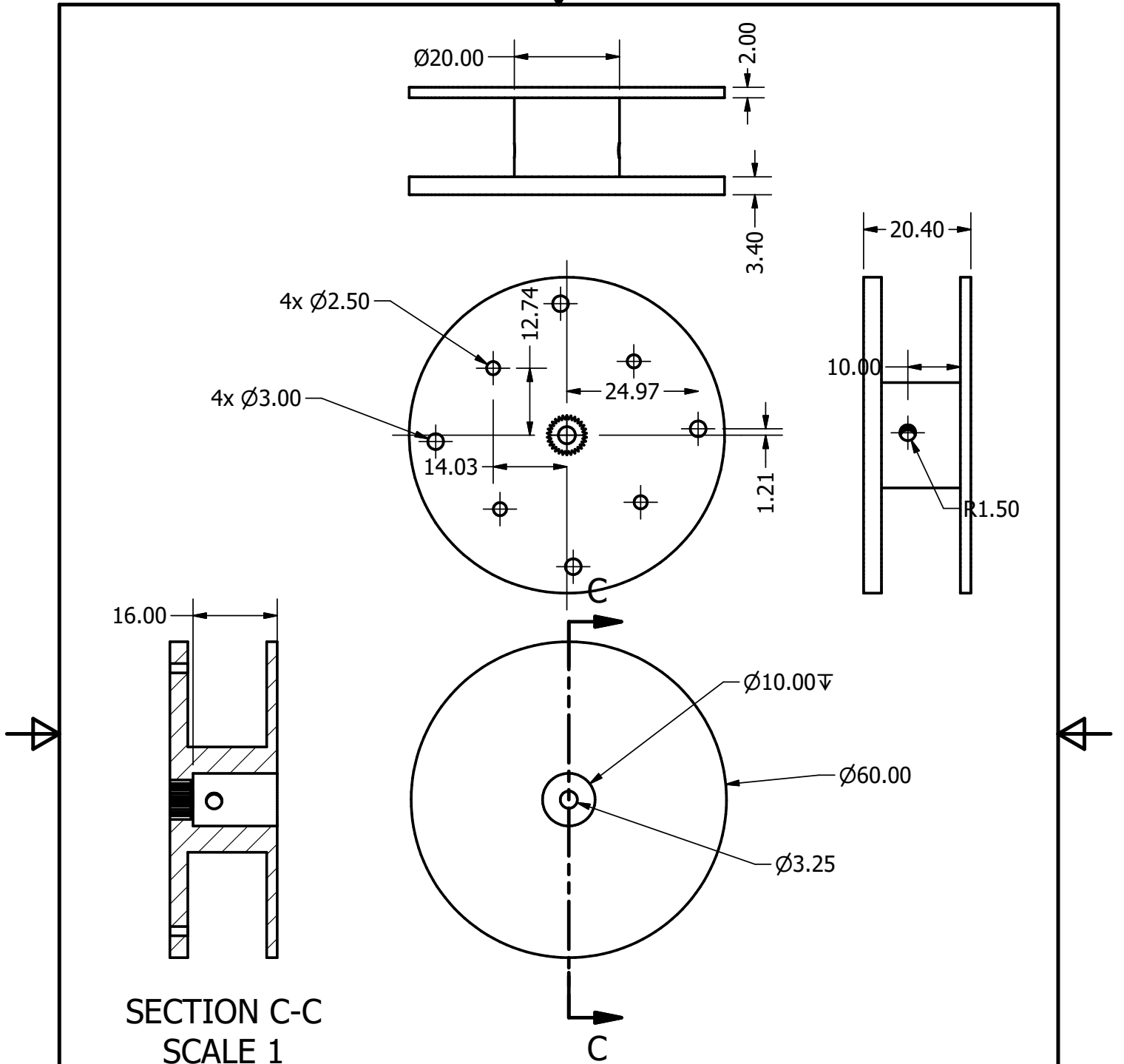
DETAIL B  
SCALE 1 : 1

MATERIAL	
TRATAMIENTO	
MASA: N/A	

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ± 0.2
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

DIBUJADO POR	Delbert Custodio	FECHA	05/10/2018
DISEÑADO POR	Delbert Custodio	FECHA	05/10/2018
REVISADO POR	NA	FECHA	
APROBADO POR	Na	FECHA	
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO			
Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa			
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL, QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.			

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA		
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III		
Guatemala, Guatemala 01015		
PBX: (502) 2634-0336 / 40		
info@uvvg.edu.gt		
TÍTULO: Plataforma de Pruebas		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 1/2	UNIDADES: mm
A3	PÁGINA 7 DE 8	REV



SECTION C-C  
SCALE 1

TODAS LAS MEDIDAS EN PULGADAS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±  
.XX ± 0.5  
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR  
Delbert Custodio

FECHA  
05/10/2018

DISEÑADO POR  
Delbert Custodio

FECHA  
05/10/2018

REVISADO POR  
NA

FECHA

APROBADO POR  
NA

FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
Mecanismo Bio-Inspirado M. religiosa

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
info@uvg.edu.gt

TÍTULO:  
Carrete para Carga

NÚMERO DE DIBUJO: 8

FORMATO  
A4

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

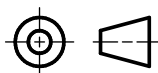
PÁGINA 8 DE 8

REV

MATERIAL

TRATAMIENTO

MASA: N/A



TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN