



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA**

---

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES.**

**BIOINSPIRACIÓN ROBÓTICA PARA INTEGRACIÓN MECÁNICA DE UN  
ROBOT MURCIÉLAGO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTA:**

**JHONATAN VICTORINO AGUILAR**

**ASESORES:**

**DR. OMAR ARTURO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ**

**DR. ALBERTO ENRIQUE ROJAS MARTÍNEZ**

**M. EN C. JUAN DANIEL RAMÍREZ ZAMORA**

**MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO A 27 DE JULIO DE 2017**



ICBI-AACyE/937/2017

**P.D.I.E.T. JHONATAN VICTORINO AGUILAR**  
**PRESENTE.**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación "BIOINSPIRACIÓN ROBÓTICA PARA INTEGRACIÓN MECÁNICA DE UN ROBOT MURCIÉLAGO" y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

<b>PRESIDENTE:</b>	Dr. Alberto Enrique Rojas Martínez	
<b>PRIMER VOCAL:</b>	Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez	
<b>SEGUNDO VOCAL:</b>	M. en C. Kristian Freyri Maya Gress	
<b>TERCER VOCAL:</b>	M. en C. Víctor Eduardo Pedraza Vera	
<b>SECRETARIO:</b>	Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas	
<b>PRIMER SUPLENTE:</b>	Ing. Benigno Martínez Gutiérrez	
<b>SEGUNDO SUPLENTE:</b>	Ing. Claudio Iván Duran Marroquín	

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE.**  
**"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"**  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 17 de Junio del 2017.

**Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas**  
 Coordinador de la Licenciatura en **Ingeniería en Telecomunicaciones**  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Área Académica de Computación y Electrónica

EGR/pov

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 ext. 6320



[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)



Jhonatan Victorino Aguilar

**BIOINSPIRACIÓN  
ROBÓTICA PARA  
INTEGRACIÓN  
MECÁNICA DE UN  
ROBOT MURCIÉLAGO**

# Resumen

## BIOINSPIRACIÓN ROBÓTICA PARA INTEGRACIÓN MECÁNICA DE UN ROBOT MURCIÉLAGO

Este trabajo de investigación se enfoca a la construcción de un prototipo de robot murciélago, el cual está basado en un análisis de su morfología así como la asistencia y recomendaciones acerca del movimiento y comportamiento de los murciélagos de un investigador experto en murciélagos. El objetivo es recrear los movimientos suficientes para emular el vuelo de este animal, con el fin de poder tener un robot capaz de sustituir a los animales reales en una sala de exposición lo anterior con la finalidad de difundir entre la población del estado la importancia de estos animales en la flora y fauna de la zona, así como eliminar mitos y temores sobre este grupo de animales, con el fin de evitar su destrucción proveniente del hombre.

Se detalla la construcción de un robot capaz de emular los movimientos de un murciélago, utilizando tecnologías novedosas y basado en la observación de estos animales, tratando de recrear los movimientos más acercados en su etapa de vuelo con el mínimo número de actuadores. Se detalla el diseño asistido por computadora de las piezas, el montaje de los actuadores adecuados para este prototipo, la construcción, la comparación con un murciélago real así como un análisis aerodinámico de la estructura del robot.

# Abstract

## ROBOTIC BIOINSPIRATION FOR MECHANICAL INTEGRATION OF A BAT ROBOT

This research work focuses on building a prototype of bat robot, which based on an analysis of their morphology as well as assistance and recommendations regarding the movement and behavior of bats of a researcher on bats. The objective is to recreate the sufficient movements to emulate the flight of the animal, in order to have a robot that can replace real animals in a showroom. The foregoing in order to disseminate among the population of the state the importance of these animals in the flora and fauna as well as remove myths and fears about this animals group, in order to avoid destruction from man.

It is detailed the build a robot capable of emulating the movements of a bat, using new technologies and based on observation of this animal, trying to recreate the movements approached in his flight, stage with the minimum number of actuators. Detailed the computer aided design of the parts, the installation of suitable actuators for this prototype, the construction, the comparison with a real bat as well as an aerodynamic analysis of the structure of the robot.

# Índice general

Resumen . . . . .	III
Abstract . . . . .	V
Índice general . . . . .	VII
Índice de figuras . . . . .	IX
Índice de tablas . . . . .	XIII
<b>Acrónimos y abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Justificación . . . . .	4
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	5
1.4. Hipótesis . . . . .	6
1.5. Solución propuesta . . . . .	6
1.6. Objetivos . . . . .	7
1.6.1. Objetivo general . . . . .	7
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	7
1.7. Metodología . . . . .	7
1.8. Alcances y limitaciones . . . . .	8
1.9. Organización de la tesis . . . . .	9
<b>2. Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Robot . . . . .	11
2.2. Estructura mecánica . . . . .	14
2.3. Trasmisiones y reductores . . . . .	15
2.4. Actuadores . . . . .	19
2.4.1. Actuadores eléctricos . . . . .	19
2.4.1.1. Motor de corriente alterna . . . . .	20
2.4.1.2. Motor de corriente directa . . . . .	20
2.4.1.3. Motor paso a paso . . . . .	21
2.4.1.4. Servomotores . . . . .	21

---

2.5. Diseño CAD . . . . .	22
2.6. Comentarios . . . . .	25
<b>3. Descripción de la tecnología utilizada</b>	<b>27</b>
3.1. SolidWorks . . . . .	27
3.2. Impresora 3D . . . . .	28
3.2.1. Zortrax M200 . . . . .	29
3.2.2. Software Z-Suite . . . . .	32
3.3. Actuador tipo servomotor . . . . .	34
3.4. Conclusiones . . . . .	36
<b>4. Diseño mecánico del chasis</b>	<b>37</b>
4.1. Elaboración de las piezas en SolidWorks . . . . .	37
4.2. Descripción del sistema para la contracción y extensión de las alas . .	38
4.3. Descripción del sistema para el aleteo . . . . .	49
4.4. Ensamblaje del robot . . . . .	61
4.5. Comentarios . . . . .	66
<b>5. Resultados</b>	<b>67</b>
5.1. Comparación del murciélago, el robot y el CAD . . . . .	67
5.2. Estudio aerodinámico del chasis . . . . .	76
<b>6. Conclusiones</b>	<b>81</b>
6.1. Trabajo futuro . . . . .	81
<b>Glosario</b>	<b>83</b>
<b>7. Apéndices</b>	<b>85</b>
A.	86
B.	89
C.	95
D.	99
<b>Referencias</b>	<b>102</b>

# Índice de figuras

2.1.	Boceto de ala mecánica por Da Vinci [13]. . . . .	12
2.2.	Robot murciélago llamado BatBot[6]. . . . .	12
2.3.	Tipos de articulaciones que se pueden aplicar a los robots[16]. . . . .	14
2.4.	Ejemplo de correa dentada[17]. . . . .	16
2.5.	Ejemplo de sistema de engranes[17]. . . . .	16
2.6.	Ejemplo de transmisión de paralelogramo[17]. . . . .	17
2.7.	Ejemplo de sistema de reducción por engranaje[17]. . . . .	18
2.8.	Ejemplo de sistema de accionamiento directo[17]. . . . .	18
2.9.	Ejemplo de motor de AC[18]. . . . .	20
2.10.	Ejemplo de motor DC[18]. . . . .	20
2.11.	Ejemplo de motor a pasos[18]. . . . .	21
2.12.	Ejemplo de servomotor[18]. . . . .	22
2.13.	IBM AN/FSQ-7 primer ordenador con una pantalla electrónica gráfica de la historia[21]. . . . .	23
2.14.	Ejemplo del diseño 3D de una pieza en Solidworks 2016[22]. . . . .	25
3.1.	Ejemplo de la ventana principal de SolidWorks. . . . .	28
3.2.	Vista de la impresora 3D Zortrax M200[25]. . . . .	29
3.3.	Impresora 3D Zortrax M200 en el proceso de impresión. . . . .	31
3.4.	Rollo de filamento de material para impresora 3D[26]. . . . .	32
3.5.	Ventana principal del software Z-Suite. . . . .	33
3.6.	Vista interna y externa de un servomotor común[28]. . . . .	34
3.7.	Relación del periodo del pulso y la posición angular de un servomotor[28]. . . . .	35
4.1.	Esqueleto tomado como base para la creación del chasis. . . . .	37
4.2.	Húmero de un murciélago. . . . .	38
4.3.	Primera pieza en CAD que simula el húmero en el robot. . . . .	39
4.4.	Segunda pieza en CAD que simula el húmero en el robot. . . . .	39
4.5.	Plano correspondiente a la primera barra que conforman el húmero. . . . .	40
4.6.	Plano correspondiente a la segunda barra que conforman el húmero. . . . .	41



4.7. Piezas impresas correspondientes al húmero en el ensamblaje físico del robot. . . . .	42
4.8. Cúbito y radio de un murciélago. . . . .	42
4.9. Primera pieza en CAD del cúbito y radio en el robot. . . . .	43
4.10. Segunda pieza en CAD del cúbito y radio en el robot. . . . .	43
4.11. Plano correspondiente a la primera barra que conforman el cúbito y radio. . . . .	44
4.12. Plano correspondiente a la segunda barra que conforman el cúbito y radio. . . . .	45
4.13. Piezas impresas correspondientes al cúbito y radio en el ensamblaje físico del robot. . . . .	46
4.14. Carpales, metacarpales y falanges de un murciélago. . . . .	46
4.15. Pieza en CAD de los carpales, metacarpales y falanges en el robot. . . . .	47
4.16. Plano correspondiente al CAD del conjunto de huesos de la mano del murciélago. . . . .	48
4.17. Pieza impresa correspondiente al conjunto de huesos de la mano en el ensamblaje físico del robot. . . . .	49
4.18. Base para los servomotores en CAD. . . . .	50
4.19. Plano de la base para el servomotor. . . . .	51
4.20. Base del servomotor impresa. . . . .	52
4.21. CAD del engrane principal. . . . .	57
4.22. Plano del engrane. . . . .	58
4.23. Pieza impresa correspondiente al engrane diseñado. . . . .	59
4.24. CAD de la base principal del robot. . . . .	59
4.25. Plano de la base principal del robot. . . . .	60
4.26. Pieza correspondiente a la base principal o torso del robot. . . . .	61
4.27. Vista frontal del ensamblaje en SolidWorks. . . . .	61
4.28. Vista superior del ensamblaje en SolidWorks. . . . .	62
4.29. Vista inferior del ensamblaje en SolidWorks. . . . .	62
4.30. Vista isométrica del ensamblaje en SolidWorks. . . . .	62
4.31. Plano del ensamblaje del robot. . . . .	63
4.32. Vista superior del robot. . . . .	64
4.33. Vista inferior del robot. . . . .	64
4.34. Vista lateral del robot. . . . .	65
4.35. Acercamiento al torso del robot. . . . .	65
5.1. Primera posición de las alas del murciélago real. . . . .	67
5.2. Primera posición de las alas del CAD. . . . .	68
5.3. Primera posición de las alas del robot. . . . .	68
5.4. Segunda posición de las alas del murciélago real. . . . .	69

---

5.5. Segunda posición de las alas del CAD del murciélago. . . . .	69
5.6. Segunda posición de las alas del robot murciélago. . . . .	70
5.7. Tercera posición de las alas del murciélago real. . . . .	70
5.8. Tercera posición de las alas del CAD del murciélago. . . . .	71
5.9. Tercera posición de las alas del robot murciélago. . . . .	71
5.10. Cuarta posición de las alas del murciélago real. . . . .	72
5.11. Cuarta posición de las alas del CAD del murciélago. . . . .	72
5.12. Cuarta posición de las alas del robot murciélago. . . . .	73
5.13. Quinta posición de las alas del murciélago real. . . . .	73
5.14. Quinta posición de las alas del CAD del murciélago. . . . .	74
5.15. Quinta posición de las alas del robot murciélago. . . . .	74
5.16. Vista superior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.	77
5.17. Vista inferior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.	77
5.18. Vista superior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.	78
5.19. Vista trasera de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot. .	78
5.20. Vista lateral de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot. .	79
5.21. Vista isométrica de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.	79

# Índice de tablas

2.1. Trasmisiones para robots[16]. . . . .	15
3.1. Especificaciones físicas de la impresora[25]. . . . .	29
3.2. Especificaciones de impresión de la impresora 3D[25]. . . . .	30
3.3. Especificaciones del software Z-Suite[27]. . . . .	33
3.4. Especificaciones de los servomotores[28]. . . . .	36
5.1. Especificaciones de las condiciones del análisis aerodinámico del robot.	76

# Acrónimos y abreviaturas

<b>Siglas</b>	<b>Descripción</b>
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno.
BaTboT	Robot murciélago.
BD	Bidimensional.
CAD	Diseño asistido por computadora.
CATIA	Aplicación interactiva tridimensional asistida por ordenador.
DC	Corriente Directa.
GIS	Sistemas de Información Geográfica.
HIPS	Poliestireno de alto impacto.
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado .
IBM	Máquinas de negocios internacionales.
LPD	Deposición de Capa de Plástico.
MAV	Micro robot volador.
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts.
OBJ	Archivo de objetos 3D.
PDM	Gestión de datos de producto.
PETG	tereftalato de polietileno.
PWM	Modulación por Ancho de Pulso.
SAGE	Sistema de medio ambiente semi automático.
SMA	Aleación con Memoria de Forma.
STL	Lenguaje de triángulo estándar.
TD	Tridimensional.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

El trabajo presetado en [1] presenta una simulación de los vórtices en el flujo de aire en torno al modelo de movimiento de un murciélago capturado. Estas visualizaciones tienen como objetivo ayudar a los biólogos a comprender la mecánica de vuelo del murciélago. Según lo sugerido por sus colaboradores de dinámica de fluidos, que estudian la formación y el derramamiento de vórtices en el vuelo de los murciélagos los cuales ayudarán a los científicos a comprender los mecanismos eficientes que los murciélagos emplean en la generación del ascenso. Al entender el vuelo del murciélago, esperan nuevos descubrimientos en áreas como la biomecánica, la aerodinámica y la biología evolutiva.

El trabajo realizado por [2] explica el análisis y reconstrucción de la cinemática de las alas y cuerpo de los murciélagos, desde el desarrollo de un marco versátil donde se conoce las restricciones que se pueden incorporar en el seguimiento del vuelo. El método de seguimiento será utilizado para reconstruir la cinemática de vuelo de una variedad de especies de murciélagos. En consecuencia, el seguimiento basado en modelos generalizan modelos de seguimiento articulado. Toman en cuenta la estimación de la cinemática de vuelo desde múltiples puntos de vista. En consecuencia, requirieron un mínimo de dos cámaras para el seguimiento. Dado que no existen trabajos previos no existe un marco de evaluación para su método, sin embargo como ya se mencionó esto puede aplicarse para distintas especies de murciélagos.

El trabajo realizado por [3] desarrolla un robot con la capacidad de volar y adherirse a la superficies. Analizan versiones anteriores incluyendo prototipos de robots voladores exploratorios y adhesivos que puede volar y ellos mismos se adhieren a los techos. Aunque son prometedores, todavía son limitados en las aplicaciones especiales. En este trabajo, se presenta un robot que puede volar en el cielo y anclarse en la superficie de la pared, similar a un murciélago. El robot posee las capacidades de una mosca de modo que pueda transportarse largas distancias, es capaz de adherirse de manera que se puede anclar en la superficie de las paredes gruesas de objetos específicos así como una opción de bajo consumo de energía. Esta formado por un micro cuadricóptero y un dispositivo de adherencia diseñada para el robot murciélago. El dispositivo de absorción es muy eficiente de modo que el robot desarrollado tiene la ventaja de realizar movimiento de larga distancia con la capacidad de superar obstáculos con menor consumo de energía. Estas capacidades son deseables para la industrial y en entornos públicos como aplicaciones de seguridad.

En el trabajo realizado por [4] se construyó un nuevo modelo de robot murciélago. El objetivo del trabajo fue diseñar un robot que imitara a un murciélago, el cual es capaz de volar en una trayectoria recta. *El cuerpo del robot imita a una especie de murciélago llamado Pteropus poliocephalus.* Las características del robot son que cuenta con dos alas, cada una con cuatro grados de libertad, dos grados de libertad se controlan directamente mediante actuadores, y los demás son subactuados. Dos mecanismos de 4 barras separadas están diseñados para el aleteo y la expansión de las alas. En este modelo se pudo utilizar el más simple de los algoritmo de control para alcanzar el vuelo deseado. Por último, este modelo es capaz de producir directamente trayectorias de vuelo. Este mecanismo produce una diferencia de 2.38% en las salidas, lo cual es un error aceptable. El segundo mecanismo se utiliza para generar el movimiento de expansión y retracción en las alas. Estos dos mecanismos, en combinación con otros, ayudaron a generar el movimiento deseado en las alas, imitando el tipo natural, y mejorando el rendimiento aerodinámico.

El trabajo realizado por [5] propone un método basado en la visión que ha ganado popularidad como una herramienta para ayudar a analizar el comportamiento de los murciélagos. Aunque, todavía no existen herramientas capaces de estimar y, posteriormente, analizar planos TD o 3D de vuelo del murciélago. Este trabajo propone una multi-vista basada en modelado articulado TD de murciélagos que pose marco de estimación para este nuevo problema. El desafío clave que plantean es incluir el gran espacio de búsqueda asociado con la pose articulada TD, las ambigüedades que surgen de proyecciones BD de los cuerpos en TD, y la baja resolución que los datos de imagen que tienen a su disposición. Este método utiliza múltiples vistas geométricas de cámaras y restricciones temporales para reducir el espacio de estados posibles del murciélago TD, plantea y se encuentra un conjunto óptimo utilizando un modelo de maklov basado campo aleatorio. El experimento utiliza datos de vídeo reales de murciélagos volando y anotaciones proporcionadas por un biólogo de murciélagos. Los resultados muestran, por primera vez en la literatura, las articulaciones TD que se plantean, generan automáticamente estimaciones para secuencias de vídeo de murciélagos volando en la naturaleza.

El trabajo realizado por [6] trata acerca de las alas de murciélago ya que contienen docenas de articulaciones que permiten al animal realizar maniobras agresivas por medio de cambios de la forma de las alas durante el vuelo. Hay pruebas de que las fuerzas inerciales producidas por sus alas durante el aleteo tienen un papel clave en los movimientos del animal, es decir, rotaciones aéreas. De hecho, los murciélagos de manera eficiente generar fuerzas corporales netas para maniobrar aprovechando su relación masa grande de ala-a-cuerpo. Usando BaTboT un murciélago MAV con alas altamente articuladas accionadas por actuadores de aleación con memoria de forma. El objetivo es cuantificar los efectos de los diferentes patrones de modulación en las alas y en la generación de fuerzas corporales netas. Los experimentos se llevan a cabo para confirmar el papel físico y la importancia que el cambio de la forma del ala y el tiempo de contracción de las alas (carrera ascendente) debería ser más rápido que el tiempo de extensión (descendente).

El trabajo realizado por [7] trata sobre la implementación de un actuador muscular basado en aleaciones de materiales llamados materiales inteligente que aplican en un micro-robot aéreo bio-inspirado de tipo murciélago. Plantean que dichos mamíferos voladores desarrollaron poderosos músculos que se extienden a lo largo de la estructura ósea de las alas, adquiriendo una asombrosa capacidad de maniobra gracias a la capacidad de cambiar la forma del ala durante el vuelo. Por lo que este tipo de alas mórnicas en un prototipo robótico requiere el análisis de nuevas tecnologías de actuación, abordando los problemas de modelado y control que garanticen la aplicabilidad de dicho actuador compuesto por fibras musculares de SMAs . Los resultados de este trabajo se resumen básicamente en los niveles *As well as an aerodynamic analysis of the structure of the robot de movimiento alcanzado por dichos actuadores.*

## 1.2. Justificación

Con la creación de este prototipo se busca complementar a los especímenes en la sala de exhibición y divulgación de información acerca de los murciélagos en el Estado de Hidalgo, debido a todas las implicaciones que tiene la creación de un hábitat adecuado para estos mamíferos, mantener el control sanitario estricto que marcan las autoridades y evitando el problema de su alimentación, es conveniente realizar estudios acerca de la biomimética enfocada a la divulgación de las especies animales ya que no solo se podría evitar el extraer a ciertos especímenes de sus hábitat para no ponerlos en riesgo al no contar con todos los recursos para su adecuado cuidado, también se podría hacer más interactiva la divulgación de información acerca de estos animales tan interesantes.

Es muy cierto lo que menciona un investigador el cual ha realizado durante muchos años estudios acerca de los murciélagos en nuestro Estado: "Los murciélagos son mamíferos verdaderamente útiles para la naturaleza y el hombre. El escaso conocimiento que tenemos acerca de sus actividades y los temores infundados que despiertan sus actividades cavernícolas y nocturnas han llevado a las sociedades humanas modernas a considerarlos injustamente animales peligrosos e indeseables... el verdadero papel de estos animales en la naturaleza es completamente amigable y benigno. Es hora de cambiar nuestra actitud hacia ellos, dando a conocer su verdadera función y adoptando las medidas que sean necesarias para protegerlos" [8].



Además de la trascendencia social que tiene, se aportarán nuevos conocimientos en el área de la biomimética, ya que basado en la investigación realizada acerca del tema, es evidente que es un tema nuevo, del que se tiene muy poca información y existen pocos trabajos de investigación acerca de esta disciplina. La bioinspiración robótica ha permitido fortalecer desarrollos tecnológicos basados en cualidades y virtudes mecánicas de modelos biológicos, mejorando el rendimiento y el desempeño dinámico; siendo éste último de especial interés en el desarrollo de este trabajo de tesis y cuyo producto final corresponde al tema de divulgación del conocimiento.

### 1.3. Planteamiento del problema

Los murciélagos pertenecen al grupo de los mamíferos, son unos animales muy interesantes y con un comportamiento fascinante de los que no se han realizado muchos estudios, y mucho menos una difusión adecuada acerca de ellos hacia la población. Lo anterior ha creado ideas erróneas en las personas, lo cual crea entre la gente temor y miedo. Los murciélagos generan diversos beneficios al ecosistema donde habitan, y en concreto, traen beneficios directos al hombre, desde la polinización de diversos árboles frutales hasta el control de diversos insectos los cuales podrían crear plagas. Estos animales pertenecen al orden de los llamados chiroptera que quiere decir “manos aladas”, debido a esta característica que comparten las distintas especies de murciélagos, son los únicos mamíferos con la verdadera capacidad de volar [9].

Dado que es muy difícil la crianza y el buen cuidado de un animal de este tipo, se ha optado por la creación de un robot capaz de imitar de manera eficaz los movimientos de un murciélago para fines de exhibición, pero ¿Cómo crear dicho prototipo?. Para los animales, el movimiento es lo que determina su supervivencia, alimentación, migración, reproducción y en general su forma de vida, debido a la importancia que el movimiento tiene para todos los seres vivos, actualmente se ha creado un gran interés por entender la locomoción de los animales, existen diversos medios que facilitan un poco dicha tarea, tales como la creación de cámaras de alta resolución y la reconstrucción 3D, aunque no hay métodos tan sofisticados como los que hay para estudiar el movimiento del cuerpo humano [10].

Los métodos de estudio ya mencionados son utilizados por ciencias como la biomecánica, que es el conjunto de conocimientos que se basan en las ciencias como la física y la dinámica, para el estudio de sistemas orgánicos de los animales o humanos, con el fin de predecir alteraciones y métodos de intervención artificial para el mejoramiento de su desempeño [11]. Otra ciencia relativamente nueva que se enfoca en esto es la biomimética, la cual es el método con el cual científicos hacen investigaciones acerca de entes biológicos, con el propósito de averiguar cómo los organismos realizan tareas complejas con el fin de tratar de imitarlos [12].

Gracias a estas ciencias, en la actualidad existen investigaciones en la creación de robots inspirados en distintos animales para distintos propósitos. Sin embargo, para nuestros fines no existen más que algunos modelos inspirados en los murciélagos, un ejemplo de este es el BaTboT creado por investigadores de la universidad de Brown, y con ayuda de biólogos quienes han proporcionado los detalles de la taxonomía y detalles de los movimientos necesarios para lograr replicar los movimientos del vuelo de este animal. A partir de lo anterior el problema que se plantea resolver es el siguiente: ¿cómo diseñar un prototipo de robot murciélago capaz de reproducir los movimientos del vuelo para fines demostrativos?.

## 1.4. Hipótesis

Es posible simular el vuelo de los murciélagos con un menor número de actuadores contemplados para realzar los movimiento de las alas en el chasis de un robot murciélago, obteniendo una similitud aceptable en los movimientos realizados por un murciélago real durante el vuelo, así mismo disminuir la complejidad de las piezas que conforman el robot sin perder la semejanza en comparación con un murciélago real.

## 1.5. Solución propuesta

La solución que se propone al problema planteado y con el fin de contribuir a la difusión de información acerca de los murciélagos, es crear un prototipo de robot murciélago para sustituir animales reales de este tipo con fines demostrativos. Por lo que se pretende la construcción de un robot murciélago capaz de emular los movimientos correspondientes al vuelo de este animal, basándose en un análisis minucioso del comportamiento real de estos animales durante el vuelo, así como la reducción de los elementos que intervengan en dichos movimientos para facilitar la construcción del robot. Para dicha construcción de este prototipo se utilizan nuevas tecnologías con el fin de hacer mas eficiente y fácil su construcción.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

Diseñar un prototipo de robot murciélago, por medio del análisis de su morfología y características en el vuelo, para reproducir en la mayor medida posible los movimientos en el aleteo de este animal.

### 1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar mediante la observación a un espécimen con la finalidad de caracterizar la morfología de las alas que brindan el movimiento para poder realizar su vuelo.
- Realizar un análisis mecánico mediante el diseño CAD para recrear las articulaciones y huesos de las alas.
- Elegir el material con base en sus propiedades mecánicas de resistencia y peso así como tener en cuenta los costos para la creación de las piezas del robot murciélago.
- Determinar los actuadores con las características adecuadas para generar el movimiento deseado.
- Realizar la construcción del prototipo con las piezas elaboradas para integrarlo con la electrónica de control.
- Realizar un análisis del robot mediante la comparación con un murciélago para evaluar el movimiento.
- Hacer un análisis del desempeño aerodinámico mediante software para observar su comportamiento.

## 1.7. Metodología

- Revisión documental de trabajos similares.
- Análisis minucioso de los movimientos de un murciélago con el fin de tener un amplio conocimiento de las capacidades articulares que tienen.
- Crear un boceto de los eslabones fundamentales que intervienen en el movimiento.
- Detallar las dimensiones del prototipo a crear dadas las limitaciones de construcción.

- Crear en SolidWorks los eslabones que conformaran el chasis del robot así como las bases correspondientes a los actuadores del mismo.
- Evaluar el desempeño así como las capacidades de movimiento del prototipo en una simulación de ensamblaje dentro del programa SolidWorks para posibles modificaciones o implementación de nuevas estructuras.
- Con el diseño del prototipo evaluado y corregido, realizar la impresión 3D de todos los elementos del chasis del robot.
- Ensamblar los eslabones con tornillos con el fin de robustecer el diseño mecánico.
- Evaluar el desempeño y las capacidades del prototipo físico con el fin de que cumpla con las especificaciones previstas en el ensamblaje del programa.
- Montar de los actuadores correspondientes.
- Evaluar el movimiento del chasis del robot accionado por los actuadores para verificar desempeño y resistencia.
- Comparar la capacidad de robot para realizar los movimientos de vuelo, con los movimientos de un murciélago real.
- Realizar el análisis aerodinámico del robot.

## 1.8. Alcances y limitaciones

Los alcances obtenidos en este trabajo de investigación son los siguientes:

- Implementación de solidWorks y sus funciones de simulación de ensamblajes para el diseño y evaluación del modelo de chasis del robot murciélago.
- Elaboración de piezas de robots con tecnologías de impresión 3D.
- Estudio del desempeño del chasis propuesto del robot en comparación con un murciélago real.

Las limitaciones encontradas en la elaboración de esta investigación son las siguientes:

- Limitaciones físicas de las combinaciones angulares debido al diseño del chasis.

- Falta de cálculos para el mejor análisis del desempeño del chasis del robot.
- La integración de actuadores con mejor desempeño para dar una mayor movilidad del robot.

## **1.9. Organización de la tesis**

El capítulo 1 esta conformado por los antecedentes relacionados al tema de esta tesis, seguido por la justificación, el planteamiento del problema, la hipótesis, la solución propuesta, objetivo general, objetivos específicos, la metodología así como los alcances y limitaciones y por último la organización de la tesis. El capítulo 2 contiene el marco teórico, por lo que se encuentra el sustento teórico para el desarrollo de la investigación. El capítulo 3 se describen las tecnologías utilizadas para la elaboración e implementación del chasis del robot murciélago. El capítulo 4 se describe a detalle cada una de las piezas y se comparan elementos como el esqueleto, el CAD , los planos y la pieza impresa en 3D de estas, así como el ensamblaje del robot. En el capítulo 5 se describen los resultados obtenidos y en el capítulo 6 se mencionan las conclusiones y el trabajo futuro.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Robot

En un principio, los robots fueron creados para tareas meramente industriales, ya sea para tareas en talleres o líneas de fabricación, sin embargo, a medida que se ha avanzado en la creación de nuevos conocimientos se ha logrado tener un mayor campo de aplicación para estos, pasando de ser dispositivos exclusivos de las grandes fábricas a herramientas que se utilizan para el área de la medicina, exploración y educación entre otras. Pese a lo mencionado anteriormente, desde hace mucho tiempo se puede encontrar diversos estudios en los cuales se muestran bocetos de máquinas que fácilmente podrían entrar dentro de alguna clasificación de los robots actuales. Un claro ejemplo de esto es el famoso “Códice del Vuelo de los pájaros” de Leonardo Da Vinci, fue elaborado por el sabio del renacimiento entre los años 1505 y 1506, en donde detalló aspectos sobre cómo hacer alas mecánicas articuladas con un único o doble tiro. También dibujó a su vez los aspectos del ave cuando se disponen a hacer su vuelo aprovechando la fuerza del viento y detalles de la articulación de una ala artificial [13].

En la Figura 2.1 se observa un fragmento de dicho código en donde se muestra un boceto de una ala mecánica pensada por Da Vinci.



Figura 2.1: Boceto de ala mecánica por Da Vinci [13].

Si bien, en la actualidad los robots son muy comunes en muchas áreas, en los últimos años los vemos cada vez más en el área de la recreación o entretenimiento. La mayoría de estos robots son creados por expertos o investigadores en el área de la robótica, en las universidades todos los días se realizan investigaciones y prototipos de robots enfocados a otras áreas que no son la industria, como por ejemplo los ya mencionados en la Sección 1.1 del Capítulo 1. En la Figura 2.2 se observa el robot murciélago creado para imitar a un murciélago.



Figura 2.2: Robot murciélago llamado BatBot[6].

Para tener una mayor comprensión de lo que es un robot, se comienza por su definición.

Existen diversos conceptos de lo que es un robot de acuerdo a sus diversos usos pero para definirlo en términos generales, un robot es una máquina automática o autónoma que posee cierto grado de inteligencia, capaz de percibir su entorno y de imitar determinados comportamientos del ser humano así como de otros sistemas biológicos [14]. Los robots se utilizan para desempeñar labores de riesgo o que requieren de una fuerza, velocidad o precisión que está fuera de nuestro alcance.

Existen distintas clasificaciones que se ha hecho hacia los robots por su uso y aplicaciones de acuerdo con diversos autores, sin embargo, de acuerdo a la calificación que aporta el Grupo de Robótica del Comité Español de Automática en 2008, el prototipo que se pretende diseñar entra en la clasificación de los robots de educación y entretenimiento. Específicamente en robots en parques temáticos y de exposición, debido a que recientemente en estos lugares abundan robots autómatas con apariencia humana o de ciertos animales, los cuales son los verdaderos exponentes del desarrollo tecnológico en la robótica y en la mecatrónica, sin embargo, los robots en este ámbito buscan conseguir movimientos y actitudes muy cercanas al ente biológico al que se trata de emular [15].

Aunque estos tipos de robots, en la mayoría de los casos no son interactivos, existe una tendencia muy grande hacia el desarrollo de autómatas que respondan a ciertos estímulos recibidos de las personas, por lo que es indispensable la integración de diversos elementos tales como sensores, actuadores, programación y sistemas de control para llevar a cabo dichas tareas. Sin embargo, en este trabajo se enfoca en el diseño del chasis, así como la incorporación de los actuadores.

Para comprender las partes esenciales de un robot se describe una serie de conceptos de sus partes más importantes:



## 2.2. Estructura mecánica

Un robot está formado por una serie de piezas llamadas eslabones los cuales están unidos entre sí por articulaciones, estas a su vez proporcionan un movimiento relativo entre cada uno de los eslabones. Este tipo de diseño se puede comparar con la anatomía específica de un brazo biológico por lo que al referirse a ciertas partes del robot se denominan, por ejemplo como cuerpo, brazo, codo o muñeca. Dicho lo anterior, no todos los movimientos entre los eslabones son los mismos, por lo que existen diversos tipos de movimientos en las articulaciones de los robots, existen 6 tipos de movimientos en las articulaciones, aunque en la práctica no todos son utilizados, los más comunes son los de rotación y prismático. En la Figura 2.3 se muestran los seis tipos de movimientos en las articulaciones.

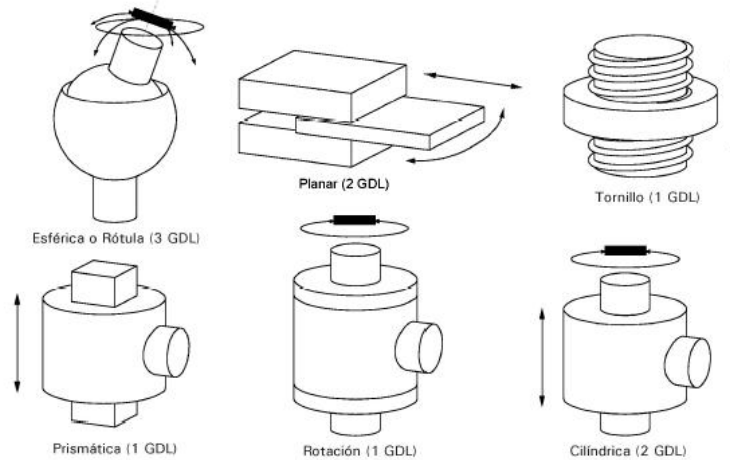


Figura 2.3: Tipos de articulaciones que se pueden aplicar a los robots[16].

De acuerdo a lo anterior, se deriva un término muy importante en la robótica general llamado “grado de libertad”, el cual es el movimiento de una articulación con respecto a la anterior. Por lo que cada robot tiene un número de grados de libertad el cual, es la suma de articulaciones con movimiento que conforman al mismo [16].

## 2.3. Trasmisiones y reductores

Los robots por lo general realizan movimientos rápidos en sus extremos, por lo que es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia (medida de la inercia rotacional de un cuerpo), del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de la masa del actuador, por lo que se procura que los actuadores con mayor masa estén ubicados en las articulaciones más cercanas al cuerpo o base del robot. En la Tabla 2.1 se puede ver la clasificación de las trasmisiones aplicables a los robots [17].

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Engranaje</li> <li>▪ Correa dentada</li> <li>▪ Cadena</li> <li>▪ Paralelogramo</li> <li>▪ Cable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pares altos</li> <li>▪ Distancia grande</li> <li>▪ Distancia grande</li> <li>▪ -</li> <li>▪ -</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Holguras</li> <li>▪ -</li> <li>▪ Ruido</li> <li>▪ Giro limitado</li> <li>▪ Deformabilidad</li> </ul>
Circular-Lineal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tornillo sin fin</li> <li>▪ Cremallera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poca holgura</li> <li>▪ Holgura media</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rozamiento</li> <li>▪ Rozamiento</li> </ul>
Lineal-Circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Paralelogramo articulado</li> <li>▪ Cremallera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ -</li> <li>▪ Holgura media</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Control difícil</li> <li>▪ Rozamiento</li> </ul>

Tabla 2.1: Trasmisiones para robots[16].

Aunque existen muchos sistemas de transmisión, los más comunes que se pueden encontrar por su facilidad y eficiencia para implementar son los siguientes: Los accionamientos por correa, se utilizan mucho en la robótica, especialmente la correa síncrona, en la Figura 2.4 se puede observar un ejemplo de este sistema de transmisión.

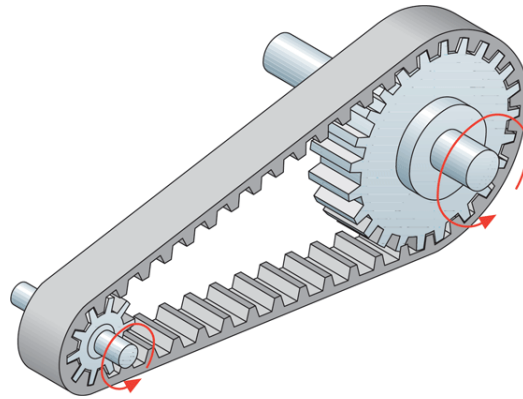


Figura 2.4: Ejemplo de correa dentada[17].

Entre todas las transmisiones mecánicas, los diferentes tipos de engranajes, son más confiables y duraderos, aunque un juego entre los dientes tendrá que tomarse en cuenta cuidadosamente durante la fase de diseño [18]. En la Figura 2.5 se muestra un sistema de transmisión de tipo engranaje simple.

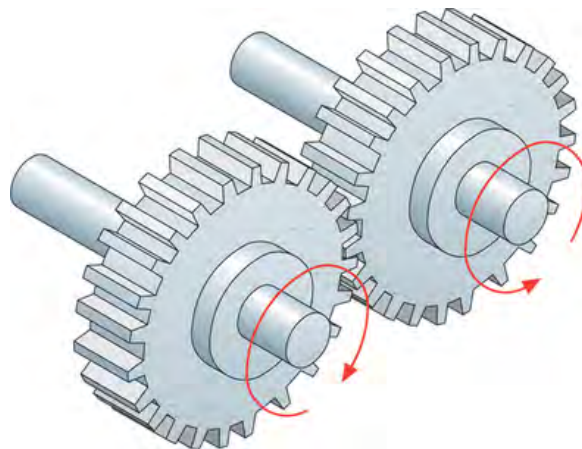


Figura 2.5: Ejemplo de sistema de engranes[17].

Con el fin de reducir el peso y exceso de flexibilidad que presentan los sistemas de transmisión anteriores, se emplean los mecanismos de paralelogramo o más comúnmente conocido como mecanismos de cuatro barras que por lo general son rígidos, acoplados por articulaciones que permiten movimientos relativos entre cualquiera de

dos eslabones [19]. En la Figura 2.6 se observan diversas configuraciones de este sistema de transmisión.

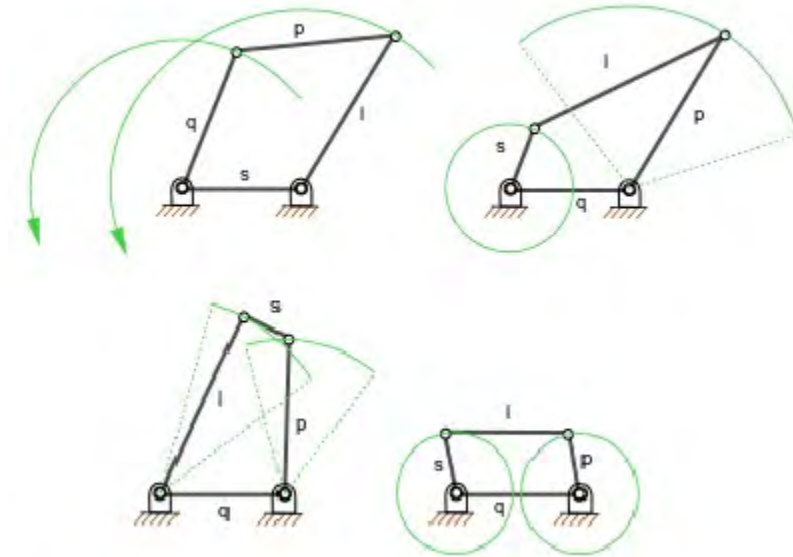


Figura 2.6: Ejemplo de transmisión de paralelogramo[17].

En cuanto a los reductores, como su nombre lo dice, son dispositivos, usualmente conformados por relaciones de engranajes, los cuales reducen la velocidad del actuador. Los reductores usados en la robótica se les exigen ciertas condiciones de funcionamiento muy restringidas, por lo que en estos mecanismos se busca reductores de bajo peso, reducido en tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso [20]. En la Figura 2.7 se observa un sistema de engranaje reductor típico.

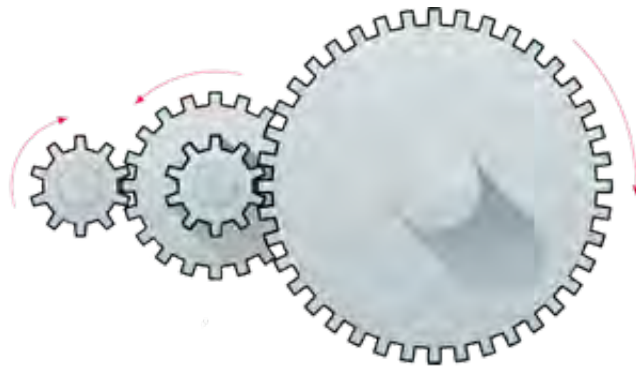


Figura 2.7: Ejemplo de sistema de reducción por engranaje[17].

Por último, se menciona el sistema de accionamiento directo, este término se refiere a cuando el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulación sin la utilización de un reductor intermedio (transmisión directa) [21]. En la Figura 2.8 se muestra un ejemplo de un sistema en transmisión directa o accionamiento directo [22].



Figura 2.8: Ejemplo de sistema de accionamiento directo[17].

## 2.4. Actuadores

Se entiende por actuador, a aquel elemento o dispositivo que forma parte de una máquina el cual está encargado de suministrar energía mecánica, mediante la transformación de otro tipo de energía para que esta funcione. Existen diversos actuadores los cuales son aplicados en la robótica por sus distintas funciones y versatilidad de acuerdo a su diseño y tipo de energía que transforman:

- Eléctricos.
- Neumáticos.
- Hidráulicos.
- Térmicos.
- Elásticos.
- Gravitatorios.
- De origen animal.

Para fines de esta investigación, los únicos que son necesarios conocer y analizar son los tipos actuadores eléctricos.

### 2.4.1. Actuadores eléctricos

Como antecedente, se puede mencionar a Werner von Siemens que en 1866 descubrió el principio del dínamo eléctrico y así creó la base para la ingeniería y el éxito de los motores eléctricos. Durante la exposición industrial en Viena en 1873 se conectó accidentalmente un generador de dínamo inactivo a un segundo generador de dínamo que ya estaba funcionando haciendo que el generador inactivo arrancara y funcionara como motor. Seguido a esto en 1888 Nikola Tesla introduce el concepto de corriente alterna y el motor, ya en 1894 Westinghouse empezó a fabricar los motores de corriente alterna dando comienzo con la era de los motores eléctricos [23].

Para entender mejor lo que es un motor eléctrico se dice que son elementos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, este tipo de actuadores son los más extendidos y los que poseen un mayor campo de aplicación dada la facilidad con la que se puede alimentar, además tienen una gran versatilidad ya que utilizan cables para transmitirles una señal de control y alimentación. Dentro de este tipo de actuadores se tienen variantes las cuales son las siguientes:

#### 2.4.1.1. Motor de corriente alterna

Como su nombre lo dice, son motores que transforman la energía alterna en energía mecánica, por lo general son robustos, seguros y sencillos, suelen ser más baratos que los demás, por lo mencionado anteriormente [24]. en la Figura 2.9 se puede observar un motor de corriente alterna común.



Figura 2.9: Ejemplo de motor de AC[18].

#### 2.4.1.2. Motor de corriente directa

Este tipo de motores son pesados, caros y necesitan bastante mantenimiento debido a que internamente, utilizan escobillas para energizar el rotor y esto provoca una continua emisión de chispas, sin embargo, en cuestiones de control de velocidad y el par, se convierte en una de las mejores opciones, sin mencionar que su alimentación se facilita al poder utilizar baterías como su fuente de energía. En la Figura 2.10 se muestra un motor de corriente directa común.



Figura 2.10: Ejemplo de motor DC[18].

### 2.4.1.3. Motor paso a paso

Estos son motores electromagnéticos, rotativos e incrementales que convierten pulsos digitales en rotación mecánica, dicha rotación es directamente proporcional al número de pulsos y la velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de dichos pulsos. Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras localizadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (excitación de las bobinas) deben ser externamente manejada por un controlador. Existen dos variantes en este tipo de motor las cuales son: los motores a pasos bipolares, estos tiene generalmente cuatro cables de salida y los unipolares, estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interna. En la Figura 2.11 se muestra un motor a pasos o también conocido como stepper.



Figura 2.11: Ejemplo de motor a pasos[18].

### 2.4.1.4. Servomotores

El servomotor es de corriente continua, este motor tiene la capacidad de posicionarse en cualquier lugar dentro de su rango de operación y mantenerse estable en dicha posición, gracias a que internamente tiene un motor de corriente directa conectado a una caja reductora y a un circuito de control de posición, por lo que los hace casi ideales para la robótica.



El control del servomotor se hace en lazo cerrado, por lo que de este modo se hace un control de posición muy preciso, además nos ofrece un momento de torsión muy elevado gracias a dicha caja reductora, también nos ofrece una estructura pequeña y una carga ligera [25]. En la Figura 2.12 se puede observar un ejemplo de un servomotor común.



Figura 2.12: Ejemplo de servomotor[18].

## 2.5. Diseño CAD

La elaboración del chasis es una de las partes más importantes para la creación de un robot, por lo que el diseño del mismo es de vital importancia para que el trabajo tenga una mayor fluidez, pues al hacer un análisis de la forma más adecuada para un robot, los materiales que se utilizaran y el precio de estos, se evita contratiempos y gastos excesivos o innecesarios. Una de las herramientas en la actualidad más óptimas para este trabajo es el diseño asistido por computador (CAD).

Computer aided design (CAD) por sus siglas en inglés, es el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos, ya sea en segunda o tercera dimensión (2D o 3D). El software CAD puede ser especializado para usos y aplicaciones específicas. Es ampliamente utilizado para la animación computacional y efectos especiales en películas, publicidad y productos de diferentes industrias. En los últimos tiempos es utilizado como herramienta didáctica donde el software realiza cálculos para determinar una forma y tamaño óptimo para una variedad de productos y aplicaciones de diseño.

En el diseño industrial y de productos, es utilizado principalmente para la creación de modelos de superficie o sólidos en 3D, o bien, dibujos de componentes físicos basados en vectores en 2D. Sin embargo, también se utiliza en los procesos de ingeniería, desde el diseño conceptual hasta el layout de productos, a través de fuerza y análisis dinámico de ensamblajes hasta la definición de métodos de manufactura. Esto le permite al ingeniero analizar interactivamente y automáticamente las variantes de diseño, para encontrar el diseño óptimo para su manufactura mientras se minimiza el uso de prototipos físicos [26].

A continuación se presenta una breve historia del CAD, desde la década de los años 50, cuando apareció el primer programa gráfico, hasta la fecha.

Antes de 1970. El primer CAD data de los años 50 para las Fuerzas Aéreas de USA. El primer sistema de gráficos, el SAGE (Semi Automatic Ground Environment) un sistema de defensa aérea, que fue empleado para visualizar datos de radar, fue desarrollado en colaboración con el MIT . En la Figura 2.13 se muestra el sistema gráfico IBM AN/FSQ-7 el cual era parte del sistema SAGE.



Figura 2.13: IBM AN/FSQ-7 primer ordenador con una pantalla electrónica gráfica de la historia[21].

En los 60, los sistemas CAD se utilizaron para diseñar espacios interiores de oficinas. En 1968 estaban ya disponibles los sistemas CAD 2D (muy básico, tal y como lo entendemos hoy en día). Estos sistemas funcionaban en terminales de grandes ordenadores (mainframes).

Para los años 70, varias compañías empezaron a ofrecer sistemas de diseño/dibujo automatizado. Muchos de los productos y firmas más conocidas en la actualidad tuvieron sus inicios en este periodo. Algunos de estos nombres incluyen CATIA y CADLink. Podían encontrarse ya algunas capacidades 3D en programas de cálculo de sistemas HVAC . A finales de los 70, un sistema típico de CAD consistía en un mini-ordenador de 16 bits con un máximo de 512 Kb de memoria y de 20 a 300 Mb de disco duro.

En los 80, Autodesk entra en escena con el objetivo de crear un programa de CAD que funcione sobre un PC. En poco tiempo Autocad llegó a ser el programa más popular de CAD. Muchos otros programas de compañías diversas siguieron la misma senda. Durante esta década, los programas de CAD se utilizaban básicamente para desarrollos de ingeniería. Empiezan a desarrollarse los sistemas GIS .

Para los años 90 se generalizan las visualizaciones en 3D. Autocad versión 12 se convierte en el programa de CAD sobre Windows más vendido. A mediados de los 90 aparecen muchos programas de CAD para una gran variedad de usos y aplicaciones.

A finales de los 90 mucha gente utiliza ya los programas de CAD de forma habitual, pero hay todavía una gran lucha por atraer la atención de los usuarios. Se desarrollan programas mejores para satisfacer las necesidades crecientes de la industria. Se desarrollan también muchos programas sencillos de CAD. Los programas de CAD 3D abundan en el mercado. Se ofrecen soluciones a segmentos verticales aportando soluciones específicas para cada uno de ellos (construcción, ingeniería civil, mecánica y fabricación, etc.) [27].

A partir del año 2000 se desarrollaron diversos programas de CAD enfocados a distintas disciplinas, y se fue integrando diversas funciones adicionales para crear programas mas completos, los cuales entre sus diversas funciones pueden simular el comportamiento del diseño en distintos ambientes, simular la resistencia de los materiales bajo estrés o fuerzas específicas, realizar ensamblajes y simular los movimientos mecánicos. Entre los programas mas conocidos podemos encontrar 123D DESING, TinkerCAD, Sketchup, OpenSCAD, AutoCAD y SolidWorks [28].

En la actualidad, el CAD ha tenido un nuevo auge debido a la invención de la impresora 3D, ahora siendo una herramienta que ha pasado a ser algo más común para el uso de la población en general.

Uno de los softwares más completos y versátiles de diseño asistido por computadora es SolidWorks. El software de automatización de diseño mecánico de Solidworks es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrico y basado en operaciones que aprovecha la factibilidad de aprendizaje de la interfaz gráfica de usuarios Windows. Este software puede crear representaciones de sólidos en 3D totalmente asociativos con o sin restricciones mientras utiliza al mismo tiempo las relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención del diseño [29]. En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo de una pieza elaborada en el software solidworks, la cual nos muestra la gran capacidad de diseño de los software actuales.

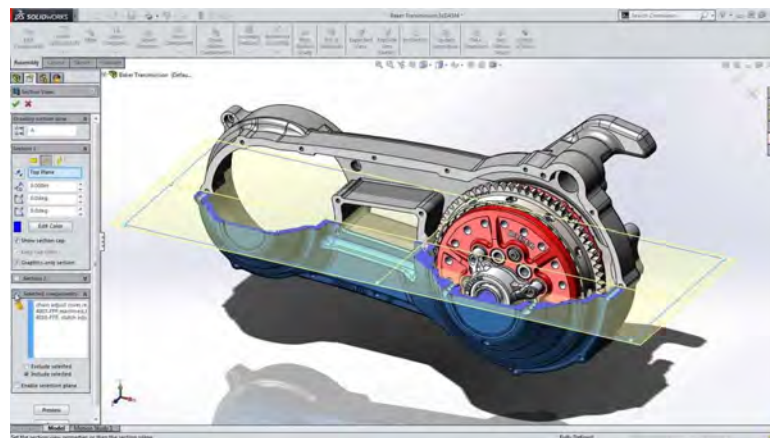


Figura 2.14: Ejemplo del diseño 3D de una pieza en Solidworks 2016[22].

## 2.6. Comentarios

En este capítulo se mostró con mayor detalle lo que es un robot, así como los elementos que en esencia intervienen en su construcción. Pese a todo el sustento teórico que existe acerca de los robots, no existe un método específico que indique los pasos a seguir para la construcción de estos. Aunado a lo anterior, cuando se pretende aplicar la robótica a áreas como la bioinspiración, se encuentran diversas complicaciones como la aplicación de los materiales, métodos de construcción, selección de actuadores y transmisiones.

# Capítulo 3

## Descripción de la tecnología utilizada

### 3.1. SolidWorks

Como una pequeña introducción a este apartado, en el marco teórico se mencionó el termino CAD, existen diversos softwares especializados en el CAD, para el diseño del prototipo del chasis del murciélago, se optó por utilizar la herramienta llamada SolidWorks, ya que este software está especializado en el diseño 3D de piezas geométricas, ya sea desde una base 2D o directamente desde un plano 3D.

Este software es uno de los más completos en su ramo, cuenta con distintos módulos que hacen más eficiente y profesional el trabajo de diseño de alguna pieza o de un dispositivo completo, con Solidworks se puede diseñar piezas mecánicas en 3D, evaluar ensambles de varias piezas y producir dibujos de fabricación. Adicionalmente, se pueden manejar los datos de diseño en su sistema de administración PDM (manejo de datos de ciclo de vida de producto) y llevar un control de las versiones de dibujos.

Al ser diseñada alguna pieza se puede evaluar el impacto ambiental del diseño, simular virtualmente las condiciones y análisis del diseño en situaciones reales y optimizar su desempeño. El programa esta basado en un motor de modelado de sólidos y también contiene comandos de creación, edición de superficies complejas, ademas es asociativo entre los modelos 3D y sus dibujos.

En la Figura 3.1 se puede observar un ejemplo de un pieza creada en SolidWorks, en dicha ventana se puede observar todos los conjuntos de herramientas con las que cuenta el software y con los cuales se puede crear cualquier tipo de pieza.

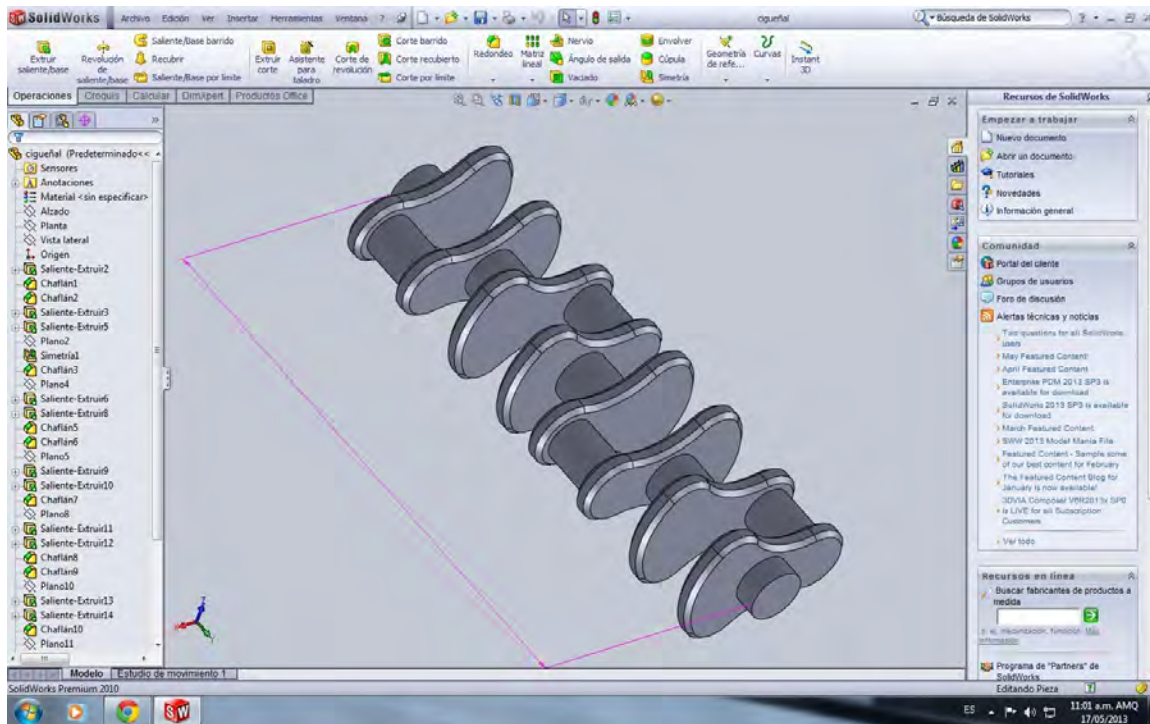


Figura 3.1: Ejemplo de la ventana principal de SolidWorks.

## 3.2. Impresora 3D

La impresión 3D es una tecnología que puede ser usada para la industria y el diseño, aunque en los últimos años han sido comercializadas para el público en general. Usando la impresora 3D en los estudios técnicos y de diseño reduce los costos de creación de prototipos. La integración de los elementos clave de la impresora como son el software Z-Suite y las composiciones dedicadas Z Filamentos, permiten tener nueva tecnología de impresión 3D como es la “Deposición capa de plástico”. Con La tecnología LPD se pueden crear proyectos de modelos precisos. El proceso de aplicación de capado preciso del filamento hace que lo impreso sean elementos adecuados para modelos de prototipos en la tecnología moldeable [30].

### 3.2.1. Zortrax M200

El equipo de impresión 3D Zortrax M200 funciona mediante tecnología LPD (Layer Plastic Deposition o Deposición capa de plástico) donde el filamento de material de impresión es aplicado sobre una plataforma de metal con pequeños orificios caliente de impresión capa por capa. Este equipo es reconocido a nivel mundial por gran cantidad de usuarios dado su calidad de impresión y fiabilidad de operación. Para su uso se utiliza el software Z-SUITE y una amplia gama de materiales propios de Zortrax, tales como Z - ABS , Z- HIPS , Z- PETG entre otros [31].

En la Tabla 3.1 se muestran algunas de las especificaciones físicas de la impresora consideradas las más relevantes.

Especificaciones físicas	
Las dimensiones físicas de la impresora ya considerando el carrete de material instalado	345 x 360 x 430 mm.
Peso	13Kg.
Entrada de alimentación de CA	110/240V a 2A 50/60 HZ.
Potencia	190W.
Otros elementos	tarjeta de conectividad SD y Wi-Fi.

Tabla 3.1: Especificaciones físicas de la impresora[25].

En la Figura 3.2 se puede observar la impresora 3D utilizada para la elaboración del chasis de robot.

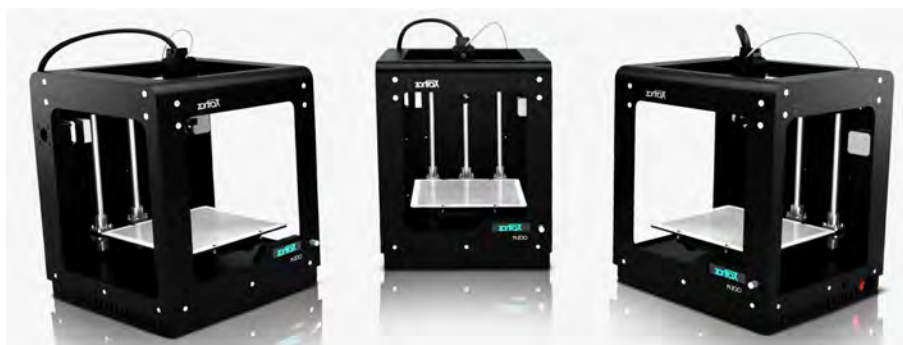


Figura 3.2: Vista de la impresora 3D Zortrax M200[25].

Las características de impresión de cada impresora 3D varía entre una y otra, siendo dichas características las que hacen sobresalir una entre otra. La impresora 3D Zortrax M200 es una impresora de muy buena calidad catalogada como semi-profesional apta para trabajos de diseño, ingeniería y arquitectura, por sus características y materiales de la mejor calidad con la que esta construida. En la Tabla 3.2 se muestran las características más importantes de impresión de la impresora 3D Zortrax M200.

Especificaciones de impresión	
Tecnología de impresión	LPD
Volumen de impresión	200 x 200 x 185 mm.
Ajustes de resolución capa avanzadas	25-50 micras.
Grosor de la pared mínimo	400 micras.
Resolución del punto de impresión única	400 micras.
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Posicionamiento de precisión X/Y/Z	1.5, 1.5 y 1.25 micras respectivamente.
Temperatura máxima del extrusor	380 grados C
Temperatura máxima de la plataforma climatizada	110 grados C

Tabla 3.2: Especificaciones de impresión de la impresora 3D[25].

En la Figura 3.3 se puede observar un ejemplo de como se ve la impresora Zortrax M200 en su proceso de impresión de una pieza.



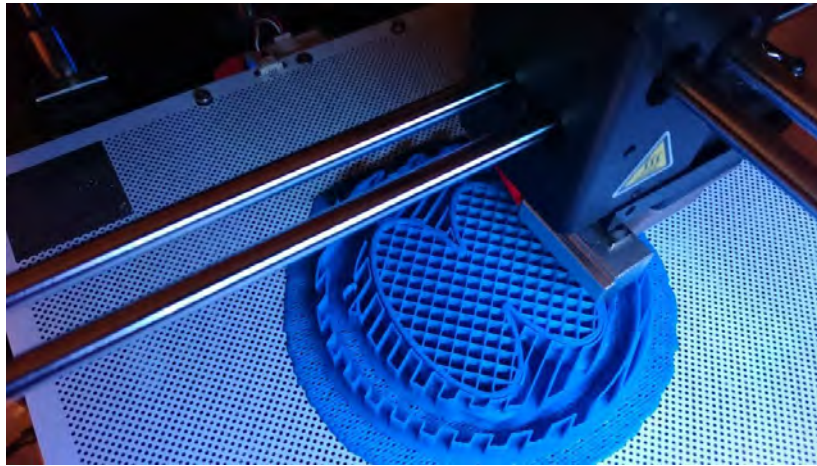


Figura 3.3: Impresora 3D Zortrax M200 en el proceso de impresión.

La elección del material con el que se imprimirá el modelo es un factor importante debido a que de ello dependerán factores como las dimensiones de las piezas, la calidad con la que se imprimirá y la duración de las piezas. En el mundo de la impresión 3D, el ABS es uno de los materiales que en la actualidad más se utiliza para llevar a cabo los procesos de impresión debido a que es el más indicado cuando se busca la fuerza en el resultado o cuando lo que se va a imprimir va a quedar expuesto a temperaturas extremas.

El ABS es un polímero compuesto por tres elementos que son el Acrilonitrilo, el Butadieno y el Estireno (ABS) por lo que se le puede denominar terpolímero. Cada uno de los tres elementos que lo constituye aporta características distintas que lo hacen un polímero apto para la impresión 3D de modelos con requerimientos más robustos. El acrolonitrilo nos da la rigidez, la resistencia a ataques químicos, la dureza y estabilidad a las altas temperaturas. El butadieno aporta tenacidad a la temperatura cuando ésta es especialmente baja y resistencia al impacto. El estireno le da resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza [32].

Existen muchas propiedades y especificaciones de este material, pero la más significativa es su resistencia a la fatiga la cual es de 0.7 kg por  $mm^2$ . En la presentación que da la marca Zortrax, el material viene en un rollo de filamento de calibre de 1.75 mm y peso de 1 kg. En la Figura 3.4 se muestra el rollo de material para la impresora 3D llamado Z-ABS.



Figura 3.4: Rollo de filamento de material para impresora 3D[26].

### 3.2.2. Software Z-Suite

Z-suite es un software asistente para realizar la impresión 3D con la impresora Zortrax M200. Este programa nos ayuda a tener una vista previa de la impresión a través de sus símbolos, que es de fácil comprensión y accesible a todos. Para iniciar la impresión solo basta con unos pocos clics, para poder elegir como colocar la pieza en su plato donde se realizan las impresiones, también se puede configurar la exactitud de cada uno de sus capas, la velocidad o la tasa de llenado del objeto. Con este software se puede cargar el archivo en los formatos STL o OBJ (formato de exportación de cualquier software 3D como SolidWorks, CATIA, Sketchup o 3ds Max) para poder manipular la pieza desde este programa [33].

En la Tabla 3.3 se muestran algunas de las características el software propio de la impresora 3D.

Especificaciones Z-Suite	
Extensiones para grabar	.stl, .obj y .dxf
Soporte	Mac OS X / Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8.
Peso	10 Mb.
Requerimiento de procesador	2 Gb. de RAM

Tabla 3.3: Especificaciones del software Z-Suite[27].

En la Figura 3.5 se muestra la pantalla principal del software Z-Suite en donde se puede manipular con sus diversas opciones las piezas para poderlas imprimir en la impresora 3D Zortrax M200.

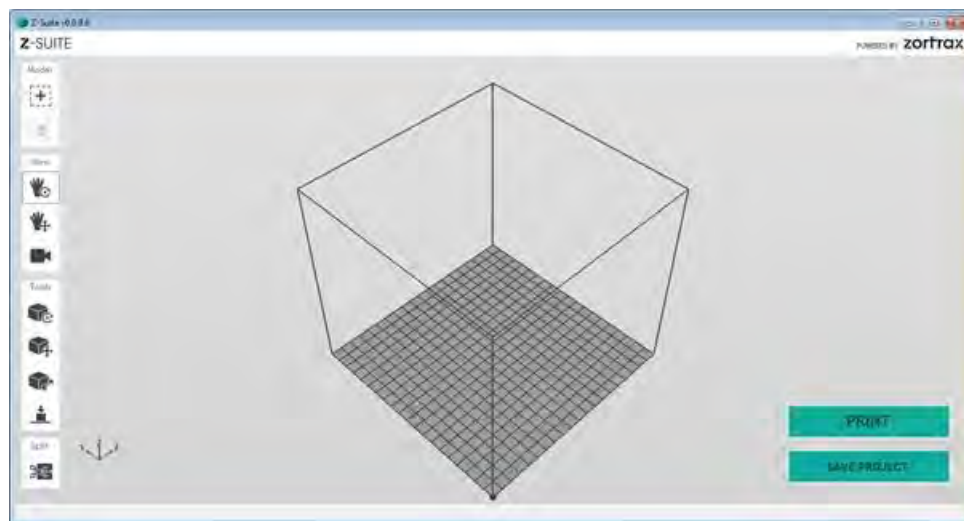


Figura 3.5: Ventana principal del software Z-Suite.

### 3.3. Actuador tipo servomotor

El servo es un pequeño pero potente dispositivo eléctrico que dispone en su interior de un pequeño motor de DC con un sistema de engranes que forman un sistema reductor de velocidad y un multiplicador de fuerza. También cuenta con un pequeño circuito eléctrico encargado de gobernar el sistema, otro elemento importante es un pequeño potenciómetro acoplado al sistema de engranes el cual actúa como sensor de posición y ayuda al circuito a cumplir su función. El recorrido del eje de salida va de  $0^\circ$  hasta los  $180^\circ$  en la mayoría de ellos, para algunas aplicaciones y a gusto del usuario se puede modificar con facilidad para tener un recorrido libre de  $360^\circ$  manteniendo en sistema de engranes y el potenciómetro para poder ser utilizado con otro sistema de control ya que ahora solo sería un motor de DC. En la Figura 3.6 se puede observar como esta constituido un servomotor internamente y externamente. Este tipo de servomotor es el más utilizado para aplicaciones en robótica y modelos a escala de coches, aviones y helicópteros.



Figura 3.6: Vista interna y externa de un servomotor común[28].

El control de posición lo efectúa el servomotor en forma interna mediante dicho potenciómetro, este controla un PWM interno del circuito de control para compararlo con la entrada PWM externa del servo mediante un sistema diferencial y así se puede modificar la posición del eje de salida hasta que los valores de los PWM interno y externo se igualen y el servo se detenga en la posición indicada. Una característica que es de mucha utilidad para las cuestiones de robótica es que en esta posición, el motor del servo deja de consumir corriente y sólo circula una pequeña cantidad hasta el circuito interno. Si en ese momento el eje es forzado a cambiar de posición por alguna fuerza externa, el control diferencial interno lo detecta y manda la corriente necesaria al motor para corregir la posición [34].

La característica de la señal de control es un periodo de PWM de 16 a 18 milisegundos y el periodo útil se puede variar de 1 a 2 milisegundos, dicho periodo hace referencia a 0 y 180° respectivamente en la posición angular del servomotor. En la Figura 3.7 se puede observar lo anteriormente descrito [35].

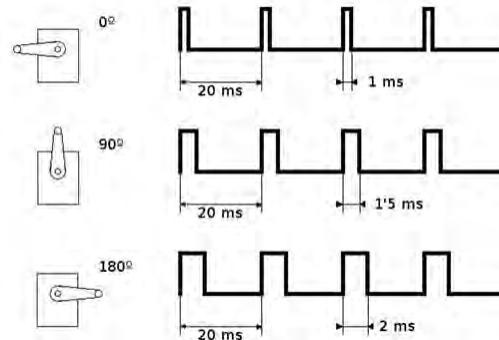


Figura 3.7: Relación del periodo del pulso y la posición angular de un servomotor[28].

En el caso del prototipo del robot murciélago, este tipo de actuadores ofrece una gran facilidad para montarlos en el prototipo ya que con el sistema de engranes, no es necesario un motor de DC de grandes dimensiones por lo que un servomotor de escasos 2 cm en su lado más grande, entrega el par necesario para poder realizar los movimientos de las alas, ya que para el propósito con el cual se construyó el robot, el servomotor permite programar una rutina específica con mayor facilidad y así el robot realizará los movimientos que se desean.

El prototipo cuenta con dos servomotores (uno para cada ala) acoplados a un sistema de transmisión de fuerza mecánica, para realizar el movimiento de flexión y extensión, dichos motores los llamaremos motores pequeños. Para realizar el movimiento conocido como aleteo, acopló un servomotor de mayor tamaño a un sistema de engranes que se creó para este prototipo, y a su vez, este sistema se acopló a los servomotores pequeños, los cuales en conjuntos, son capaces de emular en la mayor medida posible los movimientos que realiza un murciélago en su vuelo.

En la Tabla 3.4 se muestran algunas de las características más relevantes de los servomotores que son utilizados en el prototipo del robot murciélago.

Especificaciones de los servomotores		
	Servomotor pequeño	Servomotor grande
Dimensiones	23 x 12.3 x 25.6 mm	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Peso	9 g	55 g
Torque	2 kg/cm	15 kg/cm
Velocidad	0.08sec/60°	0.13 sec/60°
Rango de voltaje	4.8-6 V	3-7.2 V
Corriente	500 mA	100mA

Tabla 3.4: Especificaciones de los servomotores[28].

### 3.4. Conclusiones

En este capítulo se describe y detalla los elementos tecnológicos con los cuales se pretende la construcción del prototipo del robot murciélago, pese a que este tipo de elementos de construcción existen desde hace ya décadas, hasta los últimos años se ha comenzado a dar relevancia a estas tecnologías dentro de la robótica, aunque no en gran medida ya que todavía los programas profesionales de modelado 3D en versiones completas como lo es SolidWorks, sigue siendo poco accesibles económicamente hablando. En el caso de las impresoras 3D, en los últimos años han tenido un gran realce dentro del entorno domestico haciéndolas cada vez más accesibles.

# Capítulo 4

## Diseño mecánico del chasis

### 4.1. Elaboración de las piezas en SolidWorks

Para el diseño del chasis se utilizó el programa SolidWorks 2013 en la versión de prueba, debido a que es una herramienta bastante completa para el diseño de las piezas del primer prototipo. Para iniciar el trabajo, se comenzó por dimensionar el esqueleto mostrado en la Figura 4.1 a una escala aceptable para la manufactura del prototipo.



Figura 4.1: Esqueleto tomado como base para la creación del chasis.

Tras la revisión de investigaciones relacionadas con este tema de tesis se encontró algunos modelos, sin embargo se decidió que el diseño de las alas fuera basado en la estructura osea de un murciélago real. Durante este análisis, se observó que para diseñar las alas, la transmisión más adecuada sería la transmisión de tipo paralelogramo, ya que es de gran utilidad puesto que con un simple sistema de cuatro barras rígidas se puede transmitir el movimiento del actuador hasta la articulación correspondiente. Al implementar esta transmisión en el prototipo, ayudara a minimizar al máximo el peso de las alas, ya que el actuador tipo servomotor se localiza en la base de la ala y actúa como doble transmisión debido a que cada ala cuenta con dos sistemas de transmisión de tipo paralelogramo acoplados, compartiendo una de sus cuatro barras.

A continuación, se muestra cada una de las piezas elaboradas en SolidWorks y la comparación con el hueso del ala de un murciélago. Cabe resaltar que antes de realizar la impresión 3D de las piezas, estas fueron evaluadas con una simulación del ensamblaje en el mismo software donde fueron diseñadas, al cumplir con su función adecuada de cada una de las piezas se efectuó dicha impresión. El proceso de ensamblaje se observa a mayor detalle en la Sección 4.4 de este capítulo.

## 4.2. Descripción del sistema para la contracción y extensión de las alas

Se comenzó con el hueso llamado húmero, dicho hueso esta localizado entre el hombro y los huesos cúbito y radio. En la Figura 4.2 se observa dicho hueso perteneciente a la ala de un murciélago.



Figura 4.2: Húmero de un murciélago.



Para la elaboración en CAD de dicho hueso en el robot, se utilizó dos barras de la primera transmisión de paralelogramo, donde una de las dos barras es donde se acopló el servomotor que dará el movimiento antes mencionado. Dicho acople se realizó por medio de un soporte que es proporcionado con la adquisición de dicho actuador, por lo que al elaborar esta pieza, se realizó el diseño en uno de sus extremos de una cuenca donde embona el soporte y evita que la barra se desacople del servomotor. En la Figura 4.3 se puede observar la primera de estas barras de la transmisión en CAD.

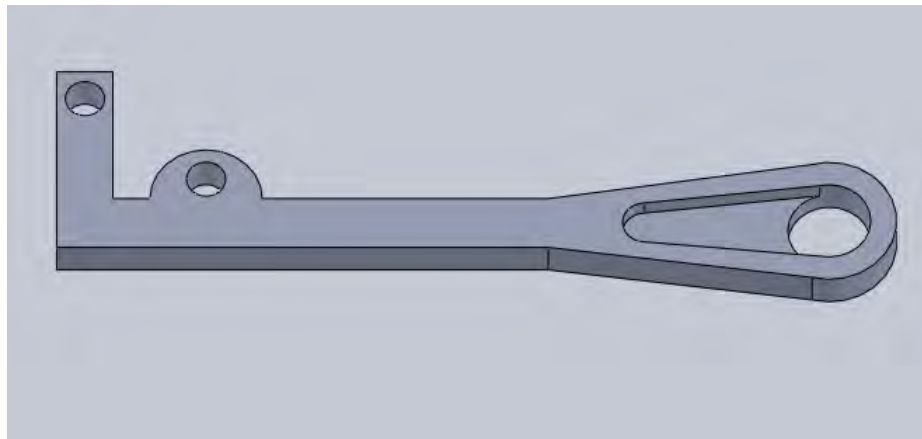


Figura 4.3: Primera pieza en CAD que simula el húmero en el robot.

Para la segunda barra que conforma el húmero en el robot, se realizó una barra más simple en su diseño puesto que esta solo ira fija en uno de sus extremos al soporte del motor como simple apoyo de la primera transmisión de paralelogramo. En la Figura 4.4 podemos observar la segunda barra de dicha transmisión en CAD.



Figura 4.4: Segunda pieza en CAD que simula el húmero en el robot.

Para tener una mejor visión de de esta dos piezas, en la Figura 4.5 y 4.6 se pueden observar los planos de las dos piezas anteriores, en donde se aprecian las medidas específicas correspondientes a cada parte de ellas.

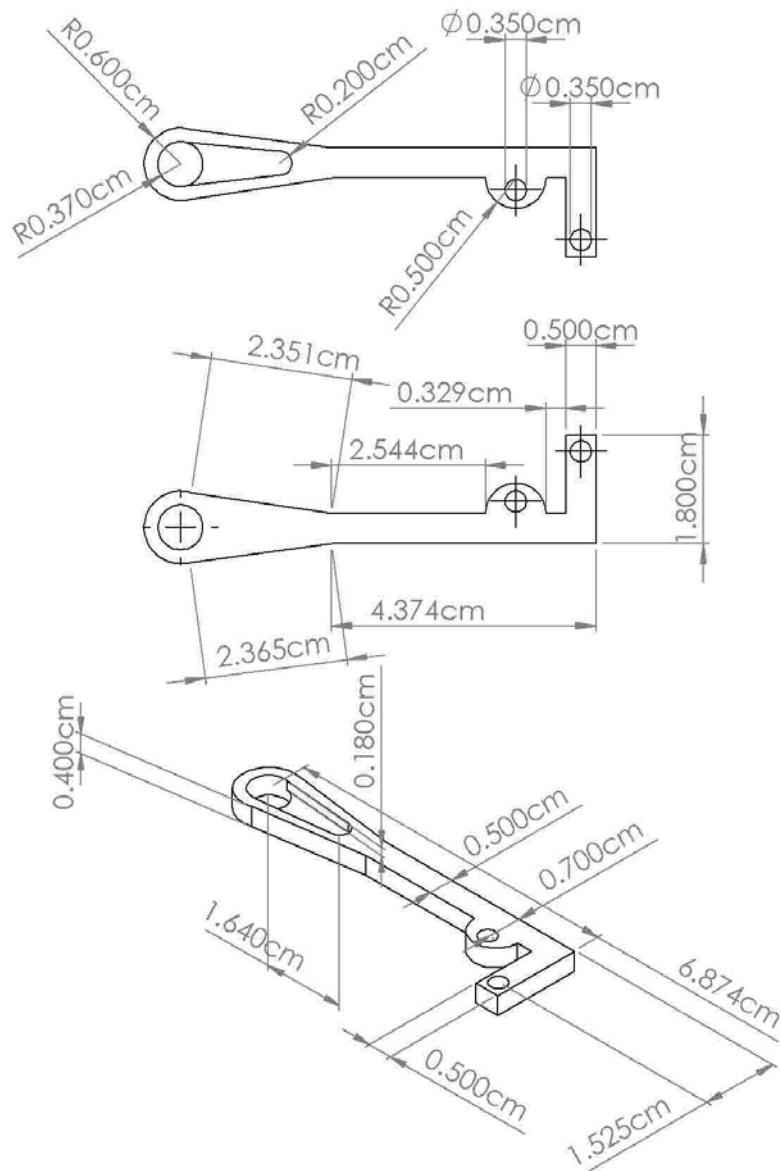


Figura 4.5: Plano correspondiente a la primera barra que conforman el húmero.

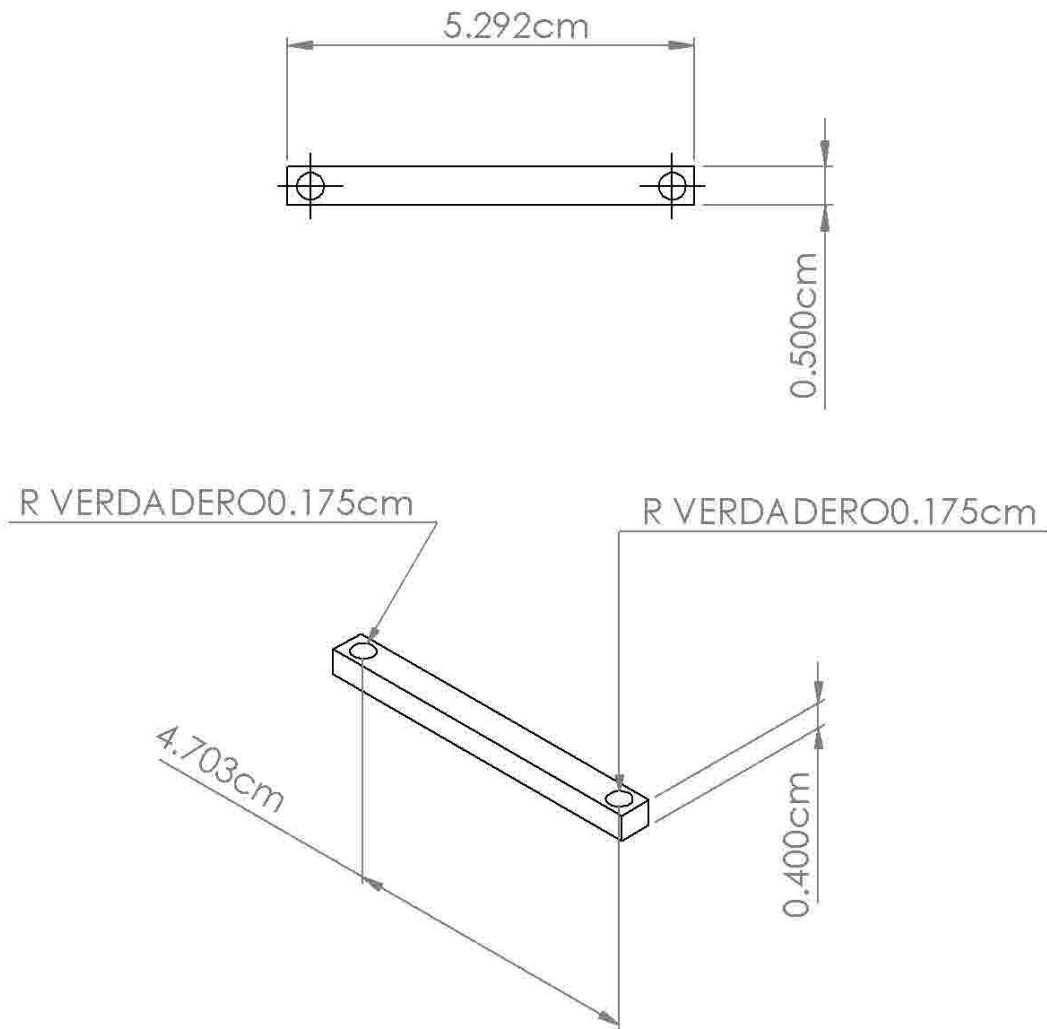


Figura 4.6: Plano correspondiente a la segunda barra que conforman el húmero.

Después de realizar la impresión de las piezas, se prosiguió a realizar el ensamblaje de las piezas con tornillos y tuercas con las medidas adecuadas para entrar en los orificios para simular la articulación. En la Figura 4.7 se observan las dos piezas descritas anteriormente en el ensamblaje físico del robot.



Figura 4.7: Piezas impresas correspondientes al húmero en el ensamblaje físico del robot.

Lo siguiente fue un conjunto de dos huesos llamados cúbito y radio, dichos huesos están localizados entre el húmero y los huesos carpales, a diferencia del brazo humano, estos dos huesos son de una longitud casi igual, en los murciélagos, el cúbito es de mucho menor longitud que el radio. En la Figura 4.8 se puede observar este conjunto de huesos del esqueleto de un murciélago.

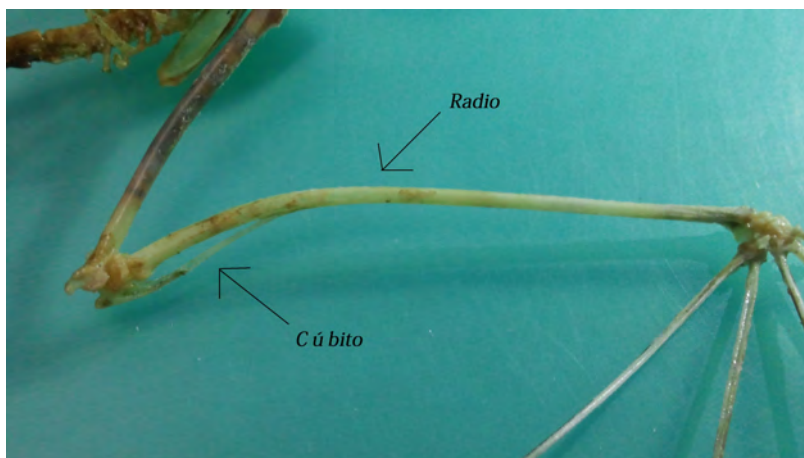


Figura 4.8: Cúbito y radio de un murciélago.

Para la elaboración en CAD se utilizó un sistema parecido al anterior, puesto que para simular dicho conjunto de huesos se utilizó una segunda transmisión de tipo paralelogramo acoplada a la primera ya descrita anteriormente, este acoplamiento se apreciara de mejor manera más adelante.

Este conjuntos de huesos también están elaborados con dos de las cuatro barras del segundos sistema de transmisión, la primera barra cuenta en uno de sus extremos con un orificio el cual sirve para fijar la transmisión a la primera y servir como punto de apoyo. En la Figura 4.9 se puede observar el CAD de esta primera barra que representa el cúbito y radio en el robot.



Figura 4.9: Primera pieza en CAD del cúbito y radio en el robot.

La segunda barra al igual que la de la transmisión anterior, tiene un diseño más sencillo, esta barra va fija con un tornillo en una pequeña exención de la primera barra de la primera transmisión. En la Figura 4.10 se puede observar el CAD de esta segunda barra.



Figura 4.10: Segunda pieza en CAD del cúbito y radio en el robot.

En la Figura 4.11 y 4.12 se puede observar los planos de las dos piezas antes descritas respectivamente, en los cuales se muestran las medidas de cada elemento que las conforman.

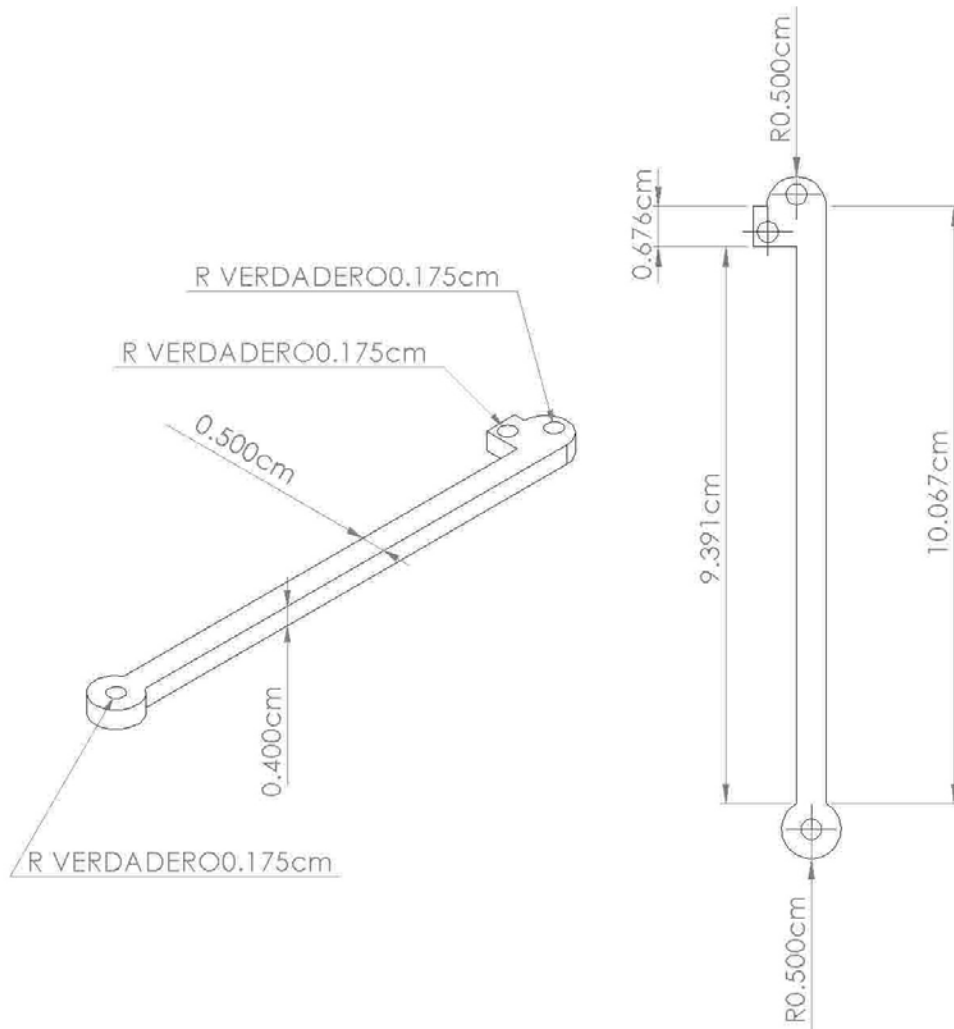


Figura 4.11: Plano correspondiente a la primera barra que conforman el cúbito y radio.

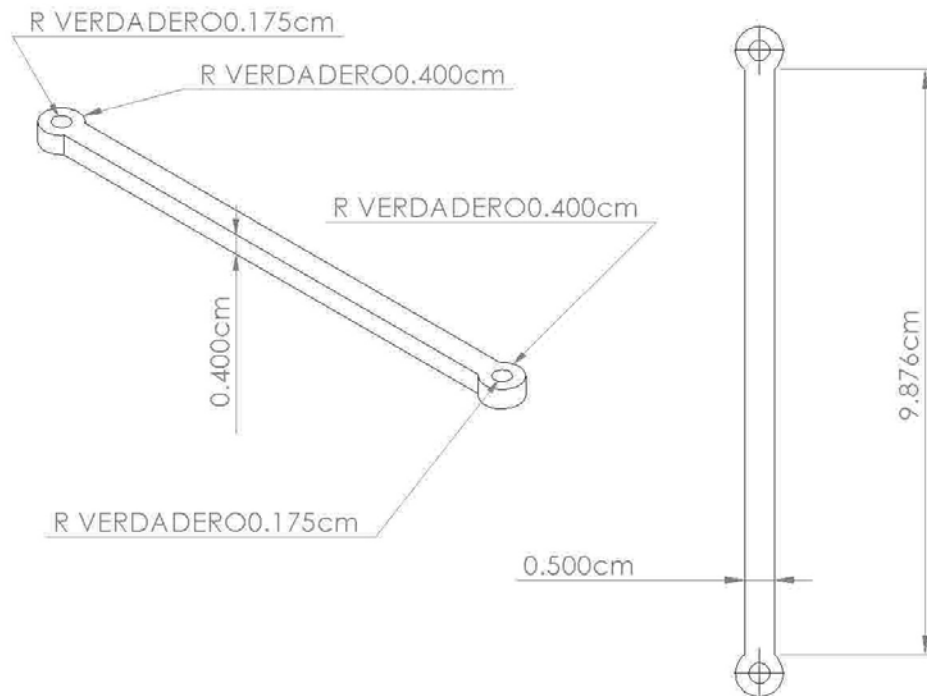


Figura 4.12: Plano correspondiente a la segunda barra que conforman el cúbito y radio.

Después de realizar la impresión de las piezas, se prosiguió a realizar en ensamblaje de las piezas con tornillos y tuercas con las medidas adecuadas para entrar en los orificios para simular la articulación. En la Figura 4.13 se observan las dos piezas descritas anteriormente en el ensamblaje físico del robot.



Figura 4.13: Piezas impresas correspondientes al cúbito y radio en el ensamblaje físico del robot.

La elaboración de la última pieza que constituye el sistema de contracción y extensión de las alas, simula un conjunto de diversos huesos contenidos en la mano del murciélago, en la Figura 4.14 se puede observar los huesos que constituyen dicha parte del murciélago.

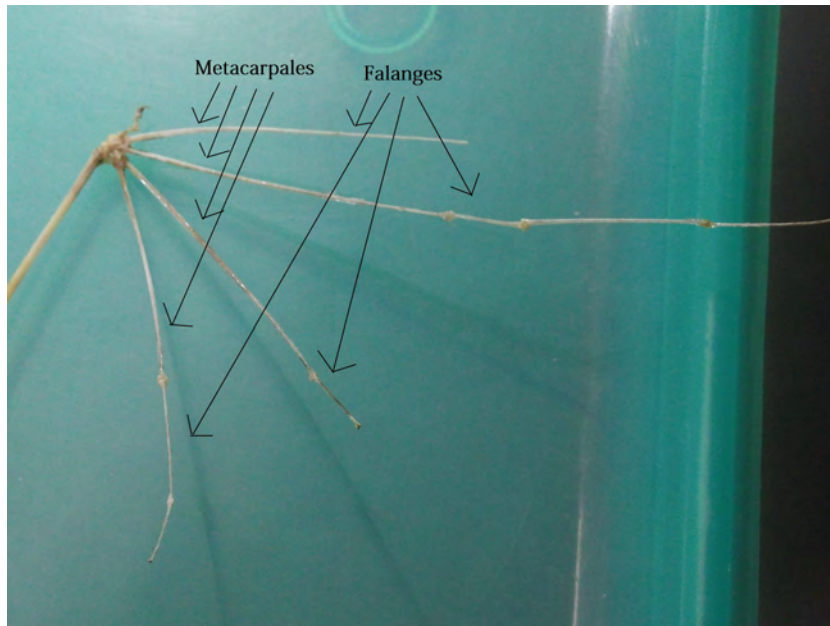


Figura 4.14: Carpales, metacarpales y falanges de un murciélago.

Para la elaboración de esta pieza se tomaron diversas consideraciones debido a que, para fines del uso de este robot, no es necesario simular cada uno de los huesos que componen la mano del murciélago debido a que en el vuelo de este animal, esta parte siempre esta totalmente extendida.



Para elaboración en CAD de esta pieza solo se tomó en cuenta la forma y relación longitudinal entre los huesos del mamífero, dicha pieza cuenta con dos orificios los cuales son donde se fijaran las barras que simulan el cúbito y radio, siendo al mismo tiempo la cuarta barra de la segunda transmisión utilizada. En la Figura 4.15 se puede observar esta pieza elaborada en CAD.

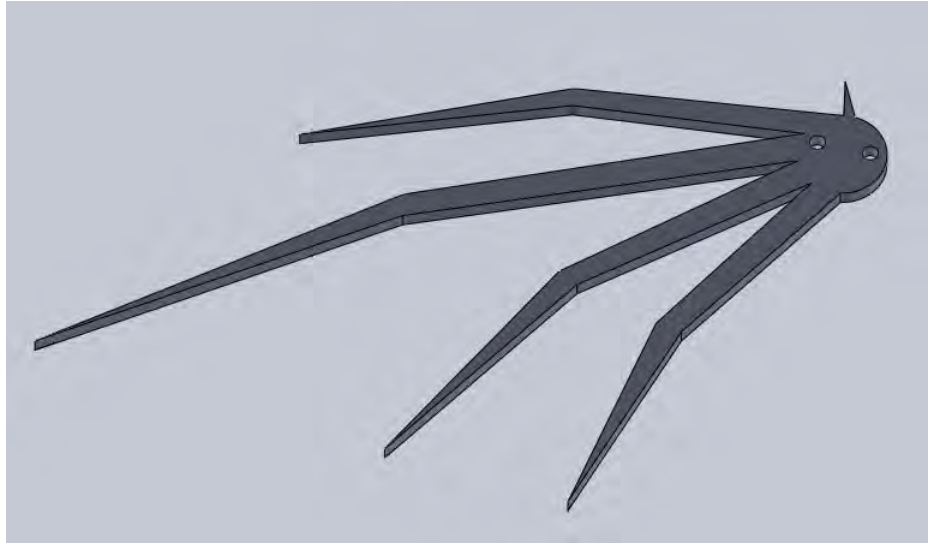


Figura 4.15: Pieza en CAD de los carpales, metacarpales y falanges en el robot.

Para tener una mejor visión de la pieza, en la Figura 4.16 se muestra el plano de la pieza descrita anteriormente con las medidas de los elementos que la conforman.

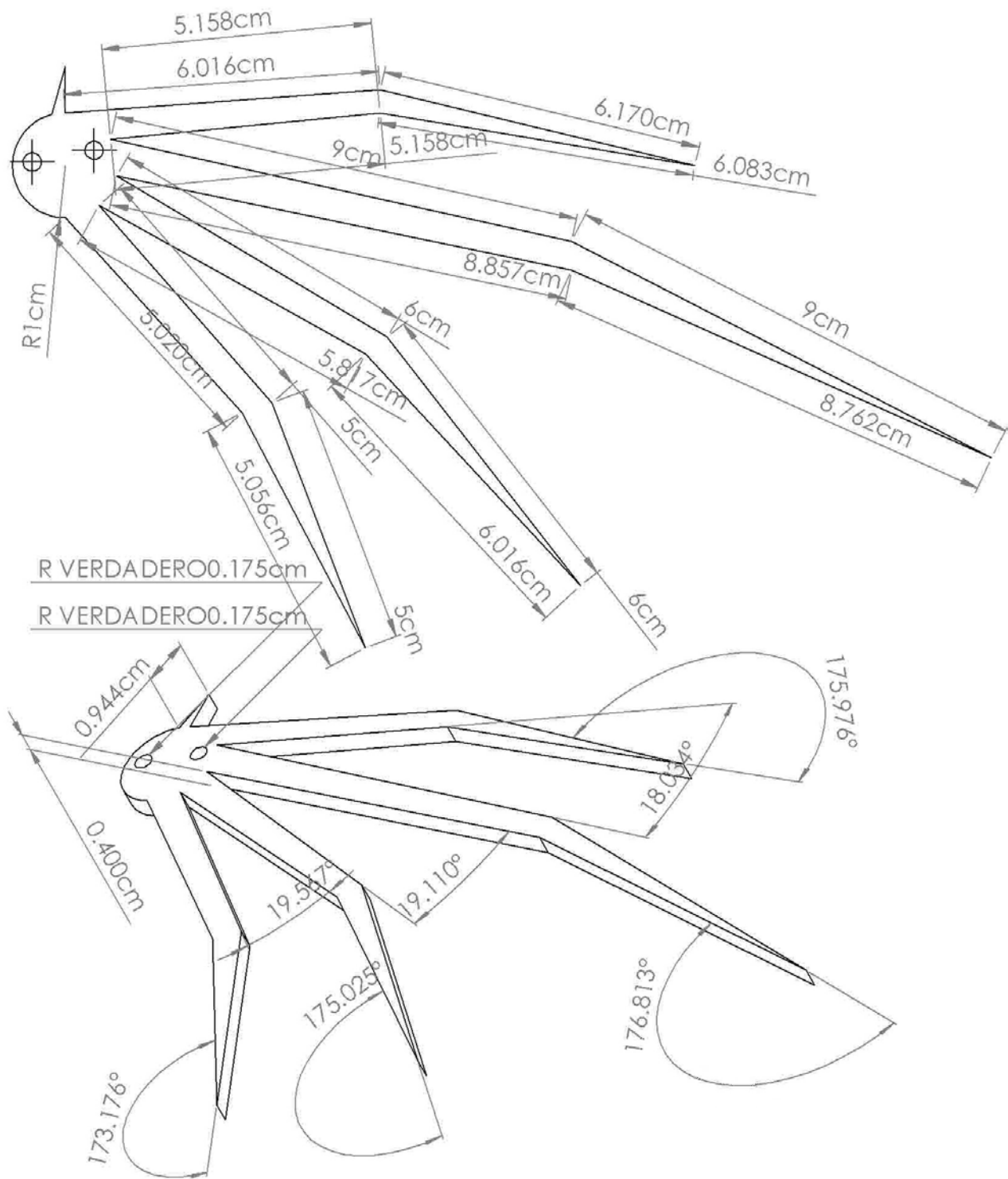


Figura 4.16: Plano correspondiente al CAD del conjunto de huesos de la mano del murciélago.

Después de realizar la impresión de esta última pieza de las alas, se prosiguió a realizar el ensamblaje de las piezas con tornillos y tuercas con las medidas adecuadas para entrar en los orificios para simular la articulación correspondiente a la muñeca. En la Figura 4.17 se observa la pieza descrita anteriormente en el ensamblaje físico del robot.

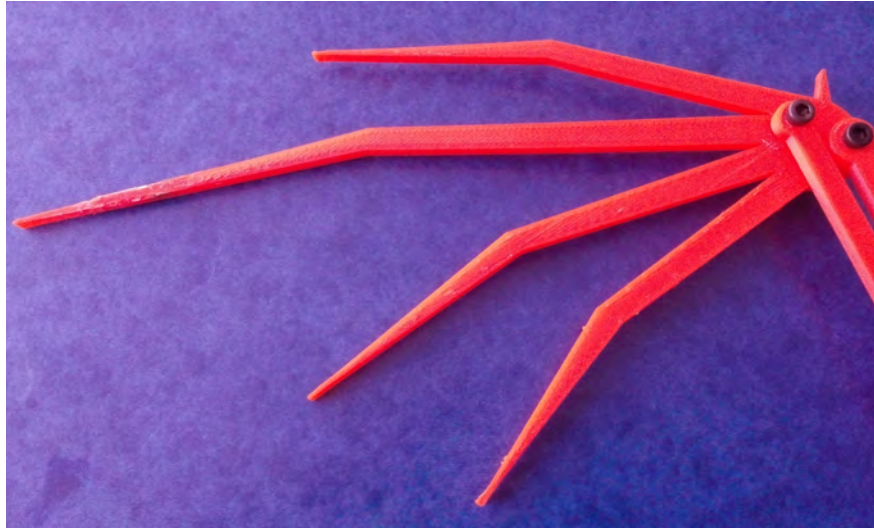


Figura 4.17: Pieza impresa correspondiente al conjunto de huesos de la mano en el ensamblaje físico del robot.

Debido a que el esqueleto del murciélago muestra una simetría casi idéntica entre sus alas, se tomaron las piezas antes descritas para formar las dos extremidades del robot, solamente realizando la inversión de la cara de un par de piezas para que funcionaran para la otra ala.

### 4.3. Descripción del sistema para el aleteo

Para la elaboración del sistema para el aleteo del murciélago primero se diseñó el soporte del ala, dicho soporte tendrá dos funciones principales, la primera es ser la base en donde descansa el sistema de contracción y extensión de las alas, la segunda función es contener y ser la base del servomotor que brindará el movimiento de contracción y extensión de las alas, siendo de esta forma para hacer más eficiente dicho sistema.

Esta pieza tiene una forma en la cual el servomotor embona exactamente para evitar que salga de su posición deseada, ya que el eje del actuador está sujeto a la ala, a un costado cuenta con una saliente la cual es en donde la segunda barra que conforma el húmero descansa y esta sujeta por un tornillo para ser el punto de apoyo de la primera transmisión de la ala, por último, en la parte frontal tiene una saliente cilíndrica la cual será un soporte para el sistema de transmisión del aleteo. En la Figura 4.18 se puede observar esta pieza en CAD.

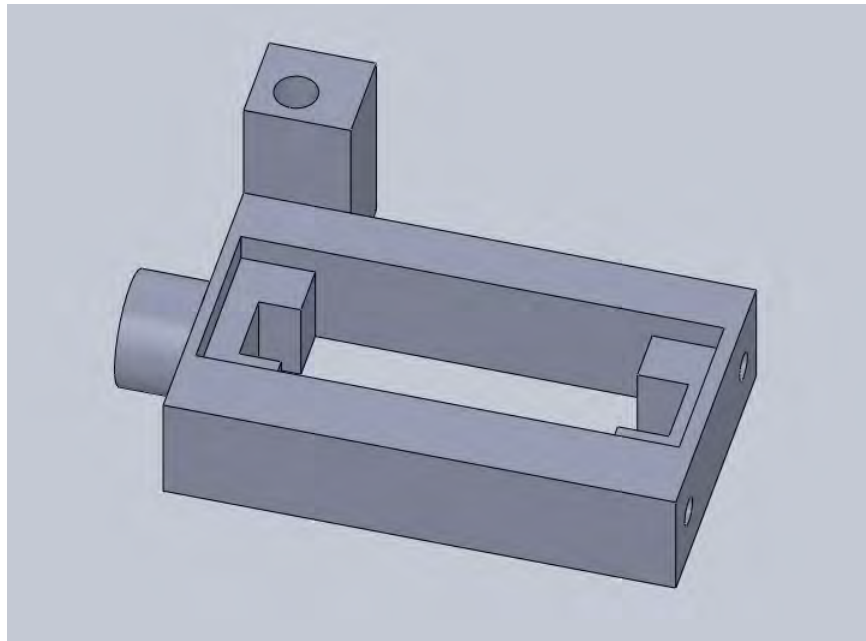


Figura 4.18: Base para los servomotores en CAD.

Para poder visualizar de mejor manera la pieza anterior, en la Figura 4.19 se muestra el plano correspondiente con las medidas de cada parte, así como distintas vistas para observar su diseño.

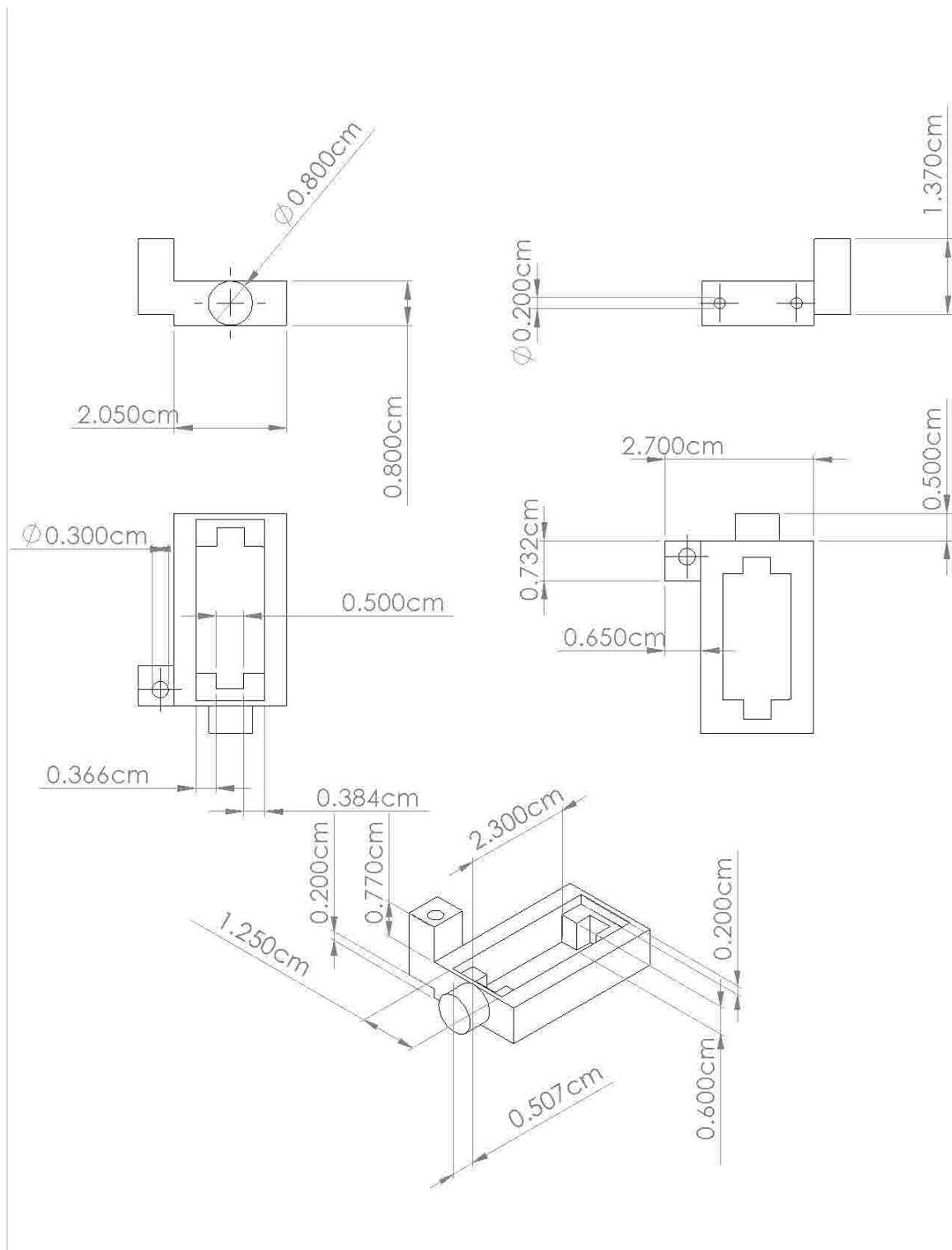


Figura 4.19: Plano de la base para el servomotor.

Después de realizar la impresión 3D de la pieza, en la Figura 4.20 se puede observar la pieza física.

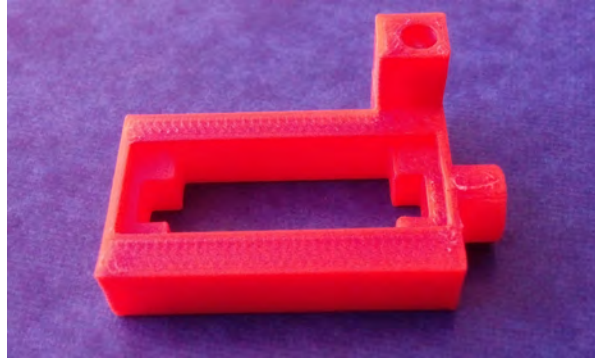


Figura 4.20: Base del servomotor impresa.

Cabe aclarar que la base del servomotor para la otra ala, se implemento el mismo diseño y respetando las mismas medidas, pero adaptado para crear una simetría de espejo.

Para la siguiente parte, se pensó un sistema de transmisión con el cual se pudiera hacer más eficiente el uso de los actuadores, puesto que el movimiento que se tiene contemplado en el aleteo es de tipo oscilatorio, y a su vez, dicho movimiento es de simetría de espejo entre las dos alas del murciélago. Un sistema de transmisión que puede satisfacer estas dos necesidades es un sistema de engranes simples 1:1, debido a que en dicho sistema, la velocidad en cada engrane es la misma pero la dirección de rotación es contraria. Estos engranes deberán tener un tamaño mínimo para poder localizarlos al interior del robot así como implementar elementos para poderlos fijar a las bases de los servomotores.

Para el diseño de dichos engranes, hay tres consideraciones principales que se tienen antes de comenzar los cálculos. La primera es determinar el tipo de eje entre los engranes, para nuestro modelo se requiere que los ejes sean paralelos por el tipo de movimiento que se requiere, por consecuencia, el tipo de diente adecuado para los engranes será el diente recto, la segunda será diámetro exterior que tendrá el engrane, para este diámetro se propuso un valor inicial de 3.5 cm para que entre los dos engranes que componen la transmisión se tenga una longitud de 7 cm la cual es aceptable para el tamaño del robot, la tercera es el número de dientes que tendrá el engrane, aunque no existe una regla estricta para esto, se sabe que un número mayor de dientes le dará una mayor suavidad en el desplazamiento entre los engranes, sin embargo, al implementar un número grande de dientes la altura que tendrán estos disminuirá teniendo como consecuencia que, por el material con el cual se pretende estén constituidos, puedan desgastarse, romperse o “barrerse”, para el diámetro que se contempló, se tomarán 8 dientes lo cual es algo aceptable.

A continuación se muestra una lista de los elementos necesarios que se calcularon para poder realizar el diseño CAD de los engranes así como una pequeña descripción de dichos elementos [36].

- Número de dientes (Z): Número total de dientes que conformaran al engrane.

$$Z = 8$$

- Diámetro exterior (De): También denominado diámetro total, es el correspondiente a la circunferencia en la cual está inscrita la rueda dentada.

$$De = 3.5cm$$

- Módulo (M): Es el cociente que resulta de dividir el diámetro primitivo, expresado en milímetros, entre el número de dientes de la rueda.

$$M = \frac{De}{Z + 2} \tag{4.1}$$

$$M = \frac{3.5}{8 + 2}$$

$$M = 0.35$$

- Diámetro primitivo ( $D_p$ ): Es el diámetro correspondiente a la circunferencia primitiva.

$$D_p = (M)(Z) \quad (4.2)$$

$$D_p = (0.35)(8)$$

$$D_p = 2.8cm$$

- Diámetro interior ( $D_i$ ): Conocido también como diámetro de fondo, es el correspondiente a la circunferencia que limita interiormente a los dientes.

$$D_i = (D_p - 2.5)(M) \quad (4.3)$$

$$D_i = (2.8 - 2.5)(0.35)$$

$$D_i = 1.925cm$$

- Paso circular ( $P$ ): Es la distancia entre dos puntos homólogos de dos dientes consecutivos, medida sobre la circunferencia primitiva. Para que dos ruedas engranen, ambas tienen que tener el mismo paso circular.

$$P = (\pi)(M) \quad (4.4)$$

$$P = (\pi)(0.35)$$

$$P = 1.0995$$



- Altura del diente (H): Medida desde el fondo del diente a la cresta.

$$H = (2.25)(M) \quad (4.5)$$

$$H = (2.25)(0.35)$$

$$H = 0.7875cm$$

- Altura de cabeza dental (Hc): Medida desde la circunferencia primitiva a la cresta del diente.

$$Hc = M \quad (4.6)$$

$$Hc = 0.35$$

- Altura del pie de diente (Hp): Medida desde el fondo del diente a la circunferencia primitiva.

$$Hp = (1.25)(M) \quad (4.7)$$

$$Hp = (1.25)(0.35)$$

$$Hp = 0.4375cm$$

- Espesor del diente (E): Medido sobre la circunferencia primitiva.

$$E = (0.5)(P) \quad (4.8)$$

$$E = (0.5)(1.0995)$$

$$E = 0.5497$$

- Ancho del diente (B): Es el ancho del diente medido en dirección paralela al eje del diente.

$$B = (M)(10) \quad (4.9)$$

$$B = (0.35)(10)$$

$$B = 0.965cm$$

Con las medidas que se obtuvieron anteriormente, se realizó el CAD de los dos engranes utilizados para la transmisión, cabe mencionar que el engrane cuenta con una extrucción de 1.5 cm. Para el primer engrane se integró en una de sus caras dos orificios en donde entrarán los tornillos para fijarlos en las bases de los servomotores que mueven las alas, de igual manera, una cuenca en donde embona la pieza que unirá al engrane con el eje del servomotor grande. Para el segundo engrane solo se realizó los dos orificios para los tornillos. En la Figura 4.21 se puede observar el engrane diseñado con las medidas y detalles anteriores.

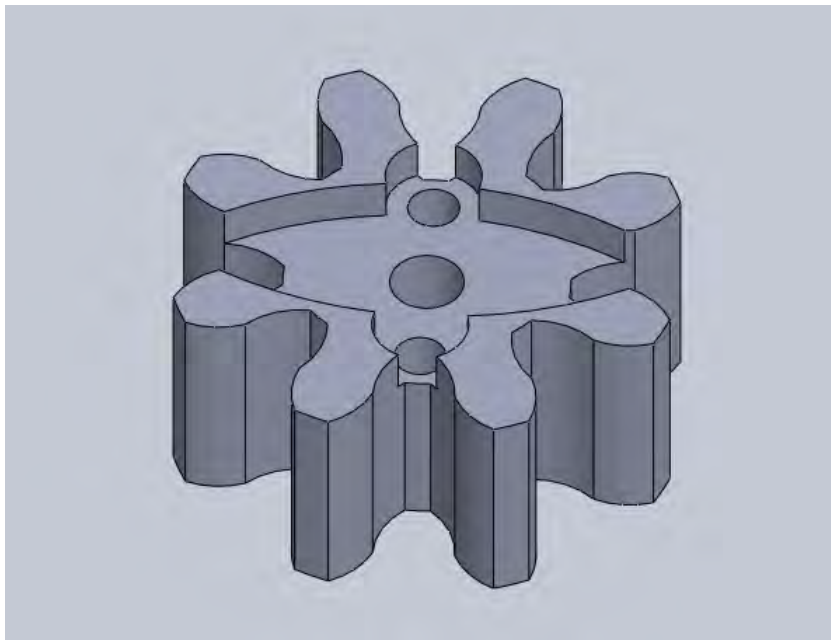


Figura 4.21: CAD del engrane principal.

Para visualizar de mejor manera el diseño del engrane, en la Figura 4.22 se puede observar el plano del diseño del engrane.

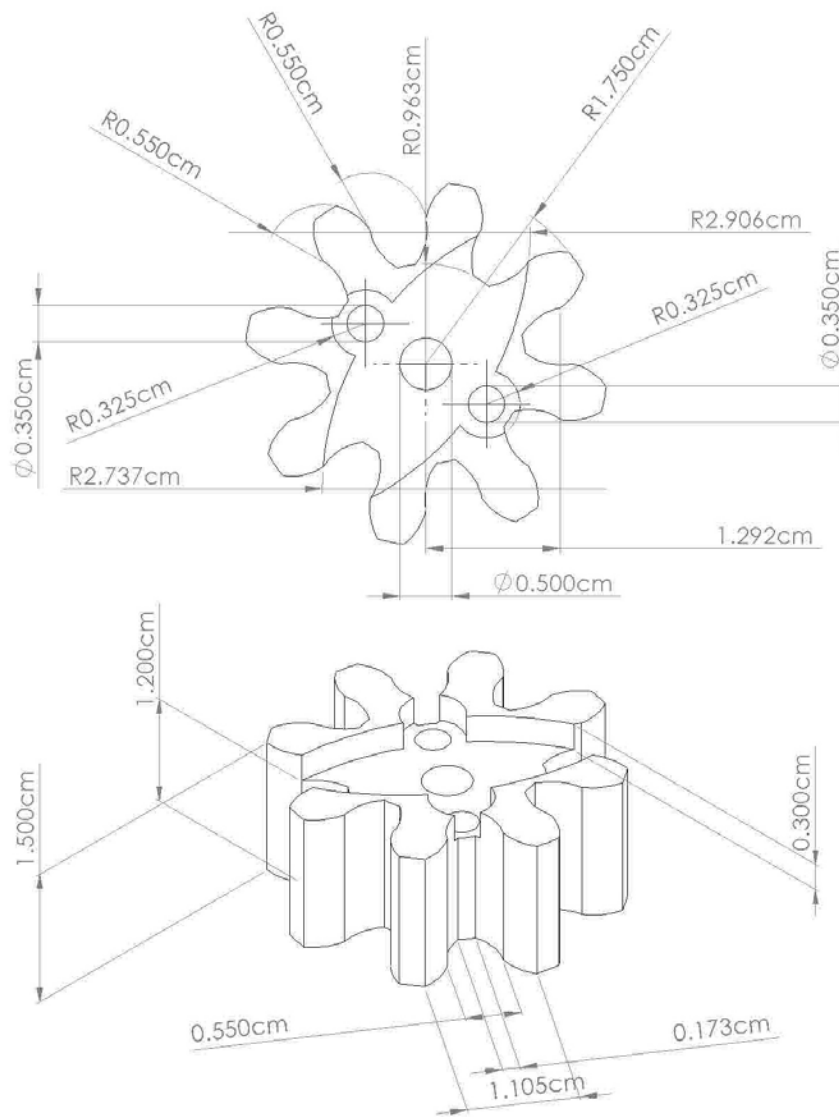


Figura 4.22: Plano del engrane.

Después de realizar la impresión 3D de la pieza, en la Figura 4.23 se puede observar la pieza física.



Figura 4.23: Pieza impresa correspondiente al engrane diseñado.

La última pieza a elaborar del robot es la base principal la cual podría equipararse con el torso del murciélago, dicha pieza será donde estará montado los engranes, la base de las alas y el servomotor grande. El diseño cuenta con dos pares de orificios en los cuales se tomarán los ejes que forman los engranes y las bases de las alas. En la parte frontal se diseñó una base en la cual embonará un servomotor pequeño, este actuador dará movimiento horizontal a la cabeza del murciélago, en la parte posterior tendrá una cavidad en la cual entra el servomotor grande así como una extensión en donde se montarán posteriormente las piernas del murciélago. En la Figura 4.24 se muestra el CAD de la base antes mencionada con todos los detalles que se han contemplado.

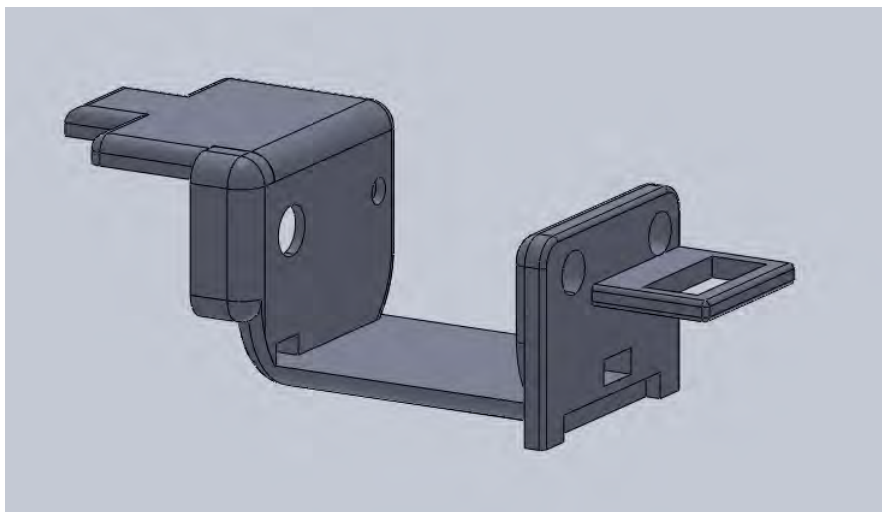


Figura 4.24: CAD de la base principal del robot.

Para contemplar a detalle el diseño de esta pieza, en la Figura 4.25 se puede observar el plano con las medidas de todos los elementos que conforman esta pieza.

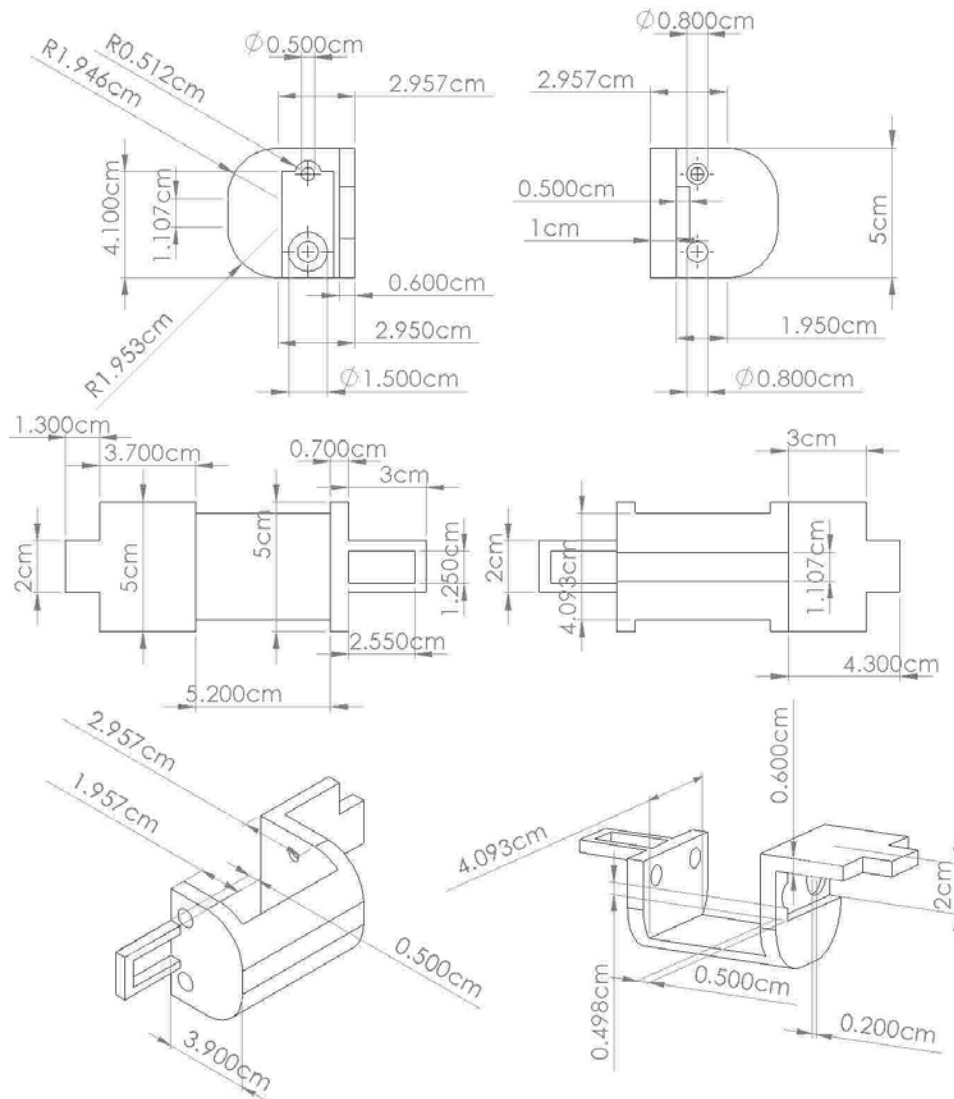


Figura 4.25: Plano de la base principal del robot.

Después de realizar la impresión de esta pieza, en la Figura 4.26 se puede observar la pieza ya impresa.

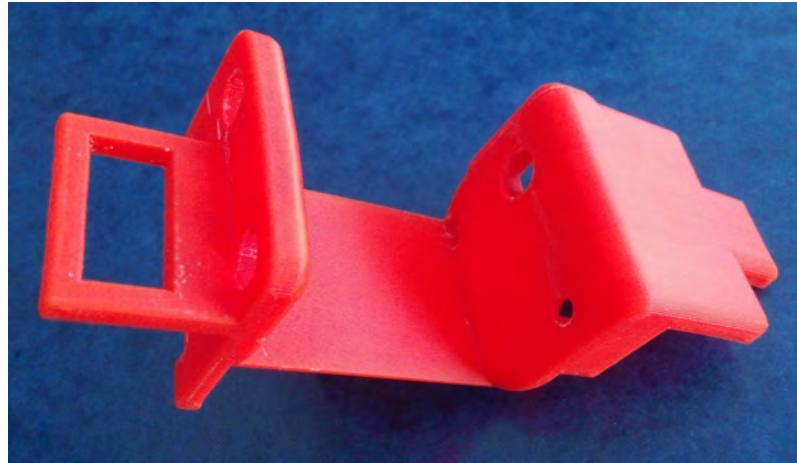


Figura 4.26: Pieza correspondiente a la base principal o torso del robot.

#### 4.4. Ensamblaje del robot

Como ya se mencionó, a principio de este capítulo, el proceso de ensamblaje se realizó en dos pasos, el primero fue realizar éste proceso en SolidWorks con las piezas CAD que en las secciones 4.2 y 4.3 se describen, para lo cual, al presentar alguna falla en el diseño de algunas de las piezas, se realizaron las correcciones y modificaciones pertinentes para que se obtuviera un modelo adecuado, el cual cumpla con lo que se pretende obtener. En las Figuras 4.27, 4.28 , 4.29 y 4.30 se puede observar el ensamblaje de las piezas para formar el robot murciélago en SolidWorks con distintas vistas.

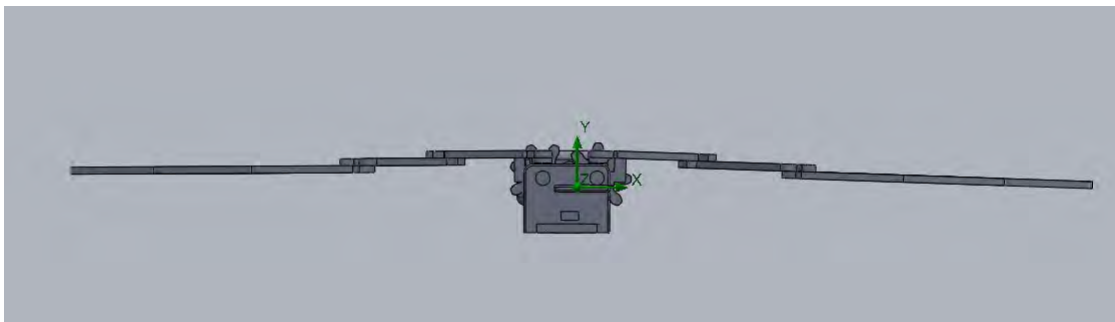


Figura 4.27: Vista frontal del ensamblaje en SolidWorks.

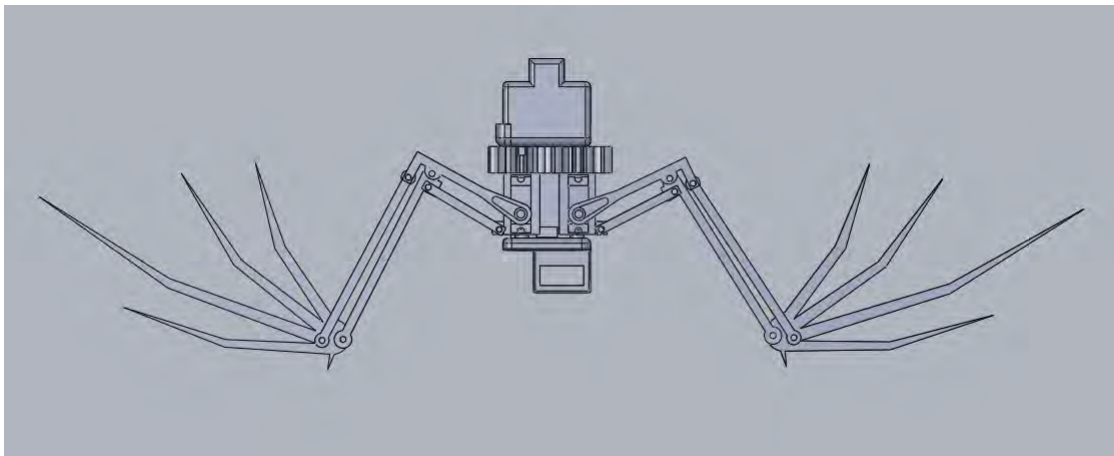


Figura 4.28: Vista superior del ensamblaje en SolidWorks.

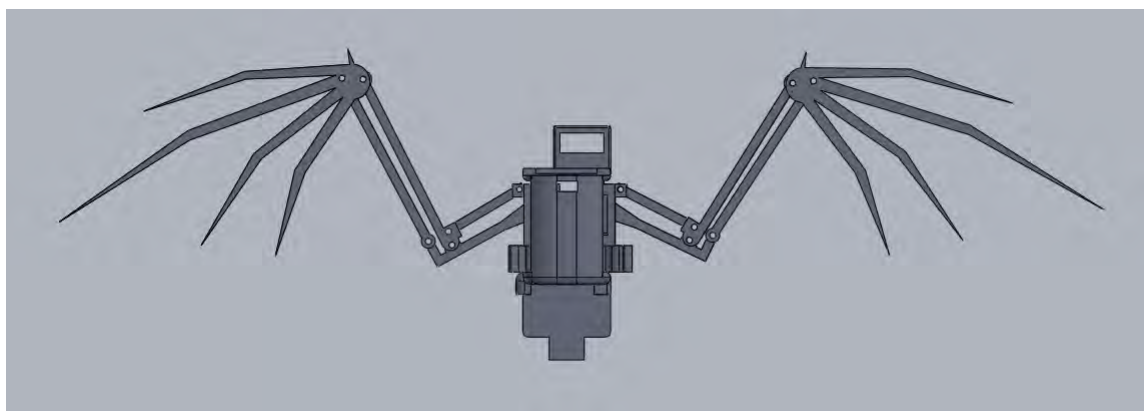


Figura 4.29: Vista inferior del ensamblaje en SolidWorks.

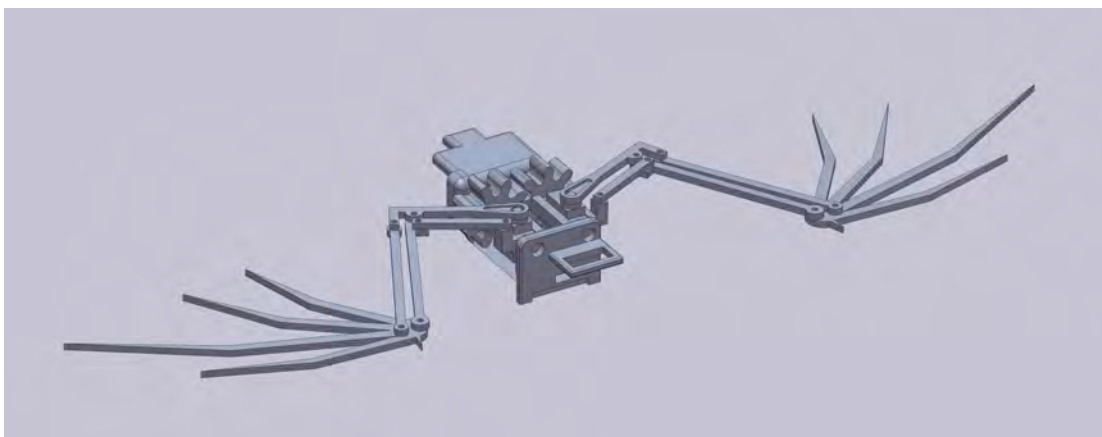


Figura 4.30: Vista isométrica del ensamblaje en SolidWorks.



Para poder visualizar de mejor manera el ensamblaje de las piezas para formar el robot, en la Figura se muestra el planos con el fin de ver el posicionamiento de cada pieza del robot, la Figura 4.31 superior del plano es el modelo ensamblado, en la inferior se muestra el robot explosionado con las líneas de construcción.

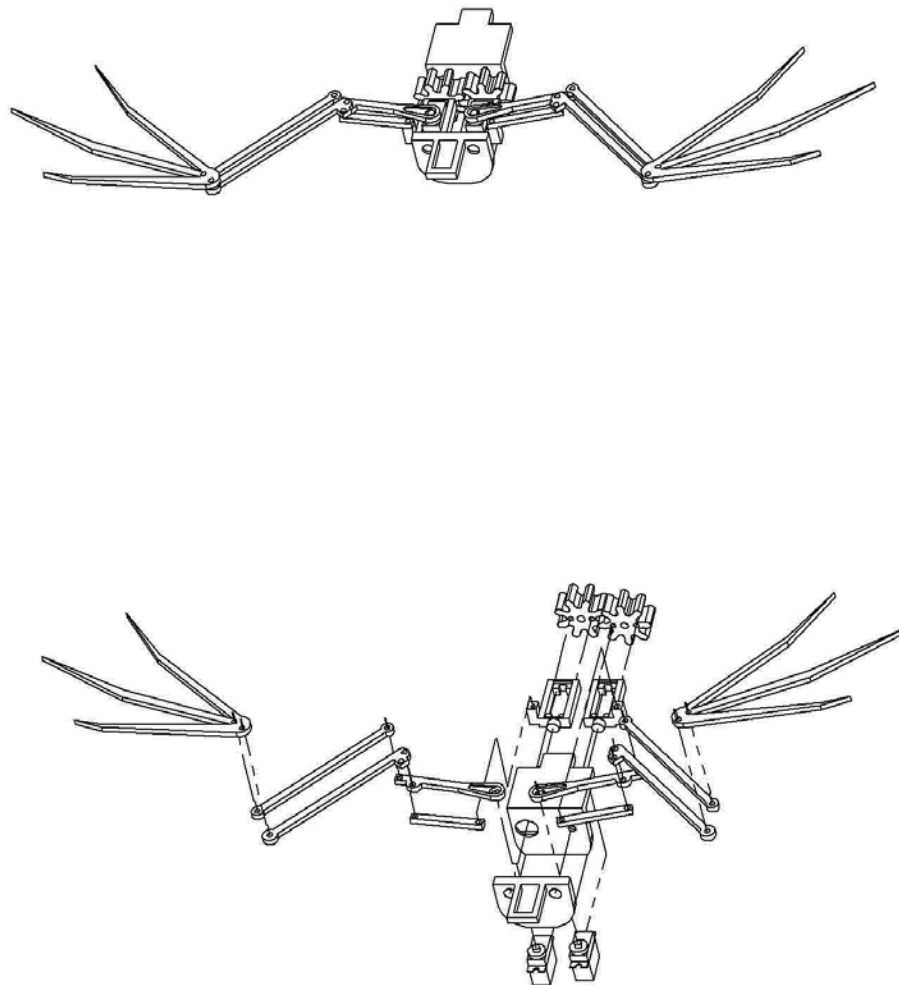


Figura 4.31: Plano del ensamblaje del robot.

Después de realizar los planos anteriores se realizó el ensamblaje de las piezas así como la integración de los actuadores en su lugar correspondiente. En las Figuras 4.32, 4.33, 4.34 y 4.35 se puede observar distintas perspectivas del robot ya ensamblado.

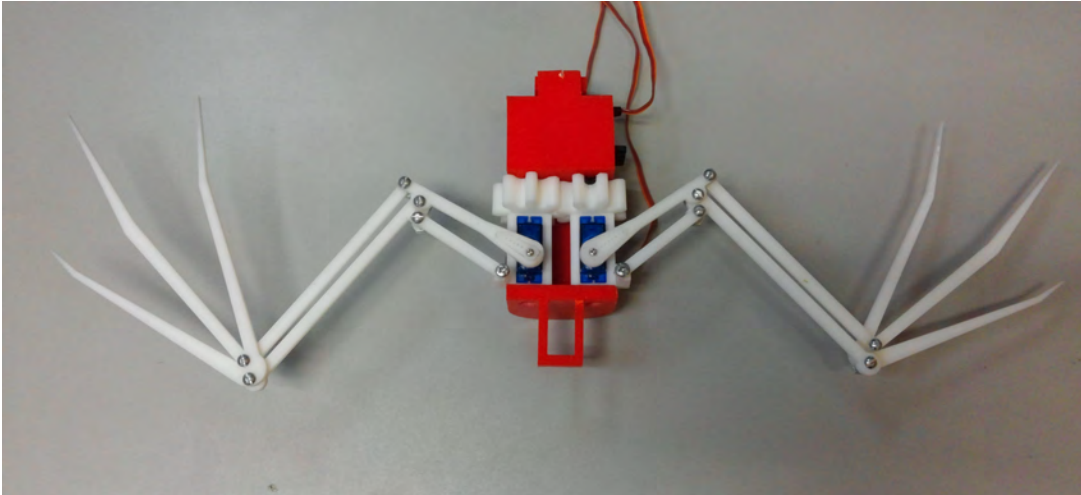


Figura 4.32: Vista superior del robot.

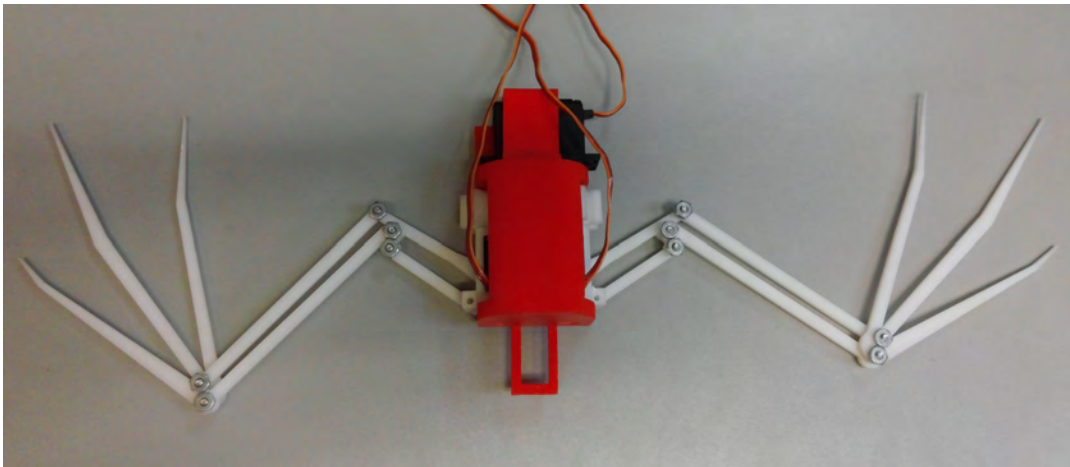


Figura 4.33: Vista inferior del robot.

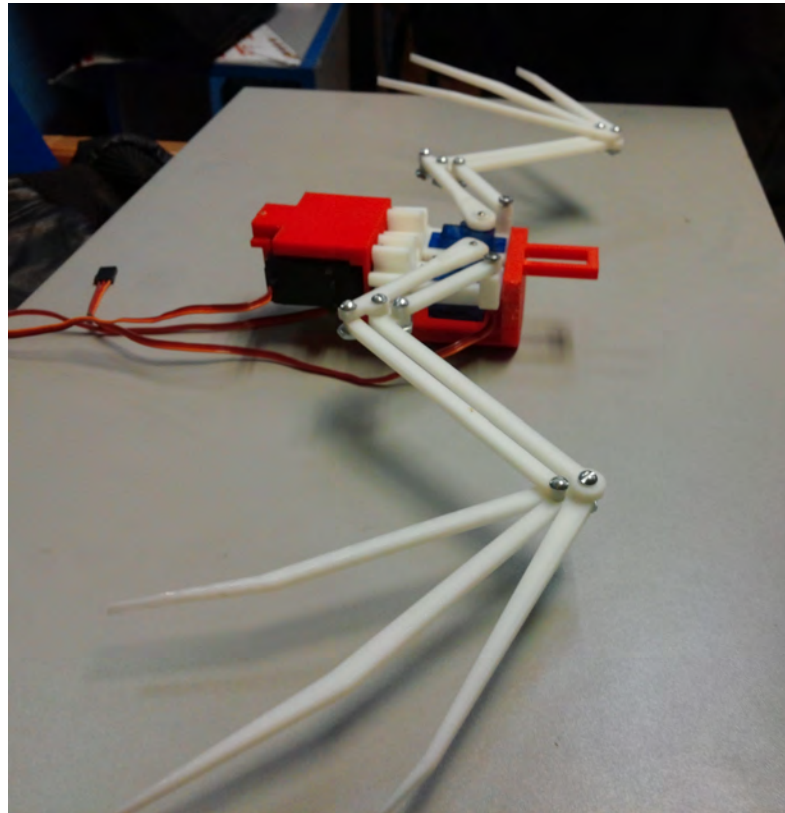


Figura 4.34: Vista lateral del robot.

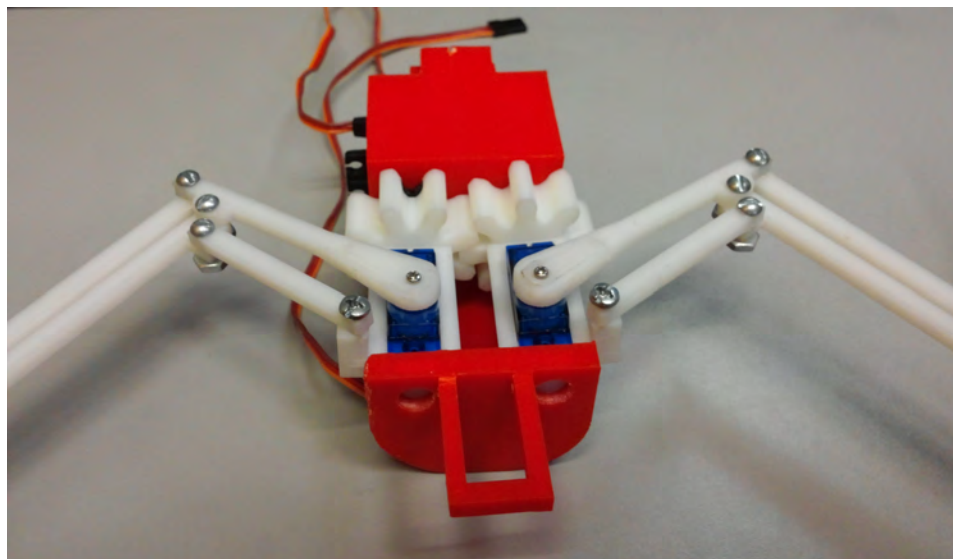


Figura 4.35: Acercamiento al torso del robot.

## 4.5. Comentarios

Como se vio en este capítulo, se llevó a detalle la descripción de cada uno de los eslabones que conforman el chasis del robot, esto se hizo con el fin de renderizar cada una de las partes con el esqueleto de un murciélago real y así poder tener una mayor semejanza en proporciones y movimiento. Al realizar este proceso, se pudo eliminar y depurar detalles que en la elaboración tradicional de un prototipo podrían pasar desapercibidos. Por lo que las nuevas herramientas tecnológicas ciertamente nos ayudan a aminorar el uso de recursos en el proceso de construcción en el área de la robótica.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Comparación del murciélago, el robot y el CAD

Para poder tener una mejor visión de los resultados obtenidos, en este capítulo se mostrará el renderizado del diseño del robot ya ensamblado con respecto al CAD y a una serie de imágenes de un murciélago real en vuelo.

Debido a que se cuenta con muy poca información visual con respecto al vuelo del murciélago, se tomó un video proporcionado por el Dr. Rojas para tratar de realizar la comparación. Se decidió que sería un total de 5 posiciones de las alas del murciélago real para tratar de reproducirlas con el robot así como con el CAD. En la Figura 5.1 se muestra la primera posición de las alas del murciélago real la cual esta en el punto superior.



Figura 5.1: Primera posición de las alas del murciélago real.

En la Figura 5.2 se puede observar el CAD del robot en la posición de la imagen anterior.

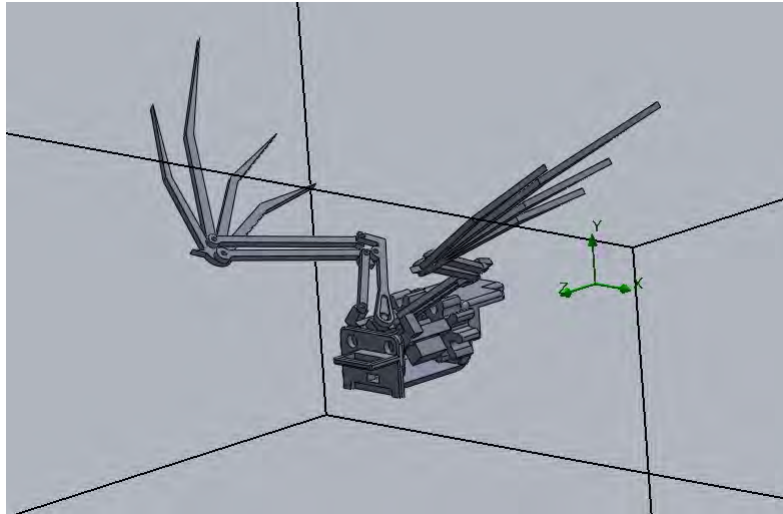


Figura 5.2: Primera posición de las alas del CAD.

En la figura 5.3 se puede observar el robot, el cual esta en la misma posición que la del murciélago real y la del CAD.



Figura 5.3: Primera posición de las alas del robot.

En la Figura 5.4 se puede observar la segunda posición que toman las alas del murciélago y la cual se trata de reproducir con el robot.



Figura 5.4: Segunda posición de las alas del murciélago real.

En la Figura 5.5 se observa el CAD del robot el cual se posicionó de tal manera que asemeja la posición de la figura anterior.

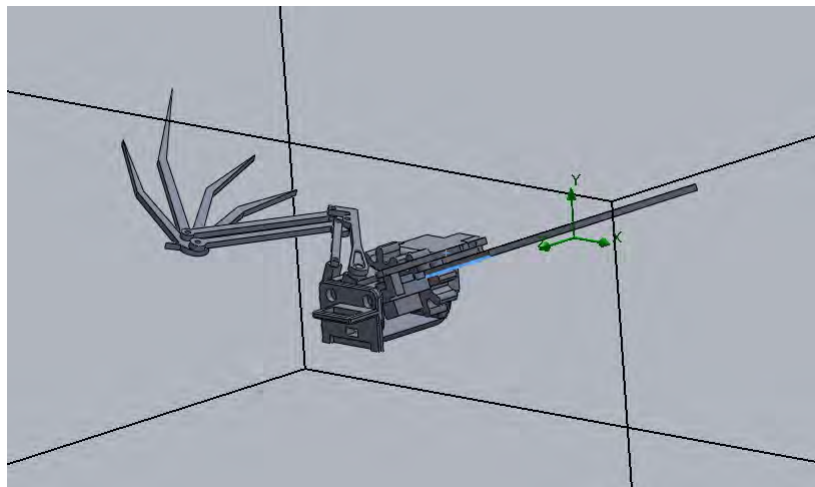


Figura 5.5: Segunda posición de las alas del CAD del murciélago.

En la Figura 5.6 se muestra el robot murciélago imitando la posición 2.



Figura 5.6: Segunda posición de las alas del robot murciélago.

En la Figura 5.7 se puede observar la tercera posición que toman las alas del murciélago.



Figura 5.7: Tercera posición de las alas del murciélago real.



En la Figura 5.8 se observa el CAD del robot el cual se posicionó como la figura anterior.

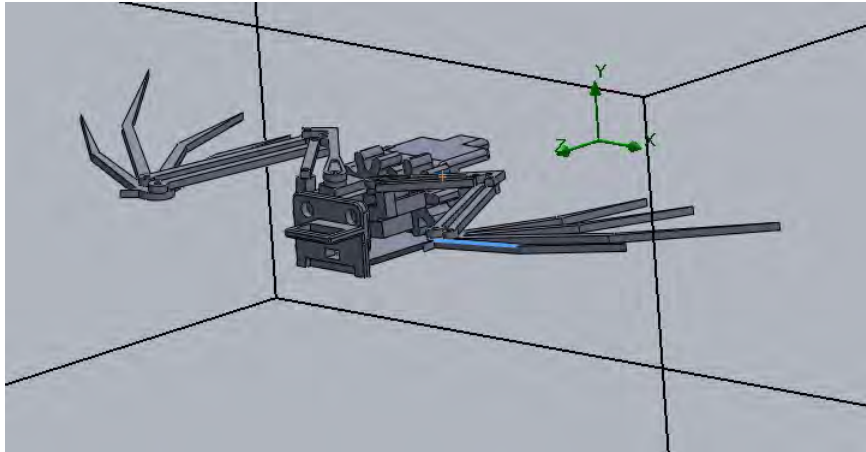


Figura 5.8: Tercera posición de las alas del CAD del murciélago.

En la Figura 5.9 se muestra el robot murciélago imitando la posición 3.



Figura 5.9: Tercera posición de las alas del robot murciélago.

En la Figura 5.10 se puede observar la cuarta posición que toman las alas del murciélago.



Figura 5.10: Cuarta posición de las alas del murciélago real.

En la Figura 5.11 se observa el CAD del robot el cual se posicionó como la figura anterior.

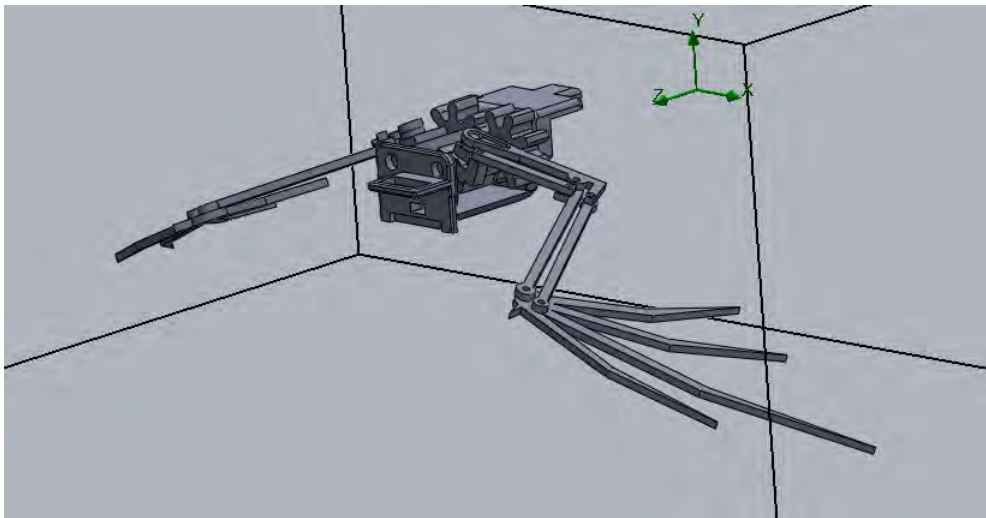


Figura 5.11: Cuarta posición de las alas del CAD del murciélago.

En la Figura 5.12 se muestra el robot murciélago imitando la posición 4.

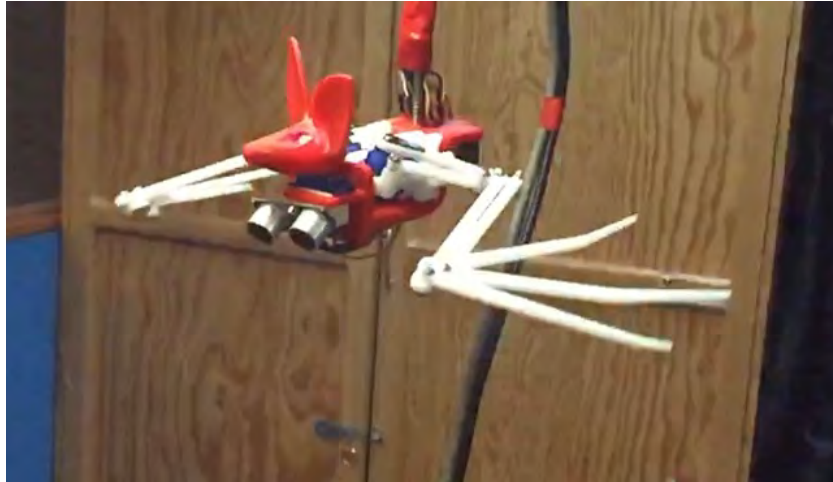


Figura 5.12: Cuarta posición de las alas del robot murciélago.

En la Figura 5.13 se puede observar la quinta posición que toman las alas del murciélago.



Figura 5.13: Quinta posición de las alas del murciélago real.

En la Figura 5.14 se observa el CAD del robot el cual se posicionó como la figura anterior.

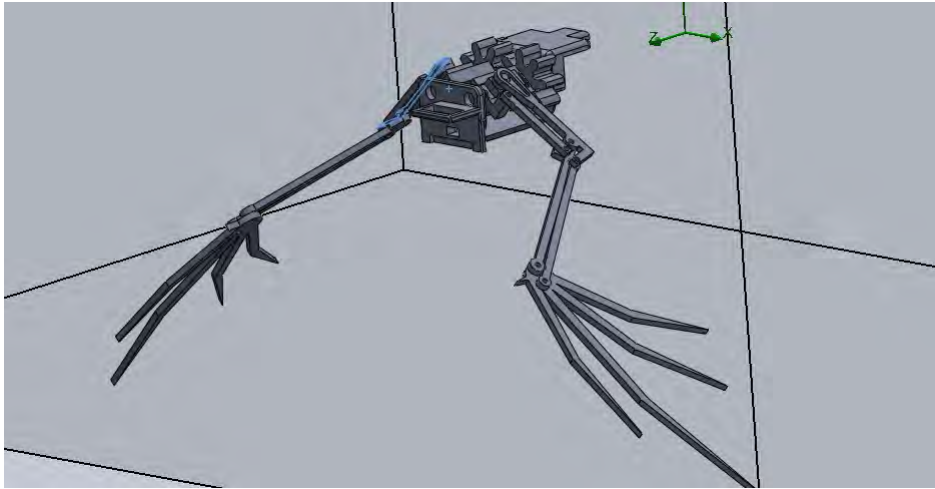


Figura 5.14: Quinta posición de las alas del CAD del murciélago.

En la Figura 5.15 se muestra el robot murciélago imitando la posición 5.

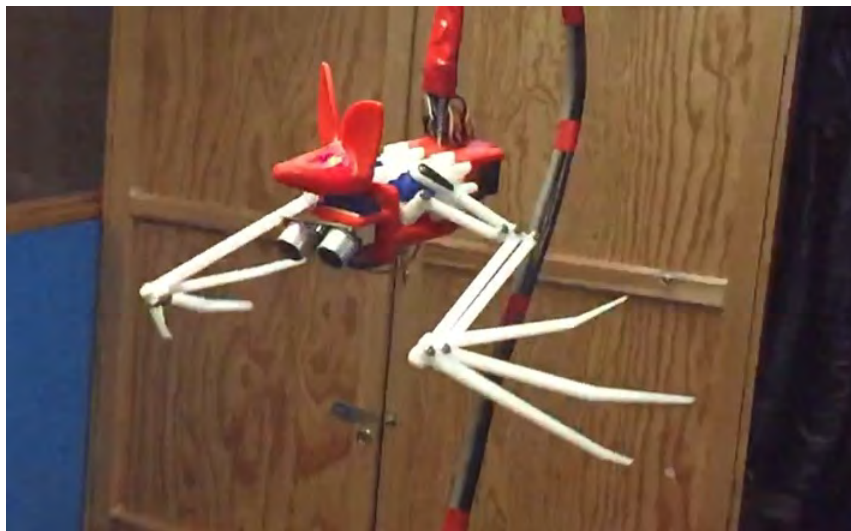


Figura 5.15: Quinta posición de las alas del robot murciélago.

---

Como se puede observar, en las primeras cuatro comparaciones los movimientos que se replicaron llegaron a ser bastante semejantes, sin embargo, para la última comparación, se observa que el modelo ya impreso no llega a la posición deseada, ya que la programación del ángulo del actuador no fue la correcta. No obstante, la capacidad angular del chasis fácilmente tiene la capacidad de llegar a esa posición, dicha afirmación puede ser corroborada con la imagen previa del CAD, la cual asemeja mucho a la quinta posición del murciélago.

## 5.2. Estudio aerodinámico del chasis

Para analizar el desempeño del robot durante el vuelo, se realizó un estudio aerodinámico al CAD del chasis, dicho análisis se implemento con una herramienta del software SolidWorks llamada FlowSimulation.

Existen distintos factores a evaluar con respecto a la interacción de la estructura del robot y los factores físicos del ambiente. En este caso se opto por ver el comportamiento en razón de la velocidad que adquiere el aire al circular al rededor del robot, esto se llama resistencia aerodinámica. Cuando se pretende realizar este estudio existen distintos factores que se tienen que tomar en cuenta antes de implementarlo. En la Tabla 5.1 se puede observar algunas variables que se requieren especificar en el software para poder tener un análisis realista de la aerodinámica del robot.

Especificaciones de estudio aerodinámico		
Variable	Valor u opción	Justificación
Unidades	SI	Debido a que es el m;as utilizado.
Tipo de análisis	Externo	El análisis externo nos permite ver la interacción del aire con el exterior del chasis.
Eje de referencia	Eje Z	Ya que la dirección del flujo del aire seguirá esta dirección.
Tipo de fluido	Aire	Es el fluido que se quiere poner en interacción con la estructura.
Presión del aire	87180 pa	Presión atmosférica promedio en Pachuca expresada en Pascales.
Temperatura	294.65 K	Temperatura promedio de Pachuca en el mes de Mayo expresada en kelvin.
Velocidad del aire	12.5 m/s	Es la velocidad promedio que alcanza un murciélago al volar (45 k/m).

Tabla 5.1: Especificaciones de las condiciones del análisis aerodinámico del robot.

Cuando se realizó las configuraciones anteriores y se puso en marcha el análisis se creó el “tunnel de viento” virtual, por lo que al configurar la visualización del flujo del aire con el robot se obtuvo lo siguiente:

En las Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 se puede observar la velocidad que toman las líneas de aire al fluir por las caras del murciélago vista desde distintos ángulos, así como una referencia de colores de las distintas velocidades con su color correspondiente.

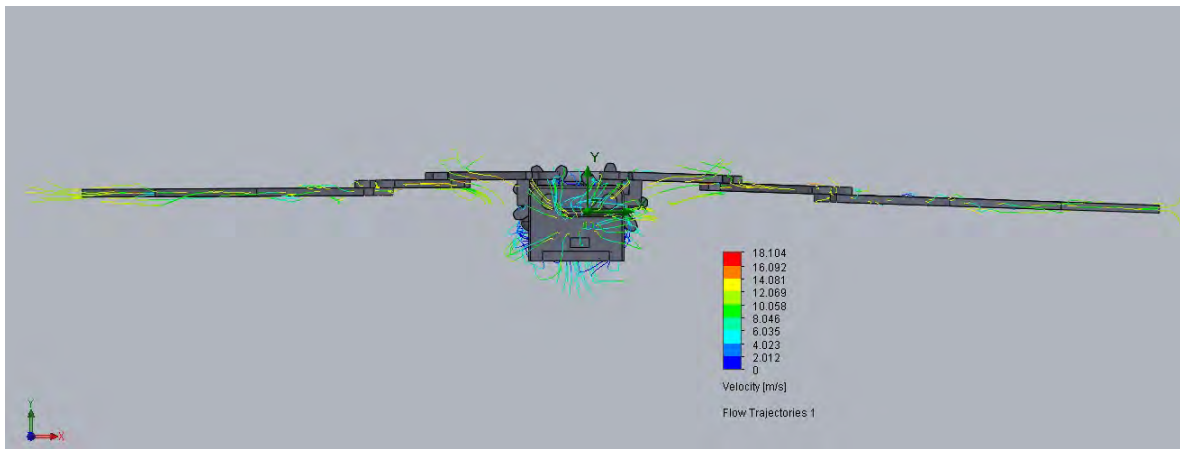


Figura 5.16: Vista superior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.

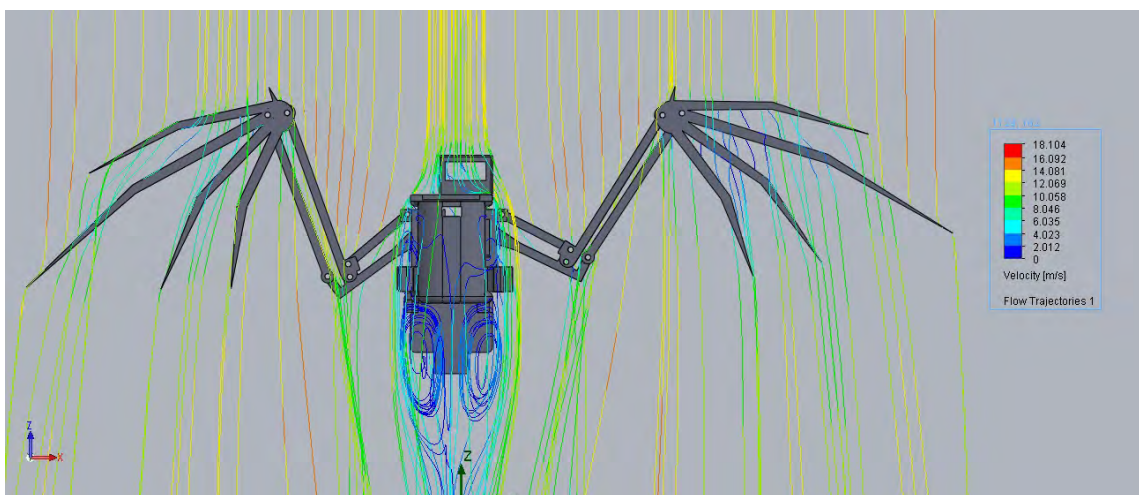


Figura 5.17: Vista inferior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.

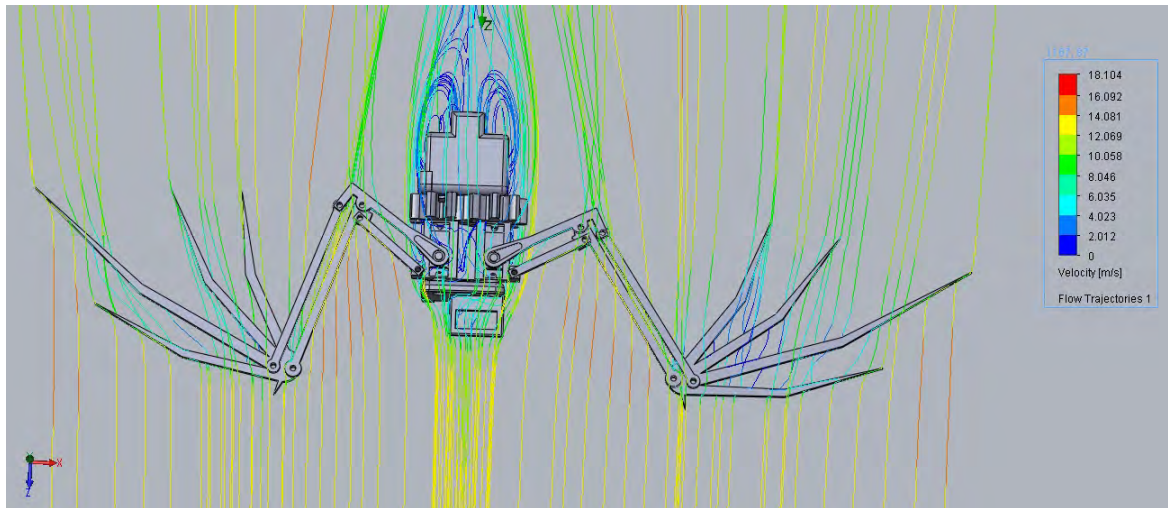


Figura 5.18: Vista superior de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.

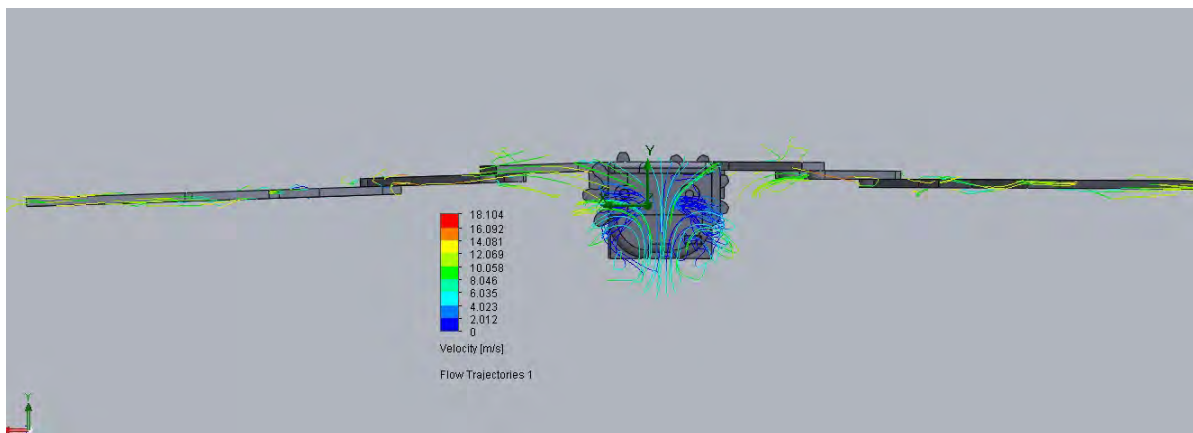


Figura 5.19: Vista trasera de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.



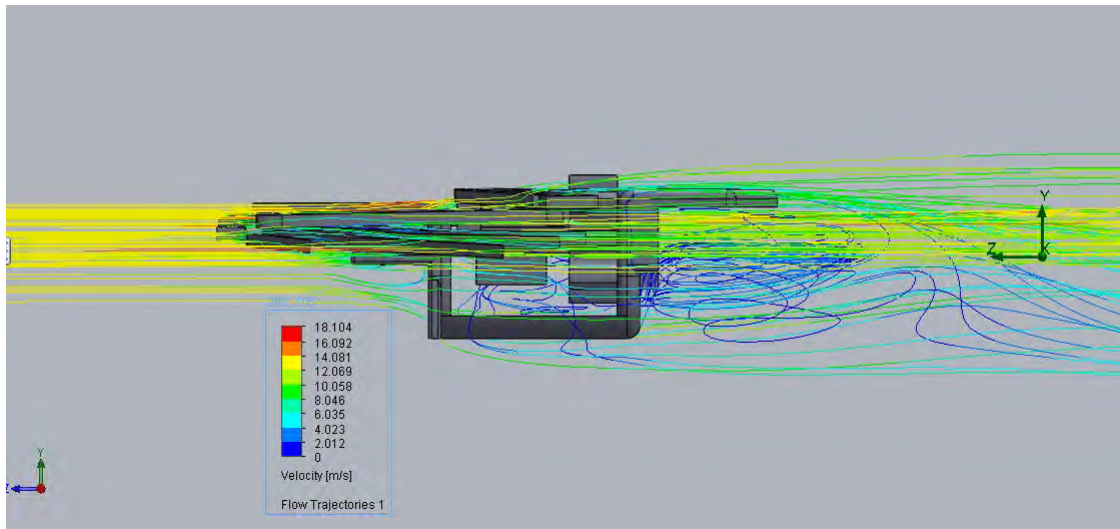


Figura 5.20: Vista lateral de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.

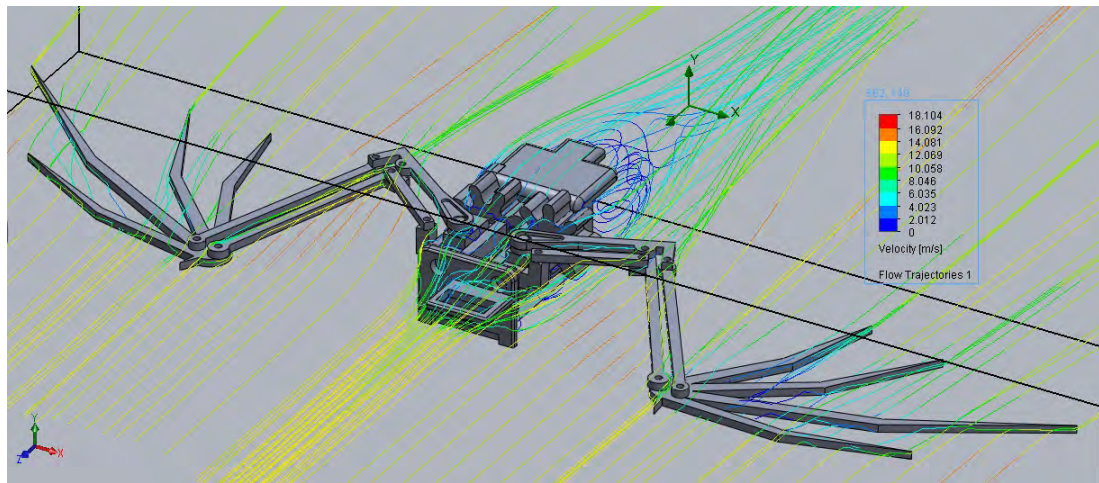


Figura 5.21: Vista isométrica de las líneas de velocidad del flujo de aire por el robot.

Al observar detenidamente las líneas de flujo de aire, podemos identificar las partes en donde se tiene una resistencia aerodinámica mayor, estas partes son las caras frontales, podemos deducir con facilidad que dicho resultado es causado por el diseño con caras planas de las piezas, así como la dirección del flujo del aire. No obstante, la velocidad no cae a cero, se mantiene en la mayoría de los casos cerca de los 6 m/s, por lo que podemos decir que la eficiencia del diseño se mantiene al rededor del 50% ya que disminuye a la mitad la velocidad del aire que interactúa con el chasis del robot.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Con el diseño del primer prototipo del chasis del robot murciélago se encontró que hay distintas limitaciones en el movimiento de las articulaciones del robot al contraer la alas, por lo que este detalle nos limita en gran medida el espacio de trabajo del robot. Otra limitación que se puede observar en la construcción del prototipo es la variación de las medidas de los distintos actuadores (servomotores) con los cuales las articulaciones adquieren movimiento. Al realizar el estudio del flujo de aire, se encontró que el desempeño aerodinámico del robot es relativamente bueno, ya que las dimensiones de las caras frontales ayudan a tener una menor resistencia aerodinámica. Una de las ventajas que se pudo observar es que al implementar el diseño del chasis del robot en CAD es más fácil y eficiente la modificación de alguna de las piezas, así como su re-evaluación del desempeño con respecto al modelo anterior, ya que este tipo de herramientas permite simular movimientos y así poder realizar correcciones de ser necesario. Por otro lado, la selección y uso correcto de las transmisiones hacen más eficiente el diseño, ya que en este caso, se puede dar movimiento a dos articulaciones con un solo actuador.

### 6.1. Trabajo futuro

Con la elaboración de este primer prototipo se pretende seguir realizando pruebas sobre las limitaciones angulares que presentan cada grado de libertad con el que cuenta el robot para implementar las adecuaciones correspondientes en el diseño CAD con el fin de mejorar el desempeño articular del murciélago robot. También se harán pruebas de resistencia del material de los eslabones ante el movimiento correspondiente al aleteo del murciélago con el fin de documentar y valorar el desgaste articular del robot para implementar mejoras correspondientes. Se evaluará el desempeño de los actuadores con el fin de promediar su tiempo útil ante los requerimientos del robot.

De ser necesario, también se aplicarían mejoras al chasis para adecuarlo a otro tipo de actuadores con el fin de mejorar el desempeño del robot.

Con lo correspondiente a la aerodinámica del robot, se implementarían las adecuaciones necesarias para hacer que los eslabones que tienen el primer contacto con el flujo de aire provoquen la menor resistencia posible ante él. También se buscará implementar un grado de libertad más para replicar con mayor exactitud los movimientos del murciélago.

# Glosario

- Aerodinámica: Parte de la Física que trata los efectos producidos por la acción del aire sobre un cuerpo [37].
- Actuator: Dispositivo que genera el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control [38]P.25.
- Biomecánica: Ciencia que estudia las fuerzas y las aceleraciones que actúan sobre los organismos vivos [39].
- Cinemática: Parte de la mecánica que trata del movimiento en sus condiciones de espacio y tiempo, sin tener en cuenta las causas que lo producen [38]p.93.
- Dinámica: Parte de la física que estudia el movimiento en relación con las causas que lo producen [38]P.131.
- Engrane: Ruedas dentada que en conjunto encajan entre si y forman parte de un mecanismo o de una máquina [40]P.603.
- Grado de libertad: Movimiento independiente entre los eslabones de un robot [38]P.17.
- Impresora 3D: Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador [31].
- Mecánica: Parte de la física que estudia el movimiento y el equilibrio de los cuerpos, así como de las fuerzas que los producen [41].
- Mecatrónica: La mecatrónica es un área multidisciplinar, ya que incorpora elementos de la electrónica, la mecánica, robótica, sistemas de computación y manufactura [42]P.1.
- Modulación por Ancho de Pulso: Por sus siglas en inglés (pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica [42]P.89.

- Momento de inercia: Es una medida de la inercia rotacional de un cuerpo [43]P.17.
- Motor: Es la parte sistemática de una máquina capaz de hacer funcionar el sistema, transformando algún tipo de energía, en energía mecánica capaz de realizar un trabajo [38]P.28.
- Motor a pasos: Es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos [38]P.32.
- Motor de AC: Son aquellos motores eléctricos que funcionan con este tipo de alimentación eléctrica [38]P.34.
- Motor de DC: Es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción que se genera del campo magnético [38]P.28.
- Par: Es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia o, dicho de otro modo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo, o de pivote [42]P.190.
- Prototipo: Es una representación de un sistema, aunque no es un sistema completo, posee las características del sistema final o parte de ellas [44].
- Reductor: Son sistemas de engranajes que permiten que los motores eléctricos, de explosión u otro, funcionen a diferentes velocidades para los que fueron diseñados [38]P.21.
- Robot: Máquina automática o autónoma que posee cierto grado de inteligencia, capaz de percibir su entorno y de imitar determinados comportamientos del ser humano así como de otros sistemas biológicos [45]P.18.
- Servomotor: Es un tipo especial de motor que permite controlar la posición del eje en un momento dado. Esta diseñado para moverse determinada cantidad de grados y luego mantenerse fijo en una posición [45]P.41.
- Trasmisión: Mecanismo encargado de transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina [38]P.19.
- Vórtice: Es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas [46].

# Capítulo 7

## Apéndices

# Apéndice A



# Zortrax M200

## Impresora 3D profesional

La **Zortrax M200** es una impresora 3D profesional que integra el software Z-Suite y los materiales de la serie Z-Filaments. La M200 está orientada a sectores como Arquitectura, ingeniería, medicina y diseño industrial.

La impresora 3D Zortrax M200 permite a las empresas reducir costes y riesgos de los procesos de producción. Con la M200 pueden probar las piezas antes de iniciar la producción.

### Entorno de impresión integrado

- La tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) emplea materiales con diferentes cualidades físicas.
  - Los filamentos oficiales garantizan impresiones 3D de gran calidad.
  - El software Z-Suite trabaja con la mayoría de programas de CAD.
- Gran variedad de materiales.
- Filamentos de muchos colores y bajos costes de impresión.
  - Z-ABS, Z-ULTRAT, Z-GLASS, Z-HIPS, son materiales ideales para pintados y tratamientos posteriores, tanto mecánicos como químicos.
  - En breve, ampliaremos la variedad de materiales:

### Parámetros técnicos.

- Gran espacio de trabajo. 200x200x185mm
- Posibilidad de impresión con un gran rango de resoluciones.
- Avanzada tecnológicamente la plataforma de trabajo perforada dispone de sistema automático de calibración.

Modelado por deposición fundente.  
La técnica de aplicación de filamento capa a capa nos permite obtener modelos impresos y crear prototipos antes de emplear tecnologías de moldes por inyección.

Soportes con un solo extrusor.  
El material soporte es aplicado usando el mismo extrusor, eliminando la necesidad de añadir otras bobinas de filamento. El soporte es fácilmente retirable, no daña ni deja rastros en la pieza impresa.

Doble capa de Raft  
El Raft asegura que los modelos se fijen firmemente a la plataforma de impresión. Esta capa protege la impresión de deformaciones e incrementa el nivel de detalle.



### ¿Cómo trabaja la Zortrax M200?

#### Preparación del modelo.

Crea el modelo 3D y expórtalo a un archivo .stl

#### Software Z-Suite

El Z-Suite te permite ajustar los parámetros generales del modelo. Prepara el modelo para imprimir salvándolo en formato .zcode

#### Trasferir el modelo.

Trasfiere el modelo a la impresora, salvándolo en la SD.

#### Carga el filamento.

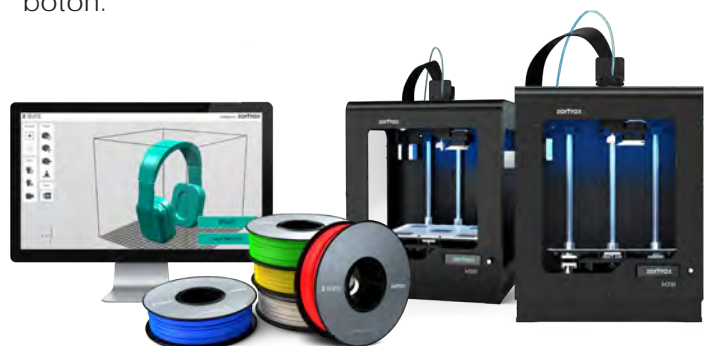
Carga el material de la serie Z-Filaments disponibles en varios colores.

#### Selecciona el modelo.

Encienda la impresora y elija el modelo utilizando el botón de control.

#### Iniciar el proceso de impresión.

Para iniciar la impresión seleccione y presione el botón.



# Especificaciones técnicas

DIMENSIONES	
Sin Bobina	345 x 360 x 430 mm [13.6 x 14 x 17 in]
Con Bobina	345 x 430 x 430 mm [13.6 x 17 x 17 in]
Caja de transporte	460 x 470 x 570 mm [18 x 18.5 x 22.4 in]
Peso	13 kg [28.7 lbs]
Peso de transporte	20 kg [44 lbs]
TEMPERATURAS	
Temperatura ambiente de trabajo	15°-35° C [60°-95° F]
Almacenamiento	0°-35° C [32°-95° F]
ELECTRICIDAD	
Salida AC	110/240V ~ 2 A 50/60 Hz
Tensión requerida	24 V DC @ 11 A
Consumo	~ 190W
Conectividad	SD card [included], WiFi*
SOFTWARE	
Programa	Z-Suite
Tipos de archivos	.stl, .obj, .dxf
Sistemas operativos	Mac OS X / Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8
IMPRESIÓN	
Tecnología	LPD - Layer Plastic Deposition
Volumen de trabajo	200 x 200 x 185 mm [7.87 x 7.87 x 7.28 in]
Resolución de capa	Advanced: 25-50* microns [0.000984-0.0019685 in] Standard: 90-400 microns [0.003543-0.015748 in]
Espesor de pared	Minimal: 400 microns Optimal: 800+ microns
Resolución de impresión de un punto	400+ microns
Diámetro del filamento	1.75 mm [0.069 in]
Tipo de filamento	Z-Filament Series
Diámetro de la boquilla (nozzle)	0.4 mm [0.015 in]
Posicionamiento mínimo	1.5 microns
Precisión ejes x/y	1.5 microns
Pasos del eje Z	1.25 microns
Máxima temperatura de extrusión	380° C
Máxima temperatura de la plataforma	110° C

## Distribuidor oficial



solitium.es  
902 440 200



Alcañiz\_Alcira\_Alcoy\_Alicante\_Badajoz\_Barcelona\_Cáceres\_Calatayud  
Coruña\_Don Benito\_Elche\_Gandia\_Lugo\_Madrid\_Mérida\_Onteniente\_Orense  
Plasencia\_Pontevedra\_San Juan\_Santiago\_Teruel\_Valencia\_Vigo\_Zafra\_Zaragoza

# Apéndice B

# Servomotores y su control

Uso y aplicaciones de los microbots

*Este mes comenzamos la andadura de la microbótica. Los microbots pueden emplearse desde el simple entretenimiento de aficionados hasta aplicaciones de neurofisiología, cibernética, estudios del comportamiento para evitar obstáculos, vehículos espaciales, etc.*

Mucha gente se pregunta si consistirá el próximo hito de la robótica en una serie de máquinas económicas que repten, piensen y se conduzcan como insectos. Así opinan los investigadores del «Laboratorio de insectos» del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En este laboratorio se han creado pequeños robots con movimientos y comportamiento de insectos. Sus diseñadores los han bautizado con el nombre de insectoides.

Rodney Brooks, director del laboratorio de insectoides del MIT realiza un nuevo enfoque que él denomina arquitectura de subsunción. Con este enfoque no se añaden al sistema conductas nuevas hasta que las anteriores están perfectamente a punto y en marcha. En la arquitectura de subsunción las conductas complejas son el resultado evolutivo de una variedad de funciones de conducta simples.

Uno de estos robots es Genghis, que entre los sensores de que dispone está dotado de dos barbas de gato y seis sensores de infrarrojos. Los sensores de infrarrojos operan conjuntamente con el módulo de merodeo, dotando a Genghis de una conducta insólita. En esta modalidad Genghis descansa tranquilamente hasta que detecta radiación infrarroja, procedente por ejemplo de un tobillo humano próximo. Cuando esto se produce se activa su módulo de locomoción y en ese momento comienza a avanzar hacia la pierna del desprevenido sujeto. Claro está, la persona tiene tiempo para apartarse, pero mediante el módulo de guía Genghis puede ser implacable.

Se ha comprobado que sistemas de control muy sencillos pueden dar lugar a com-

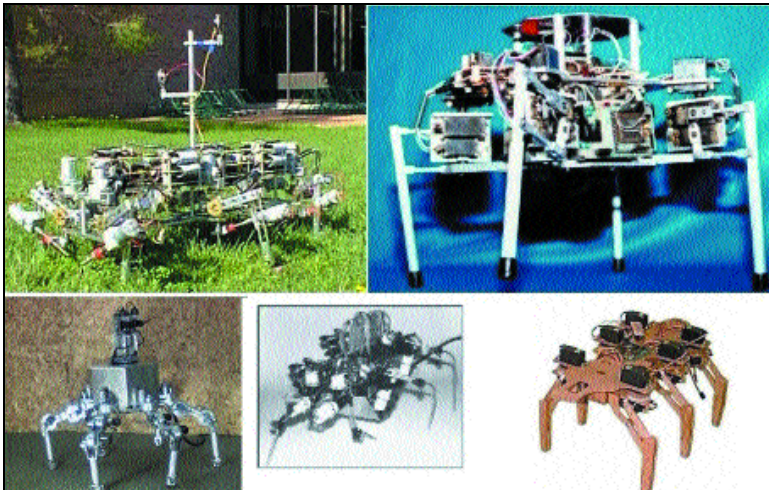
South California) como un kit asequible para iniciarse en la construcción de robots.

Estaba inspirado en un artículo de Gary Malolepsy's aparecido en la revista «The Robot Builder» en el número de febrero-marzo de 1994. El kit para la construcción del HexWalker apareció en enero de 1995 fabricado y distribuido por M&T Systems. Después de tres años de febril actividad en la fábrica y de cientos de imitaciones el kit dejó de fabricarse en M&T Systems.

Según se lee en su página web, «*las líneas de producción están ahora en silencio, los trabajadores han emigrado a verdes praderas, quedan sólo lejanos ecos de la actividad*».

El lector no debe preocuparse por este motivo, ya que se ha localizado un kit similar en Inglaterra, el StampBug (foto 3), fabricado por la empresa Milford Instruments (no muy barato que digamos), que es el que se va a detallar.

Pero además, se darán en este y posteriores artículos suficientes explicaciones para que el lector pueda construir su propio hexápodo sin necesidad de adquirir el kit, ampliando incluso sus prestaciones y el número de sensores.



«Foto 1». Diferentes robots con movimientos similares a insectos.

portamientos muy complejos. Se demuestra que la técnica de subsunción sigue funcionando al añadir estratos de comportamiento más y más complejos.

## Hexápodos

Una vez nos hemos introducido en el tema, comencemos por el principio. El primer robot que se va a describir es un hexápodo. Hagamos un poco de historia. El microbot llamado HexWalker (foto 2) fue creado originalmente por los miembros de la sociedad R.S.S.C. (*The Robotics Society of*

## Servomotores

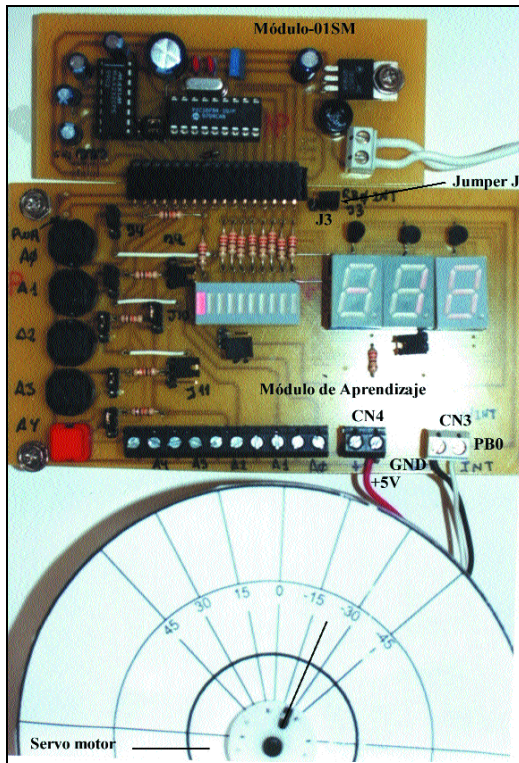
La fuerza que moverá nuestro hexápodo la proporcionarán tres servomotores iguales a los que se emplean en modelismo y radio control para hacer girar la dirección de los coches o mover los timones de los aviones. Además, hemos de dar las gracias al modelismo, que nos permite disponer de este tipo de motores a un precio relativamente asequible.

Un servomotor (foto 4) es un dispositivo en forma de caja negra al que llegan tres cables. Contiene un pequeño motor, una caja de engranajes, un potenciómetro de un



## PC Práctico

### Robótica bioinspirada (I)



«Foto 5». Módulo 0-1 y el de aprendizaje.

momento la señal de error suele ser de unos  $5\mu s$ , diferencia entre el ancho del pulso de la señal de entrada y el ancho del pulso de la señal interna. Esto se corresponde con una fracción de grado del recorrido del servomotor. Al ser el cero demasiado crítico, cuando el error está en este rango, conocido como zona muerta o *guard band*, el «servo» apaga los *drivers* del motor.

Si la señal de error no está por debajo de estos  $5\mu s$ , la electrónica interna continuará

intentando cancelar el minúsculo error, haciendo girar el motor atrás o adelante en un movimiento conocido como *hunting*. La electrónica interna tiene como misión mantener la anchura de los pulsos del monostable interno igual a la anchura de los pulsos de entrada.

Debido a que hay una relación fija entre el ángulo de rotación del potenciómetro y la anchura del pulso interno, la magnitud de rotación del «servo» se puede controlar directamente con la anchura de los pulsos aplicados (figura 3). En conclusión, el circuito electrónico integrado en el motor convierte la anchura del pulso de entrada en una posición determinada del eje de salida.

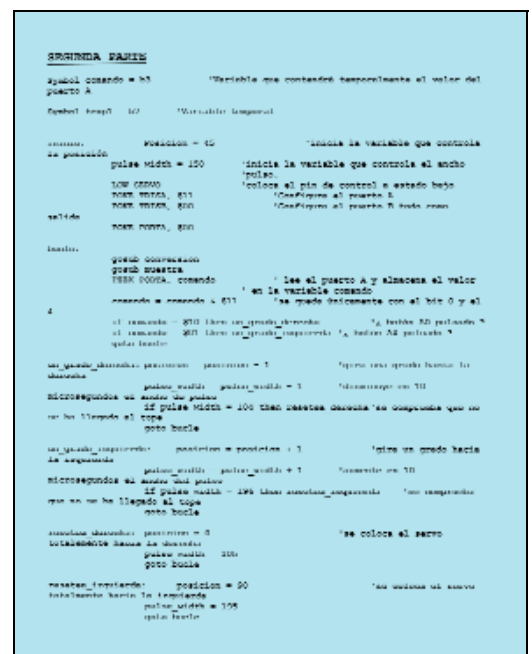
#### Ventajas

Entre las ventajas que aporta el empleo de un «servo» están las siguientes: poco peso, alta potencia (par de fuerza), fiabilidad, fortaleza (los «servos» y su electrónica normalmente sobreviven a choques y funcionan en ambientes de alta temperatura, suciedad, humedad y vibraciones), simplicidad, versatilidad y bajo coste.

En las tiendas de modelismo pueden encontrarse muchos tipos de servomotores de las casas Futaba, FMA, Multiplex, Sanwa, etc. con par de fuerza que va desde unos 3 Kg/cm y una velocidad de giro de unos 0,22

segundos como el Futaba FPS3003, hasta el FPS9402 con un par de 8 Kg, una velocidad de giro de 0,1 segundos y engranajes metálicos. Aunque para el aprendizaje es suficiente un «servo» de los más baratos, los mejores tienen engranajes metálicos y mayor velocidad de giro, que junto al par de fuerzas determinan su precio.

Dando un repaso a las revistas de radio-control, se puede constatar que en los comercios españoles dedicados a estos menesteres los «servos» más económicos tienen un precio que ronda las 2.500-3.000 pesetas, como los servos Futaba FPS-3003 o los FMA300, con un par de unos 3,5 Kg y una velocidad de giro de unos 0,23 segundos. Podéis echar



## Las bondades de C

Hoy en día el uso del lenguaje C se ha extendido en la programación de sistemas hardware debido a que, a pesar de ser un lenguaje de alto nivel, está relativamente cerca del lenguaje ensamblador. Aunque al principio puede ser algo complicado, una vez dominada la sintaxis y el uso de punteros (básico en este lenguaje), el C se vuelve una herramienta de programación muy potente y eficaz.

En los artículos publicados anteriormente se prometió que también se trataría el lenguaje C para los microcontroladores PIC. En estos meses se ha estado preparando la versión en castellano del compilador C2C desarrollado por Pavel Baranov. Entre las características más destacadas del compilador C2C encontramos las siguientes:

- Compatible con la mayoría de los microcontroladores PIC y Scenix.
- Soporta variables de 8 y 16 bits, al igual que matrices unidimensionales de 8 bits y punteros.

—Incluye variables predefinidas que hacen referencia a los diferentes registros de los microcontroladores.

- Permite el empleo de expresiones de 8 y 16 bits.
- Gran variedad de funciones integradas en el compilador como conversión a BCD, transmisión serie, etc. También permite la inclusión de rutinas de tratamiento de interrupciones.
- Inserción de código ensamblador.
- Empleo y construcción de librerías para uso posterior.

—Entorno de programación amigable e intuitivo que incluye un asistente de configuración del microcontrolador que nos permitirá, entre otras cosas, la programación multitarea y configurar de forma fácil el modo de operación del microcontrolador.

—Características básicas del lenguaje C como definición de funciones y procedimientos que permiten el paso/devolución de parámetros.









# Apéndice C

**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Área académica de computación y electrónica  
Autor: Luis Ernesto Gonzales Maximino.**

**Asesores: Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez  
M. en C. José Manuel Fernández Ramírez  
Dr. Alberto Enrique Rojas Martínez**

**Electrónica y control de movimiento de un sistema de bioinspiración robótica del murciélago.**

Este trabajo de tesis muestra la elaboración del programa de control basado en el micro controlador arduino, así como la integración del circuito de potencia y los actuadores del robot murciélago. Dicho trabajo consta de 5 capítulos; en el primer capítulo nos muestran la organización de la tesis comenzado por los antecedentes, justificación, planteamiento del problema, los objetivos, metodología, alcances y limitaciones y la organización de la tesis.

El capítulo dos nos muestra el marco teórico en donde nos explica la morfología y la estructura del ala del murciélago. Posteriormente nos detalla algunas cuestiones importantes del sonido, las cuales son la base del sensor que se integra al micro controlador, y que a su vez, este fue creado con el mismo principio que utilizan los murciélagos para posicionarse en su entorno. En la Figura 1 se muestra la imagen del principio del sensor ultrasónico.

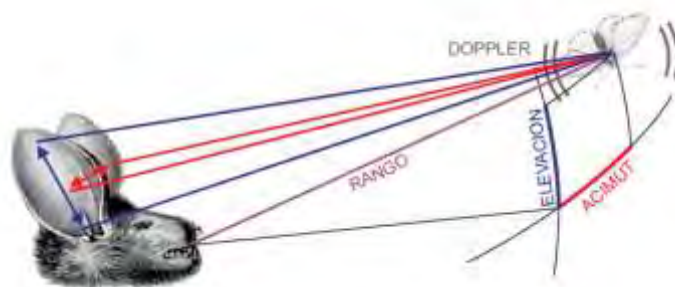


Figura 1. Detección y posicionamiento de la presa mediante eco localización.

Seguido de eso describe la arquitectura y características del arduino nano, el cual es el que se utilizó para el robot, abarca otras cuestiones como la programación y la comunicación. Seguido a esto, describe también la arquitectura del sensor ultrasónico utilizado, así como la forma de cómo utilizarlo con el arduino. Describe la físicamente los componentes de los actuadores (servomotores) y la forma en la cual se pueden controlar con el arduino. En la Figura 2 se observa una imagen del micro controlador arduino utilizado.



Figura 2. Descripción gráfica de la tarjeta Arduino NANO.

Otra cuestión importante que describe es la forma de elaboración de la etapa de potencia. Describe los elementos que intervienen en su creación, desde proteus el cual es el software donde se simuló y se crearon las pistas. Después se describe el software cooper CAM, esta es una herramienta bastante útil para la elaboración y gestión de las órdenes para la creación d las PCB's. Por último, en este capítulo se describe el CNC que se utilizó para la elaboración de la PCB del circuito de potencia, así como la forma de utilizarlo. En la Figura 3 podemos observar el CNC utilizado para la creación de la PCB.

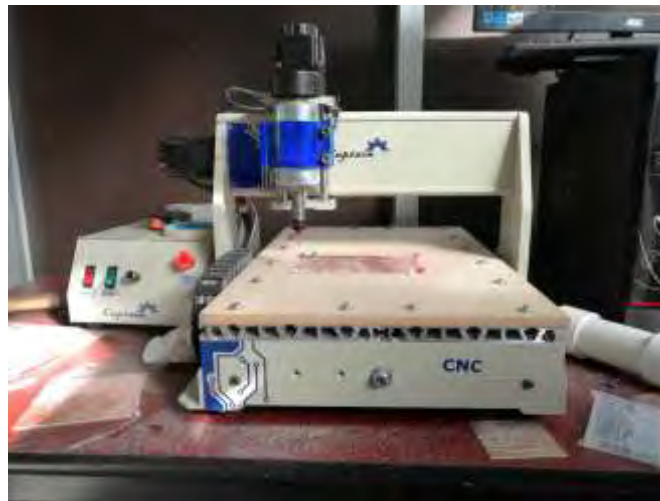


Figura 3. Equipo de grabado de PCB por CNC.

En el capítulo tres se abarca el diseño del circuito de control desde su etapa de simulación y los elementos que contiene, pasando lo la elaboración, conexión y prueba en las tabllas de prueba. Después de esto, se describe detalladamente la elaboración de la PCB en mismo software en donde se simuló, allí se ve la forma de elaboración de las pistas y de los huecos de los pines. En la Figura 4 se muestras las PCB's que se realizaron.

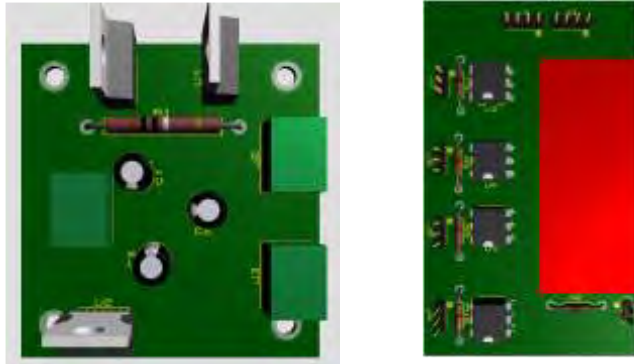


Figura 4. Vistas 3D de las PCB's.

En el cuarto capítulo, se muestran los resultados de la elaboración de los circuitos físicos con ayuda del CNC. También se muestra la integración de los circuitos y los actuadores al chasis del robot murciélago. Se realizan las pruebas del programa con el sistema completo. En la Figura 5 se observa el robot con todos sus elementos integrados.

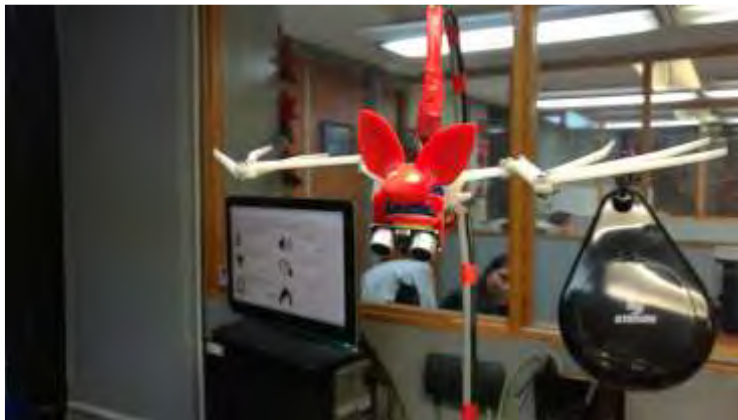


Figura 5. Vista frontal de robot murciélago.

Por último, en el capítulo cinco se exponen las conclusiones generales del trabajo así como los trabajos futuros correspondientes a esta investigación.

# Apéndice D

## CONTROL DE UN SERVO CON ARDUINO



La interfaz de conexión del servomotor consta normalmente de 3 cables o conductores, generalmente de 3 colores distintos:

- Rojo
- Marrón o Negro
- Azul, Amarillo u otros

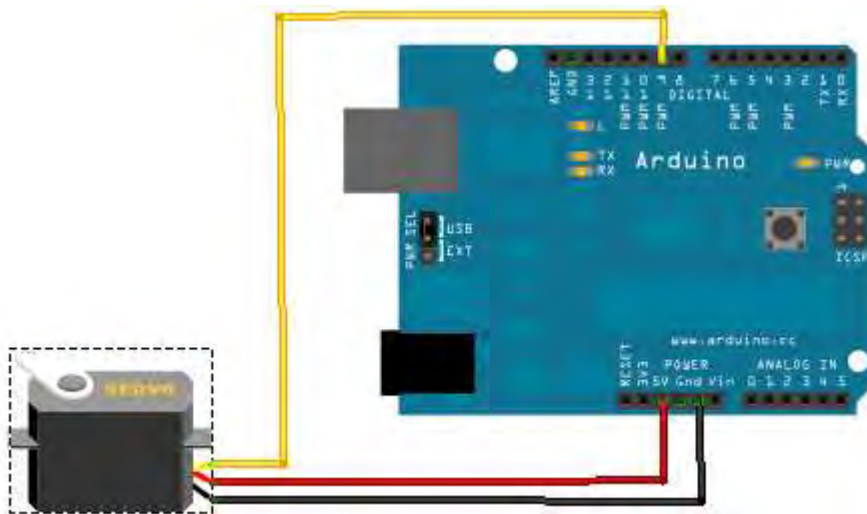
Donde por norma general el cable Rojo es el positivo o fase, el Marrón o Negro es tierra o masa, y el restante de varios colores posibles es el de control, que nos permitirá controlar el servomotor con precisión.

Normalmente la señal que controla el servo es de tipo PWM, o sea pulsos de ancho variable, con los que podemos mover con precisión el servomotor a cualquier punto de su radio de acción.

¿Y cómo podemos provocar dichos pulsos?

Pues muy sencillo usando uno de los pines marcados como PWM en arduino.

Para conectar nuestro servo con arduino procederemos según el esquema:



Tal como se observa en el gráfico, se conecta el servo al positivo que nos da arduino, y al GND también proporcionado por nuestro arduino, y por ultimo conectamos la señal de control (amarillo) al pin número 2, marcado como PWM.

Para el control, usaremos una librería para el control de servos que se llama Servo.h. que nos ofrece los métodos:

- attach(int): Para poner un pin en modo servo drive.
- detach() : Libera un pin del modo servo driver.
- write(int): Indica el ángulo a girar el servo, 0 a 180.
- read(): obtiene el ultimo valor enviado (posición del servo).
- attached(): devuelve 1, si el servo está conectado.
- refresh(): Se debe llamar a ésta función al menos cada 50ms para asegurarse que los
- servos estarán en su posición.

El siguiente código que nos permita mover el servomotor:

```
1. #include <Servo.h>
2.
3. Servo servo1; // Crea un Objeto servo
4. int posicion; // Variable de la posicion del servo
5.
6. void setup()
7. {
8.   servo1.attach(2); // Seleccionamos el pin 2 como el pin de control para el servo
9. }
10.
11.   void loop()
12.   {
13.     val = analogRead(potpin); // reads the value of the potentiometer (value between 0 and 1023)
14.     val = map(val, 0, 1023, 0, 179); // scale it to use it with the servo (value between 0 and 180)
15.     myservo.write(val); // sets the servo position according to the scaled value
16.     delay(15); // waits for the servo to get there
17.
18.     SoftwareServo::refresh();
19.
20.   }
```

# Referencias

- [1] Hueso E. et al. Visualization of vortices in simulated airflow around bat wings during flight. *Brown University, USA*, 2004.
- [2] Bergou A. et al. 3d reconstruction of bat flight kinematics from sparse multiple views. *Brown University, USA*, 2011.
- [3] Yong L. et al. A bat-like switched flying and adhesive robot. *Bangkok, Thailand*, 2012.
- [4] Ghanbari A. et al. A new model of bio-inspired bat robot. *Tehran, Iran*, 2013.
- [5] Breslav M. et al. 3d pose estimation of bats in the wild. *Boston University, s/f*.
- [6] Colorado J. et al. The influence of bat wings for producing efficient net body forces in bio-inspired flapping robots. *Pontificia Universidad Javeriana, Colombia*, 2013.
- [7] Colorado J. et al. Músculos inteligentes en robots biológicamente inspirados: Modelado, control y actuación. *Universidad Politécnica de Madrid, España*, 2011.
- [8] Martínez R. et al. El papel constructivo de los murciélagos en el paisaje del estado de Hidalgo. *Divulgación de la Ciencia, México*, 2006.
- [9] Casta A. murciélagos: características biológicas y control. departamento de salud, Puerto Rico, s/f.
- [10] Bergou E. et al. Reconstrucción 3d de la cinemática del vuelo de un murciélago desde múltiples vistas. *Brown University, USA*, 2011.
- [11] Ortega A. et al. Hacia la biomecánica 30 años de investigación en el CIATEC. *Hacia la biomecánica, México*, 2006.
- [12] Rocha E. Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México*, 2012.



- [13] Gubin A. Genialidad en el código del vuelo de pájaros de leonardo da vinci. <http://www.lagranepoca.com/archivo/29426-genialidad-codigo-del-vuelo-pajaros-leonardo-da-vinci.html/>, 2013. Accedido 12-06-2016.
- [14] Romero M. *Robótica: entré al mundo de la inteligencia artificial*. Educ.ar S.E, 1ra. ed., Buenos Aires., 2012.
- [15] CEA-GTRob. *libro blanco de la robótica*. Grafo S.A, 1ra. ed., España, 2008.
- [16] Barrientos A. *fundamentos de robotica*. McGraw-hill, 1ra. ed., España, 1997.
- [17] EMh H. Máquinas y mecanismos de trasmision de movimiento. <http://tecnologia4diverhajar.blogspot.mx/2015/02/maquinas-y-mecanismos-de-transmision-de.html/ash/>, 2015. Accedido 29-06-2016.
- [18] Quiñones K. Sistemas mecánicos simples. <http://karenluciaquinonez.blogspot.mx//ash/>, 2014. Accedido 06-07-2016.
- [19] Spolearninglab. Four-bar linkage. [https://spolearninglab.com/curriculum/lessonPlans/science/engineering/four\\_bar.html/ash/](https://spolearninglab.com/curriculum/lessonPlans/science/engineering/four_bar.html/ash/), 2016. Accedido 10-07-2016.
- [20] Creando el futuro. Transmisiones y reductores. <http://creandoelfuturo.net/es/morfologia-del-robot/transmisiones-reductores/ash/>, 2016. Accedido 06-07-2016.
- [21] Sites.google. Tecnología y mecanismos. <https://sites.google.com/site/487tecnologia1/tecnologia-y-mecanismos/ash/>, 2016. Accedido 15-07-2016.
- [22] Robotshop. Tecnología y mecanismos. <http://www.robotshop.com/en/lynxmotion-large-pan-tilt-no-servos-black.html/ash/>, 2016. Accedido 28-07-2016.
- [23] Reportero industrial. Evolución de los motores industriales. <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Evolucion-de-los-motores-industriales+99973/>, 2014. Accedido 19-09-2016.
- [24] Domínguez V. Motores. <http://fullelectronic-vanessa.blogspot.mx//ash/>, 2013. Accedido 28-07-2016.
- [25] Sánchez R. *Accionamiento y Actuadores*. Universidad de Huelva, España, 2008.

- [26] Siemens. Cad diseño asistido por computadora. [https://www.plm.automation.siemens.com/es\\_mx/plm/cad.shtml/](https://www.plm.automation.siemens.com/es_mx/plm/cad.shtml/), 2016. Accedido 14-11-2016.
- [27] Baldasano j. et al. Diseño asistido por ordenador (cad). evolucion y perspectivas de futuro en los proyectos de ingenieria. <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BF04..htm/>, 2016. Accedido 19-09-2016.
- [28] Newzzniper. Los mejores programas para modelado en 3d. <https://newzzniper.com/index.php/2016/02/21/los-mejores-programas-para-modelado-en-3d/>, 2016. Accedido 19-09-2016.
- [29] solidworks corporation. Conceptos básicos de solidworks. [https://www.solidworks.es/sw/support/1495\\_ESN\\_HTML.htm/](https://www.solidworks.es/sw/support/1495_ESN_HTML.htm/), 2005. Accedido 04-02-2017.
- [30] Zortrax. Manual zortrax m200. [http://www.multistation.com/IMG/pdf/manuel\\_zortrax\\_m200\\_en.pdf/](http://www.multistation.com/IMG/pdf/manuel_zortrax_m200_en.pdf/), s/f. Accedido 11-02-2017.
- [31] 3DFACTORY. Zortrax m200. <http://3dfactory.mx/zortrax-m200/>, 2016. Accedido 11-02-2017.
- [32] Escobar C. El material de impresión abs y sus características. <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102832135-el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas/>, 2013. Accedido 11-02-2017.
- [33] Machines-3D. Zortrax logiciel z-suite. [http://www.machines-3d.com/en/installation-software-zsuite-software-zortrax-pxl-20\\_28.html/](http://www.machines-3d.com/en/installation-software-zsuite-software-zortrax-pxl-20_28.html/), 2014. Accedido 12-02-2017.
- [34] Zabala G. *Robótica*. Gandi, 1ra. ed., Argentina, 2007.
- [35] Clavijo R. *Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C*. 1ra. ed., Colombia, 2011.
- [36] Shigley J. et al. *Diseño en ingeniería mecánica*. Mc Graw Hill, 4ta. ed, México, 1985.
- [37] Muñis A. *Aerodinámica básica*. Secretaria de comunicaciones y trasportes, México, s/f.
- [38] Barrientos A. *fundamentos de robótica*. Mc Graw hill, 1ra. ed., España, 1997.

- 
- [39] Nordin M. *Biomecánica básica de sistema musculoesquelético*. MC Graw Hill, 3ra. ed., España, 2001.
- [40] Shigley J. *Diseño en ingeniería mecánica*. MC Graw Hill, 4ta. ed., México, 1983.
- [41] Beer and other. *Mecánica vectorial para ingenieros*. MC Graw Hill, 9na. ed., México, 2010.
- [42] Bolton W. *Mecatrónica*. Alfaomega, 2da. ed., España, 2001.
- [43] Ogata k. *Dinámica de Sistemas*. Prentice Hall, 1ra. ed., México, 1989.
- [44] Wikipedia. Prototipo. <https://es.wikipedia.org/wiki/Prototipo/>, 2017. Accedido 04-05-2017.
- [45] Zabala G. *Robótica*. Gradi, 1ra. ed., Buenos Aires, 2007.
- [46] Muños M. Prevuelo. <http://www.manualvuelo.com/PRE/PRE410.html/>, 2013. Accedido 22-04-2017.
- [47] Gubin A. Genialidad en el código del vuelo de pájaros de leonardo da vinci. <http://www.lagranepoca.com/archivo/29426-genialidad-codigo-del-vuelo-pajaros-leonardo-da-vinci.html/>, 2013. Accedido 19-09-2016.
- [48] Craing J. *Robótica*. Prentice hall, 3ra. ed., México, 2009.