



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN
DE UNA TORTUGA MARINA ROBÓTICA PARA EL
DESPLAZAMIENTO SOBRE SUPERFICIES DE ARENA**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

MAURICIO SEBASTIÁN TAMAYO VEGAS

DIRECTOR: DANIEL MIDEROS PhD

Quito, Octubre, 2015

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2015
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo **MAURICIO SEBASTIÁN TAMAYO VEGAS**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Mauricio Sebastián Tamayo Vegas
C.I. 1600523896

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Diseño y construcción del sistema de locomoción de una tortuga marina robótica para el desplazamiento sobre superficies de arena**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero Mecatrónico** fue desarrollado por **Mauricio Tamayo**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.

Daniel Mideros PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1713177325

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas quienes con su amor, apoyo y comprensión incondicional estuvieron siempre a lo largo de mi vida estudiantil; a ellos que siempre tuvieron una palabra de aliento en los momentos difíciles y que han sido incentivos de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica Equinoccial, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes. Especial agradecimiento a mi Director de Tesis el Dr. Daniel Mideros por sus consejos y amistad.

A ti Papi, por tu incondicional apoyo, tanto al inicio como al final de mi carrera; por estar pendiente de mí a cada momento.

A ti Mami, por la inmensidad de tu amor, y mucho de ángel por ser mi guarda y por tus incansables cuidados. Porque si hay alguien que está detrás de todo este trabajo, eres tú, que has sido, eres y serás el pilar de mi vida.

A la humanidad por los avances tecnológicos desarrollados que facilitaron la culminación de mi carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANIMATRÓNICA.....	3
2.2 BIOMECÁNICA.....	3
2.2.1 La biomecánica de la tortuga.....	4
2.3 MODELADO MECÁNICO DEL MOVIMIENTO.....	12
2.3.1 FlipperBot.....	12
2.3.2 Tortuga robótica anfibia.....	14
2.3.3 Mini Tortuga anfibia.....	15
2.4 MECANISMOS ALTERNOS PARA EL MOVIMIENTO DE ALETAS..	17
2.4.1 Mecanismo de cuatro barras.....	17
2.4.2 Mecanismo diferencial.....	18
2.4.3 Mecanismo de traslación de polea.....	19
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES	20
3.1 METODOLOGÍA MECATRÓNICA.....	20
3.2 MODELADO MATEMÁTICO.....	21
3.3 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	22
3.4 DISEÑO PARALELO DEL SISTEMA.....	23
3.4.1 Diseño mecánico.....	23
3.4.2 Diseño electrónico.....	25
3.4.3 Diseño del sistema de Control.....	26
3.5 PRUEBAS.....	27
3.6 MATERIALES.....	27
3.6.1 Arduino micro.....	28
3.6.2 Servo Motor.....	29
4. DISEÑO	31
4.1 DISEÑO MECÁNICO.....	31
4.1.1 Modelado matemático.....	31

4.1.2 Esfuerzos.....	40
4.1.3 Modelo CAD.....	45
4.1.4 Selección de materiales.....	50
4.1.5 Flotabilidad.....	51
4.2 DISEÑO ELECTRÓNICO.....	52
4.2.1 Selección de actuadores.....	53
4.2.2 Cálculo de consumo de corriente.....	53
4.2.3 Selección de la fuente de energía.....	55
4.2.4 Diseño interfaz.....	55
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
5.1 PRUEBAS ARENA GRUESA.....	59
5.1.1 Arena gruesa seca.....	60
5.1.2 Arena gruesa húmeda.....	62
5.2 PRUEBAS ARENA FINA.....	65
5.2.1 Arena fina seca.....	65
5.2.3 Arena fina húmeda.....	67
5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	69
5.4 MARCHA ASIMÉTRICA.....	71
5.5 VERIFICACIÓN DE CONSUMO DE CORRIENTE.....	74
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características arduino micro.....	28
Tabla 3.2 Características servomotor.....	30
Tabla 4.1 Datos del primer grado de libertad.....	38
Tabla 4.2 Datos del segundo grado de libertad.....	38
Tabla 4.3 Datos de la fuerza de empuje.....	42
Tabla 4.4 Datos técnicos del material ABS.....	50
Tabla 4.5 Datos técnicos del servomotor MG996R.....	53
Tabla 4.6 Datos técnicos de batería.....	55
Tabla 5.1 Datos arena gruesa seca.....	62
Tabla 5.2 Datos arena gruesa húmeda.....	64
Tabla 5.3 Datos arena fina seca.....	67
Tabla 5.4 Datos arena fina húmeda.....	69
Tabla 5.5 Datos de marcha asimétrica.....	73
Tabla 5.6 Datos de las corrientes de funcionamiento.....	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4.1. Ecuación lagrangiana.....	32
Ecuación 4.2. Energía cinética del sistema	33
Ecuación 4.3. Energía potencial del sistema	34
Ecuación 4.4. Torque de diseño	39
Ecuación 4.5 Empuje activo	40
Ecuación 4.6. Coeficiente de empuje de tierras	41
Ecuación 4.7. Peso específico.....	41
Ecuación 4.8. Esfuerzo permisible	42
Ecuación 4.9. Esfuerzo de diseño	44
Ecuación 4.10. Módulo de la sección transversal.....	45
Ecuación 4.11. Flotabilidad.....	51
Ecuación 4.12. Peso del cuerpo.....	51
Ecuación 4.13. Constante del motor.....	53
Ecuación 4.14 Consumo de corrientes en motores.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Articulación principal de la aleta.....	4
Figura 2.2	Biomecánica de la aleta.....	5
Figura 2.3	Características externas de las tortugas marinas.....	7
Figura 2.4	Los huesos que componen el esqueleto.....	7
Figura 2.5	Vista dorsal del esqueleto de las aletas (izquierda y derecha).....	8
Figura 2.6	Sistemas musco-esquelético de la aleta frontal.....	9
Figura 2.7	Fuerza de empuje provocada por aletas delanteras.....	11
Figura 2.8	Patrón de movimiento usado para la locomoción terrestre.....	11
Figura 2.9	Ciclo de generación de la propulsión con las aletas.....	12
Figura 2.10	Modelo mecánico de Flipperbot.....	13
Figura 2.11	Modelo mecánico de la tortuga robótica anfibia.....	14
Figura 2.12	Modelo mecánico de la tortuga robótica anfibia.....	15
Figura 2.13	Modelo mecánico de la pierna-aleta.....	16
Figura 2.14	Modelo del mecanismo de cuatro barras.....	17
Figura 2.15	Modelo del mecanismo diferencial.....	18
Figura 2.16	Modelo del mecanismo de traslación de polea.....	19
Figura 3.1	Proceso de diseño mecatrónico.....	21
Figura 3.2	Desarrollo del diseño en paralelo.....	23
Figura 3.3	Proceso del diseño mecánico.....	24
Figura 3.4	Proceso del diseño electrónico.....	25
Figura 3.5	Proceso del diseño del sistema de control.....	26
Figura 3.6	Asignación de pines arduino micro.....	29
Figura 3.7	Dimensiones servomotor mg90.....	30
Figura 4.1	Modelo de eslabones de los sistemas de las aletas.....	32
Figura 4.2	Sistema de Coordenadas.....	34
Figura 4.3	Empuje de tierras.....	40
Figura 4.4	Diagrama de momentos cortante y flector.....	43
Figura 4.5	Dimensiones geométricas.....	45
Figura 4.6	Placa plastrón.....	46
Figura 4.7	Servo bracket tipo C.....	46

Figura 4.8	Servo bracket tipo U.....	46
Figura 4.9	Ensamblaje de los dos sistemas.....	47
Figura 4.10	Aleta izquierda virtual.....	48
Figura 4.11	Aleta izquierda real.....	48
Figura 4.12	Ensamblaje final del prototipo.....	49
Figura 4.13	Construcción del prototipo real.....	49
Figura 4.14	Esquematación de la conexión.....	56
Figura 4.15	Placa de conexiones.....	56
Figura 4.16	Placa impresa de control.....	57
Figura 5.1	Caja de pruebas.....	58
Figura 5.2	Etapas marcha simétrica.....	59
Figura 5.3	Huella arena seca.....	60
Figura 5.4	Medida de la huella arena seca.....	61
Figura 5.5	Huella dejada arena gruesa húmeda.....	63
Figura 5.6	Medida huella dejada arena gruesa húmeda.....	64
Figura 5.7	Huella dejada arena fina seca.....	65
Figura 5.8	Medida huella dejada arena gruesa húmeda.....	66
Figura 5.9	Huella dejada arena fina seca.....	68
Figura 5.10	Medida huella dejada arena fina húmeda.....	68
Figura 5.11	Grafica de las velocidades de las cuatro marchas.....	70
Figura 5.12	Muestreo de datos.....	71
Figura 5.13	Huella dejada por la marcha asimétrica.....	72
Figura 5.14	Grafica de las velocidades marcha simétrica y asimétrica.....	73
Figura 5.15	Pruebas realizadas con pinza amperimétrica.....	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Planos mecánicos.....	81
Anexo 2. Especificaciones batería Vennon.....	85

RESUMEN

El presente trabajo de titulación corresponde el proceso de diseño, desarrollo e implementación de un sistema de locomoción basado en las crías de tortugas marinas para el desplazamiento sobre superficies de arena, este estudio ayudará a los diseñadores de robots a entender mejor la locomoción en superficies complejas, a través de la comprensión de los principios que rigen el movimiento mediante aletas. El proyecto se inició estudiando la locomoción de las tortugas marinas, los patrones cíclicos y las fuerzas de propulsión que presentan las aletas delanteras para el desplazamiento. El diseño fue regido por la metodología mecatrónica de Devdas Sheety la cual se divide en tres subprocesos; en la primera etapa el modelado y simulación se comenzó analizando las necesidades del sistema y especificaciones, lo cual permitió proseguir con el diseño conceptual, el correcto dimensionamiento del robot y las aletas. El modelado matemático fue fundamental para los diseños paralelos del sistema, el diseño mecánico comenzó con los estudios dinámicos y cinemáticos de los subsistemas de las aletas, el dimensionamiento de las aletas fue a partir del estudio de los esfuerzos que rigen a las aletas. El diseño electrónico se basó en los cálculos de esfuerzos para el dimensionamiento de los actuadores. El diseño de control fue la última etapa previa a la construcción, el control del sistema se realizó programando en la interfaz de Arduino con los ciclos que las aletas debían cumplir.

ABSTRACT

The present titling work corresponds process design, development and implementation of a system of locomotion based on sea turtle hatchlings to travel on sandy surfaces, this study will help designers understand better robots locomotion in complex surfaces, by compressing the principles governing the movement by flippers. The start of the project began studying the locomotion of sea turtles, cyclical patterns and propulsion forces presenting the front wings for scrolling. The design was governed by Devdas Sheety mechatronics methodology which is divided into three sub-processes; In the first stage modeling and simulation is started analyzing system requirements and specifications, which allowed to proceed with the conceptual design, proper sizing of robot and flippers The mathematical modeling was essential for parallel system designs, design started with the mechanical design studies and cinematic subsystems flippers sizing was based on the study of the efforts that govern flippers .The electronic design was based on stress calculations for sizing of actuators The design of control was the last stage prior to construction, system control is performed by programming interface with Arduino cycles fins debian meet.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, las investigaciones y el desarrollo de robots se han incrementado gracias a las nuevas tecnologías las cuales facilitan y perfeccionan a los robots; los cuales son utilizados en varias áreas comunes tales como: industria, medicina, la milicia, y el transporte, esta última con pasos agigantados, como el robot AlphaDog el cual es capaz de movilizarse en ambientes hostiles, transportando cargas de hasta 180 kilogramos con una autonomía de hasta 32 kilómetros.

En la actualidad los diseñadores han desarrollado robots eficaces y eficientes capaces de trasladarse usando diferentes tipos de sistemas de locomoción en diferentes ambientes, tales como el agua, el aire y la tierra; pero uno de los principales problemas es la adaptabilidad de los robots, por lo que existen un reducido número de robots diseñados y construidos para la locomoción en varias superficies; por ejemplo un mecanismo que logre trasladarse en medios granulares, pueda también desplazarse en agua o en el aire, logrando la versatilidad de sus sistemas.

El diseño y la investigación de robots capaces de adecuarse a dos ambientes totalmente diferentes, utilizando solo un sistema el cual sea igualmente eficiente en los dos ambientes, es fundamental para la optimización de recursos, la facilidad de construcción, y para la ampliación de su funcionalidad.

Este proyecto el cual es una sinergia de varias ramas de la mecatrónica, fue pensado para la investigación y el desarrollo de como un sistema probado naturalmente y biológicamente puede ser puesto a prueba en otro ambiente para el cual no fue diseñado.

A partir de la biomecánica la cual influencia a la robótica partiendo de los estudios generales de los organismos vivos, obteniendo sus modelos, estructuras, procesos y leyes, se pudo fabricar un prototipo de tortuga marina capaz de trasladarse en superficies de arena a partir de sus aletas las cuales en el mundo animal sirven para la locomoción acuática.

Objetivo General

Diseñar y construir el sistema de locomoción de una tortuga marina robótica capaz de moverse en superficies de arena.

Objetivos Específicos

- Diseñar el robot tortuga con medidas cercanas a las del mundo animal.
- Diseñar el mecanismo capaz de desplazarse en superficies granulares.
- Construir las aletas frontales capaces de desplazarse en superficies granulares.
- Validar el mecanismo completo.

2. MARCO TEÓRICO

Es necesario abordar las distintas ramas de la mecatrónica, las cuales pueden facilitar la construcción y el diseño del robot animatrónico, para esto es necesario comenzar por la descripción de la animatrónica la cual comprende una parte fundamental, posteriormente abordar otra rama principal, la biomecánica la cual facilita la mecánica de cada ser vivo, y describir brevemente todo acerca de las tortugas marinas.

2.1. ANIMATRÓNICA

El termino animatrónica aparece en el año 1961 creado por la combinación de las palabras animación y electrónica en el departamento de ingeniería de Walt Disney, la animatrónica es una rama multidisciplinaria que integra varios aspectos de anatomía, robótica, y mecatrónica. (Storyboard, 2013)

Los personajes animatrónicos son tipos particulares de robots que son fabricados para parecerse a una forma de vida realista. Estos robots fueron diseñados principalmente para películas cinematográficas y parques temáticos, aunque en el presente su uso más frecuente es en museos. (Miller, 2014)

Estos robots especializados pueden asemejarse a personajes históricos y contemporáneos tales como: pájaros, bichos, criaturas marinas y demás animales.

Los robots animatrónicos pueden moverse, hablar, o cantar, pero los movimientos y sonidos que pueden hacer son pre-programados o pre-grabados. (Jacko, 2011)

2.2. BIOMECÁNICA

Rama de la bioingeniería que estudia los modelos, estructuras, procesos, fenómenos y leyes que sean relevantes en el movimiento de un ser vivo utilizando conceptos de ingeniería, principalmente bioingeniería e Ingeniería Mecánica. (C. Ross Ethier, 2007).

La mecánica es una rama de la física que se interesa en la descripción del movimiento y la deformación de los cuerpos y como son afectados por perturbaciones mecánicas llamadas fuerzas, la ciencia de la mecánica es dividida en muchas áreas, pero las tres más relevantes para la biomecánica son: cuerpo-rígido, cuerpo-deformable y fluidos.

- **Cuerpos rígidos:** El objeto que está siendo analizado es asumido como rígido y las pequeñas deformaciones en su forma pueden ser ignoradas.
- **Cuerpos deformables:** Análisis de cómo las fuerzas son distribuidas dentro del material y pueden ser estudiadas en varios niveles.
- **Fluidos:** La mecánica se preocupa de las fuerzas que influyen en fluidos, líquidos y gases. (Joseph Hamill, 2006)

2.2.1. LA BIOMECÁNICA DE LA TORTUGA.

La biomecánica de la tortuga enfocará el análisis a partir de la compresión geométrica anatómica de la aleta, la notación biomecánica convencional y la presentación del modelado del sistema.

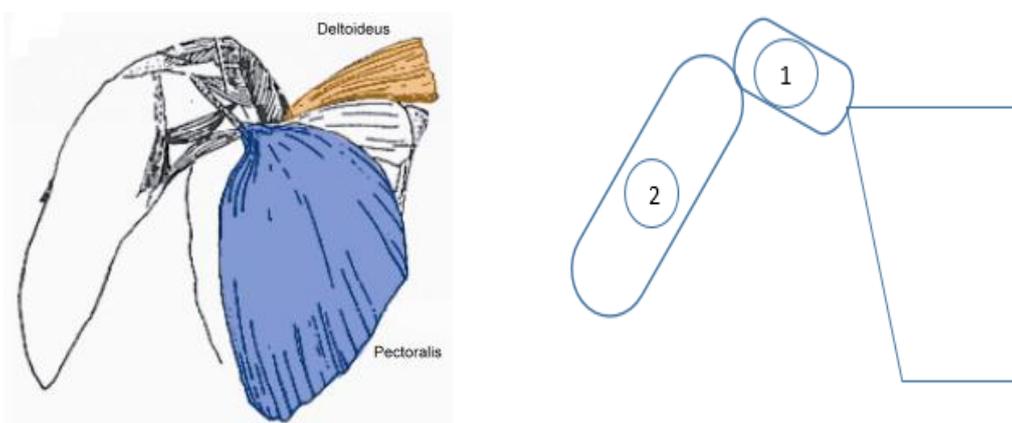


Figura 2.1. Articulación principal aleta.

Fuente:(Peter L. Lutz, 1996)

La figura 2.1 representa las dos principales articulaciones divididas en dos segmentos, para fines de análisis del modelo podemos simplificar los segmentos mediante uso de figuras elipsoides y conos elípticos etiquetados para su análisis.

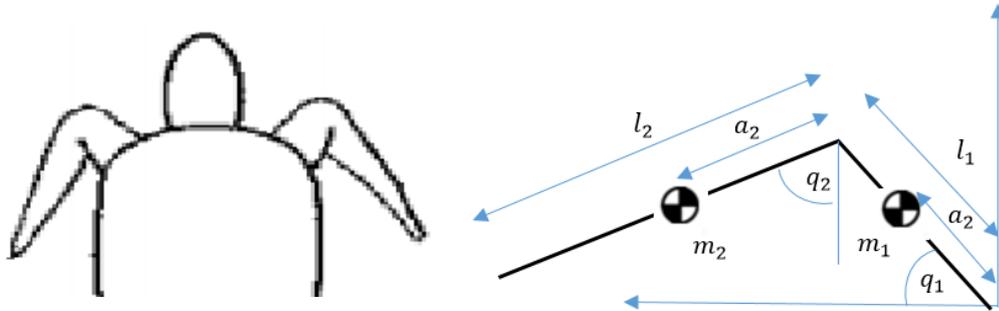


Figura 2.2. Biomecánica de la aleta.

Fuente:(Wyneken, 2004)

La figura 2.2 muestra una esquematización sencilla de la biomecánica de la aleta de la tortuga, a partir de este esquema se obtiene el modelado matemático de la ecuación de movimiento que rige el aleteo desde sus dos articulaciones que conforman la aleta.

$$\tau = M(q_t)\ddot{q}_t + G(g)$$

Donde:

$M(q_t)$: Matriz de inercia

$G(g)$: Par gravitacional

$$M(q_t) = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix}$$

$$M_{11} = m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 a_2^2 + 2m_2 l_1 a_2 \cos(q_2) + I_1 + I_2$$

$$M_{12} = m_2 a_2^2 + m_2 l_1 a_2 \cos(q_2) + I_2$$

$$M_{21} = m_2 a_2^2 + m_2 l_1 a_2 \cos(q_2) + I_2$$

$$M_{22} = m_2 a_2^2 + I_2$$

$$G(g) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$$

$$g_1(q_1) = [m_1 a_1 + m_2 a_1] \sin(q_1) + m_2 a_2 \sin(q_1 + q_2)$$

$$g_2(q_2) = m_2 a_2 g * \sin(q_1 + q_2)$$

Entonces se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \ddot{q}_t + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$$

Donde:

m_1 = Masa del húmero de la aleta.

a_1 = Distancia al centro de masa m_1 .

l_1 = Largo del húmero de la aleta.

q_1 = Ángulo de posición del húmero de la aleta.

m_2 = Masa del radio de la aleta.

a_2 = Distancia al centro de masa m_2 .

l_2 = Largo del radio de la aleta.

q_2 = Ángulo de posición del radio de la aleta.

La identificación de las tortugas marinas, usando características externas, se basa en las escamas de la cabeza, la forma de las mandíbulas, el número de dedos en las aletas, y el número y arreglo de las placas o escudo en el caparazón. (Wyneken, 2004)

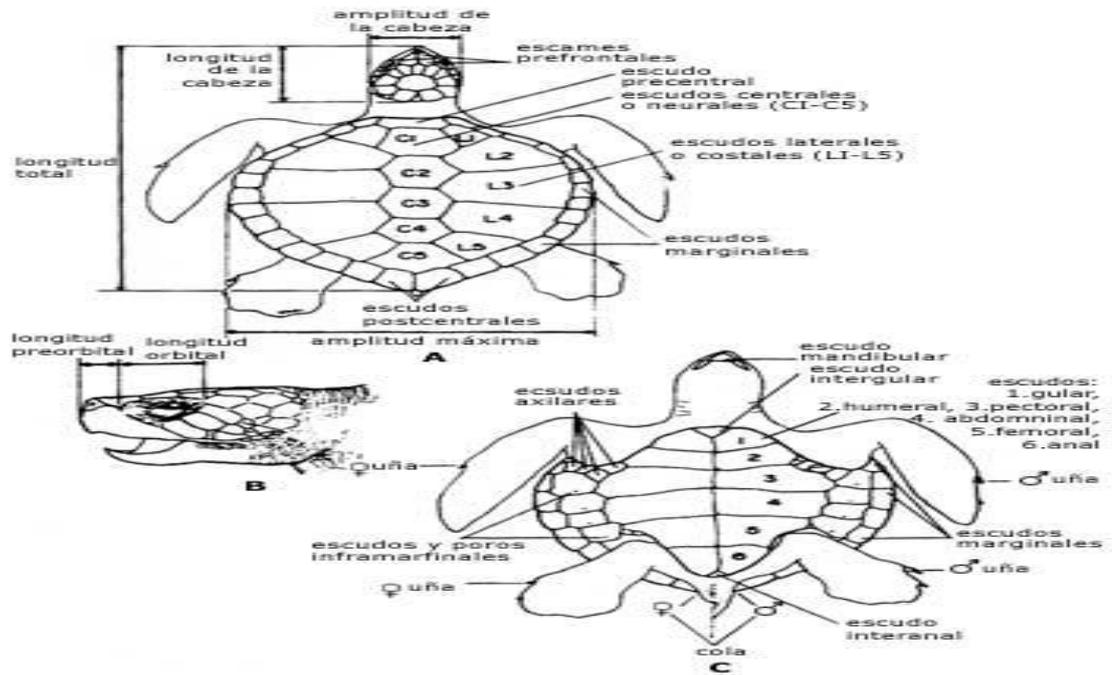


Figura 2.3. Características externas de las tortugas marinas.

Fuente:(Marquez, 1996)

De acuerdo a Wyneken (2004), "el esqueleto se compone de huesos y cartílagos y típicamente se divide en tres partes principales: el cráneo, el esqueleto axial y el esqueleto apendicular"

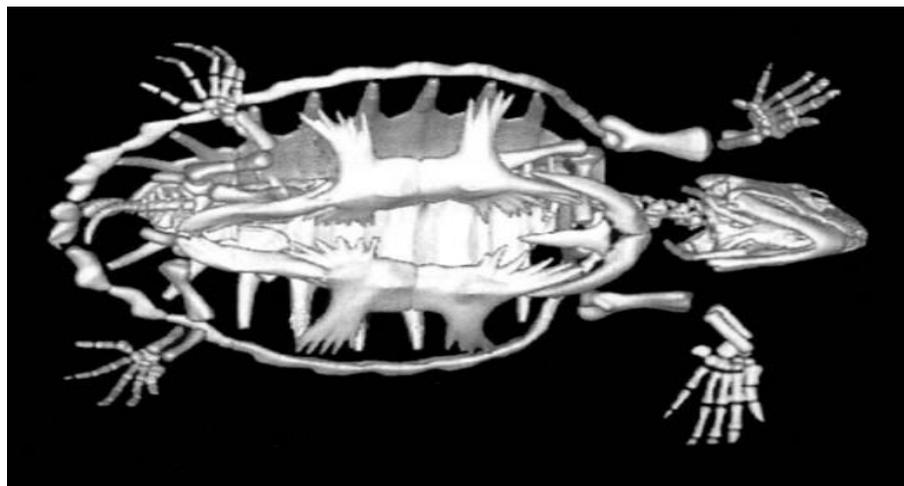


Figura 2.4. Los huesos que componen el esqueleto.

Fuente: (Wyneken, 2004)

El esqueleto apendicular incluye las aletas frontales y las cinturas escapulares. Las cinturas escapulares se compone de dos huesos, la escápula, y el coracoides, que sirven como lugares importantes de inserción para la musculatura de natación.

La extremidad delantera se compone del húmero, radio y cúbito, huesos carpianos, huesos metacarpianos y 5 falanges. La parte plana de la aleta está formada por el ensanchamiento y aplanamiento de los huesos de la muñeca y el alargamiento de los dedos.

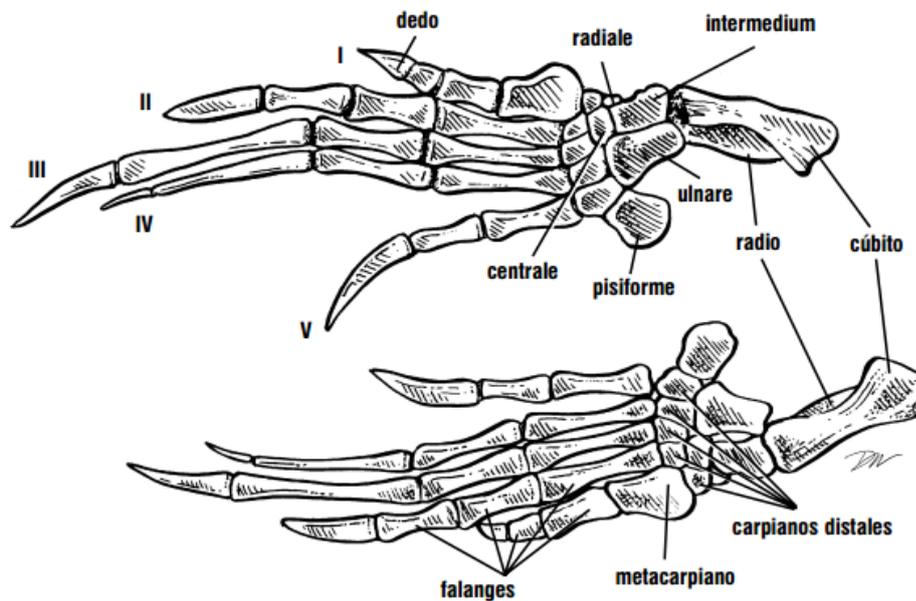


Figura 2.5 Vista dorsal del esqueleto de las aletas (izquierda y derecha)

Fuente: (Wyneken, 2004)

Los músculos mueven estructuras del cuerpo, modifican la función de otros músculos, y estabilizan las articulaciones. Los músculos tienen su origen en el mesodermo y se insertan por medio de tendones.

Con referencia a las tortugas marinas las funciones son las siguientes: la flexión dobla una parte con relación a otra en una articulación; la extensión endereza esas mismas partes. Los músculos pro tractores mueven la extremidad hacia afuera y hacia el frente, la retracción mueve esa misma parte hacia adentro y hacia atrás. La abducción aleja una parte de una superficie ventral; la abducción trae la parte hacia la superficie ventral. (Peter L. Lutz, 1996)

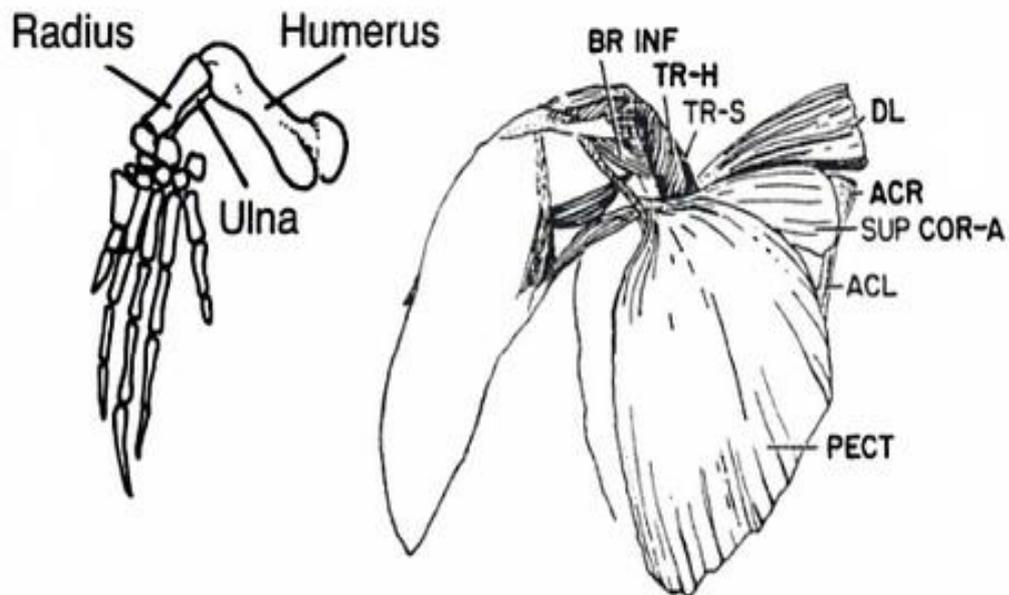


Figura 2.6 Sistemas musco-esquelético de la aleta frontal

Fuente: (Peter L. Lutz, 1996)

Las tortugas marinas descienden funcionalmente y morfológicamente de otro linaje de la familia chelonian. Su forma de locomoción y sus adaptaciones locomotoras, más que cualquier otra característica, hace que las tortugas marinas sean únicas de las otras tortugas.

Consecuentemente las tortugas marinas llaman la atención de varios estudios a nivel mundial los cuales investigan, analizan y describen la adaptación en la vida marina y locomoción acuática y terrestre. En general la locomoción de las tortugas tiene características únicas cuando se las compara con cualquier otro

vertebrado, por su rígido caparazón, su propulsión la cual viene estrictamente de sus aletas.

Mientras que todas las tortugas terrestres y tortugas de agua dulce utilizan sus cuatro extremidades para nadar o reptar, las tortugas marinas utilizan las dos extremidades anteriores produciendo empuje para nadar o reptar en la tierra. (Peter L. Lutz, 1996)

De acuerdo a Peter Lutz (2006), “bajo la mayoría de las circunstancias, las aletas anteriores tienen la responsabilidad primordial para la producción de empuje en la locomoción acuática y terrestre”.

2.2.1.1. PATRÓN CÍCLICO DE LAS ALETAS

Las tortugas marinas y sus crías usan típicamente un patrón cíclico de extremidades llamado “oscilación y apoyo” mostrado en la figura 2.8, las aletas anteriores se prolongan en forma simultánea, luego se reposicionan una vez que tocan el suelo para generar la fuerza de propulsión; después el cuerpo es levantado al momento que las aletas barren nuevamente para propulsar el cuerpo hacia delante. Las aletas traseras se repliegan hacia la parte de atrás siendo replegadas y arrastradas mientras las extremidades posteriores completan el ciclo. (Marquez, 1996)

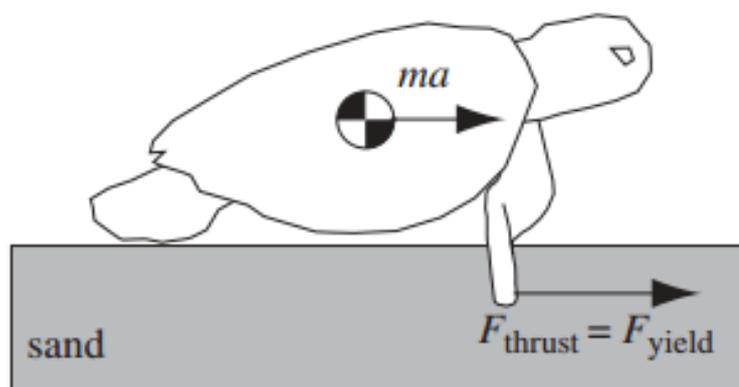


Figura 2.7 Fuerza de empuje provocada por aletas delanteras

Fuente (Peter L. Lutz, 1996)

2.2.1.2. GENERACIÓN DE LA PROPULSIÓN

En un estudio acerca de la comparación de la locomoción dentro y fuera de medios granulares se descubrió que los animales que se trasladan en medios granulares mediante aletas deben generar dos fuerzas: la primera de ellas es la fuerza vertical, la cual contrarresta la gravedad, y la segunda es la fuerza de empuje graficada en la figura 2.7 o hacia adelante, la cual genera la propulsión y es la que debe superar el factor de rozamiento mínimo generado por la placa plastrón en contacto con las superficies granulares.

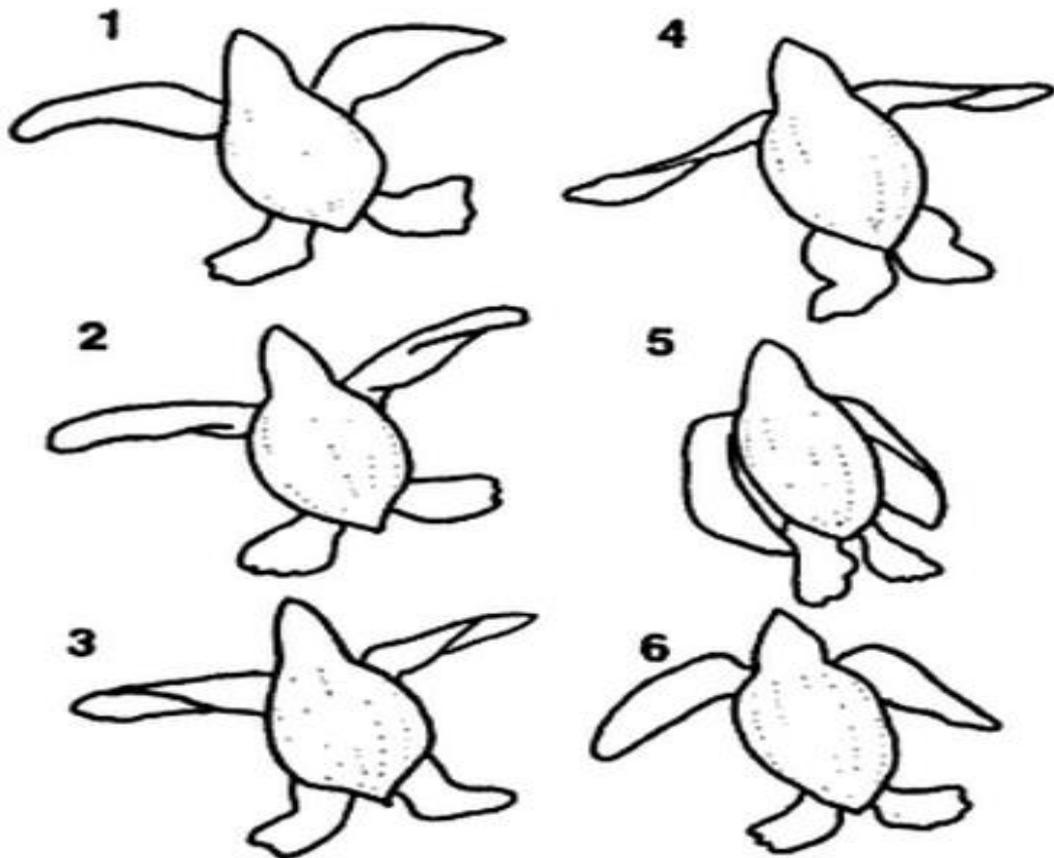


Figura 2.8 Patrón de movimiento usado para la locomoción terrestre.

Fuente (Peter L. Lutz, 1996)

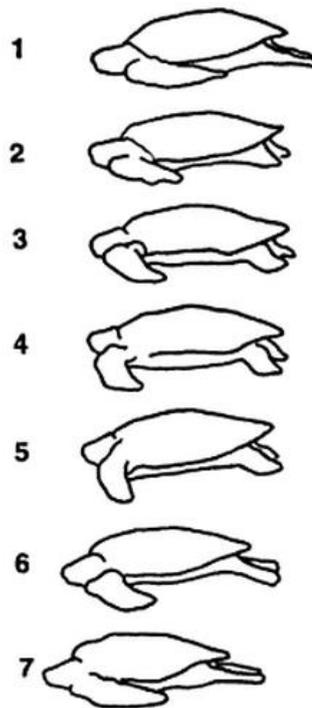


Figura 2.9 Ciclo de generación de propulsión con las aletas delanteras.

Fuente (Peter L. Lutz, 1996)

2.3. MODELADO MECÁNICO DEL MOVIMIENTO

“Descripción de los fenómenos asociados con el movimiento de los cuerpos, en los sistemas mecánicos se tendrá habitualmente como variables descriptivas las posiciones, velocidades, y aceleraciones con sus relaciones constitutivas básicas” (Victor, 2015)

2.3.1. FLIPPERBOT

La Facultad de Biología del Georgia Tech conjuntamente con la escuela de física inicio la investigación en 2010 con un estudio de seis semanas de las crías de las tortugas marinas que emergen en la noche desde sus nidos hacia el océano.

Los datos sorprendieron a los investigadores al saber que las tortugas podían mantener su velocidad sin importar la superficie en la que se estaban

desplazando; en el suelo duro bloqueaban las muñecas y giraban alrededor del brazo fijo, mientras que en arena blanda las muñecas se doblaban mientras avanzaban, esto llevó al desarrollo de FlipperBot.

FlipperBot es un robot de dos extremidades delanteras con una longitud de 19 centímetros, con una masa de 0.790kg, las extremidades del Fbot son simétricas con respecto a la línea media y en una posición comparable a las aletas pectorales de una tortuga de mar.

Cada extremidad se conecta a la base a través de un enlace llamado hombro por medio de dos servomotores, cada servomotor llamado arriba-abajo se fija a la base con su eje de rotación paralelo a la línea anterior-posterior, el servomotor llamado proa-popa está conectado al motor arriba-abajo por un soporte de tal manera que el eje de rotación del servomotor sea perpendicular al eje de rotación del servomotor arriba-abajo.

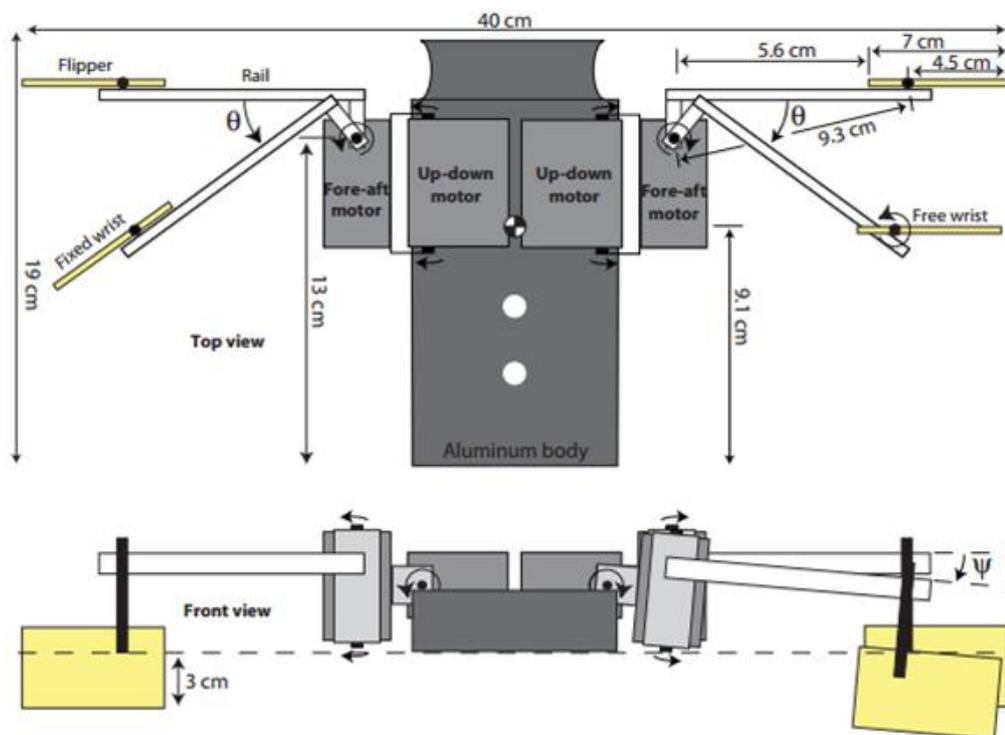


Figura 2.10 Modelo mecánico de Flipperbot

Fuente:(Nicole Mazouchova, Paul B Umbanhowar y Daniel I Goldman, 2013)

2.3.2. TORTUGA ROBÓTICA ANFIBIA

En el año 2007 la facultad de ingeniería y aeroespacial de la Universidad Tecnológica Nanyang estudió, modeló, y construyó un vehículo submarino distinto a los convencionales, un robot biológicamente inspirado en tortugas marinas.

Las criaturas vivas acuáticas proveen inspiración a los investigadores para estudiar los aspectos de la cinemática y dinámica de la locomoción submarina, su capacidad intrínseca de nadar su estructura anatómica aerodinámica, y su inigualable eficiencia de patrones de nado.

Un notable número de investigaciones e ingenieros han trabajado en el desarrollo de un pez robótico biomimético, pero otros animales como la tortuga, pingüinos, y aves acuáticas muestra patrones diferentes de nado. Al contrario de los peces que oscilan y ondulan sus cuerpos, estas criaturas viajan a través del agua gracias al aleteo y al remo de sus extremidades las cuales son eficientes.

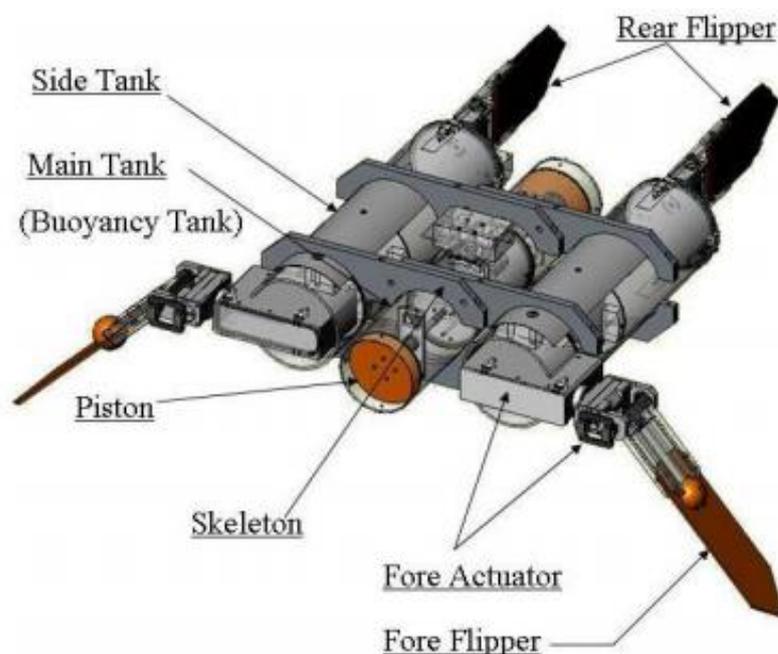


Figura 2.11 Modelo mecánico de la tortuga robótica anfibia

Fuente : (K. H. Low, Chunlin Zhou, T. W. Ong ,2007)

El robot anfibio consta de un cuerpo cilíndrico el cual reduce el peso de la estructura y otorga los requisitos de sellado. Las aletas pectorales frontales fueron diseñadas para la locomoción acuática y terrestre, es un mecanismo de dos grados de libertad adaptada para cada aleta delantera la cual es accionada por dos actuadores montados en diferentes cavidades ortogonales

2.3.3. MINI TORTUGA ROBÓTICA ANFIBIA

Un nuevo robot anfibio bio-inspirado con alta capacidad de adaptabilidad al ambiente llamado Minutarle-I fue desarrollado en el año 2010 por el laboratorio de manufactura y tecnología de la Universidad de Huazhong, el cual es capaz de transformar la locomoción terrestre y acuática a través de un nuevo mecanismo llamado pierna-aleta.

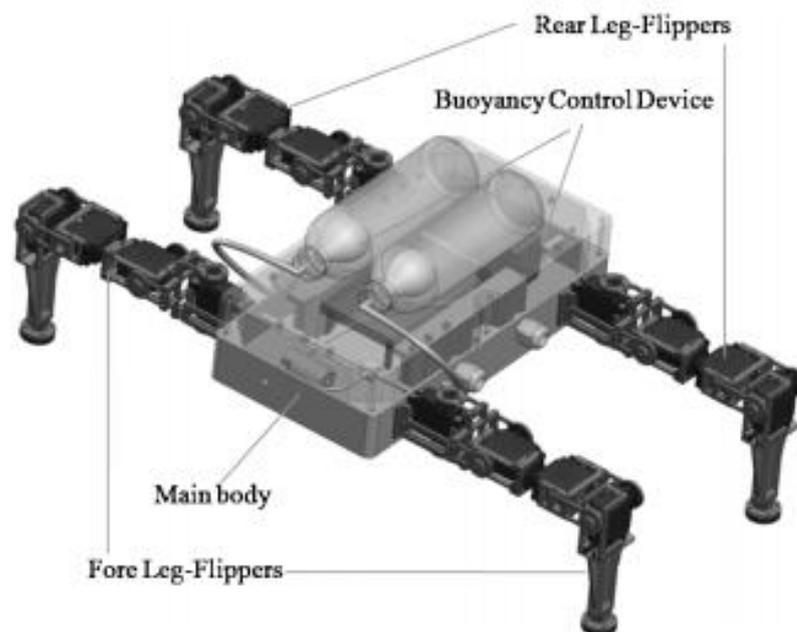


Figura 2.12 Modelo mecánico de la tortuga robótica anfibia

Fuente:(Bin Han , Xin Luo , Xinjie Wang y Xuedong Chen,2010)

Varios robots autónomos son utilizados para ayudar a los humanos en varias tareas asiduas de alto riesgo en la tierra, el mar, y otros entornos complejos, sin embargo la poca adaptabilidad a diferentes medios obstaculiza a los robots a completar tareas más avanzadas e inteligentes.

El diseño de Miniturtle-I fue dividido en cuatro módulos: módulo de la pierna-aleta, módulo del cuerpo principal, módulo de control de la flotabilidad, y el módulo de control electrónico los cuales fueron desarrollados por separado.

El diseño del módulo de pierna-aleta se compone de cuatro módulos rotatorios conjuntos los cuales corresponden respectivamente a la pelvis, cadera, rollo y rodilla. Estos cuatro módulos rotatorios le permiten al robot tener cuatro grados de libertad los cuales constan de un servomotor el cual proporciona rangos de movimientos limitados por parámetros programados para asemejarse a los movimientos de una tortuga.

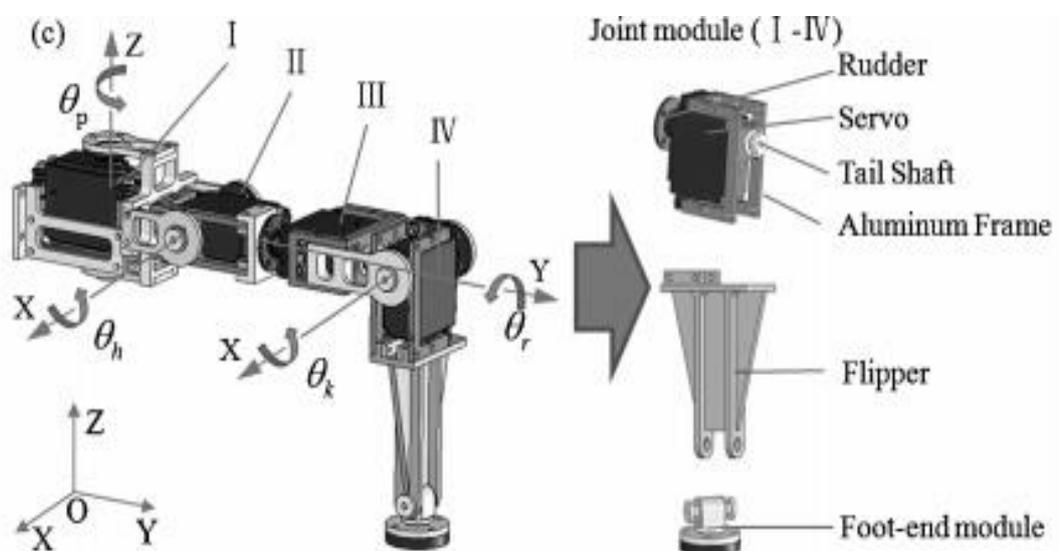


Figura 2.13 Modelo mecánico de la pierna-aleta

Fuente:(Bin Han , Xin Luo , Xinjie Wang y Xuedong Chen,2010)

2.4. MECANISMOS ALTERNOS PARA EL MOVIMIENTO DE ALETAS

2.4.1. MECANISMO DE CUATRO BARRAS

El mecanismo de cuatro barras tiene dos grados de libertad y consta de cuatro barras: a bar, b bar, c bar, y d bar, graficadas en la figura 2.14 miembros representados por cuatro barras controlados por dos motores enlazados, que se encuentran en el interior de las partes fijas.

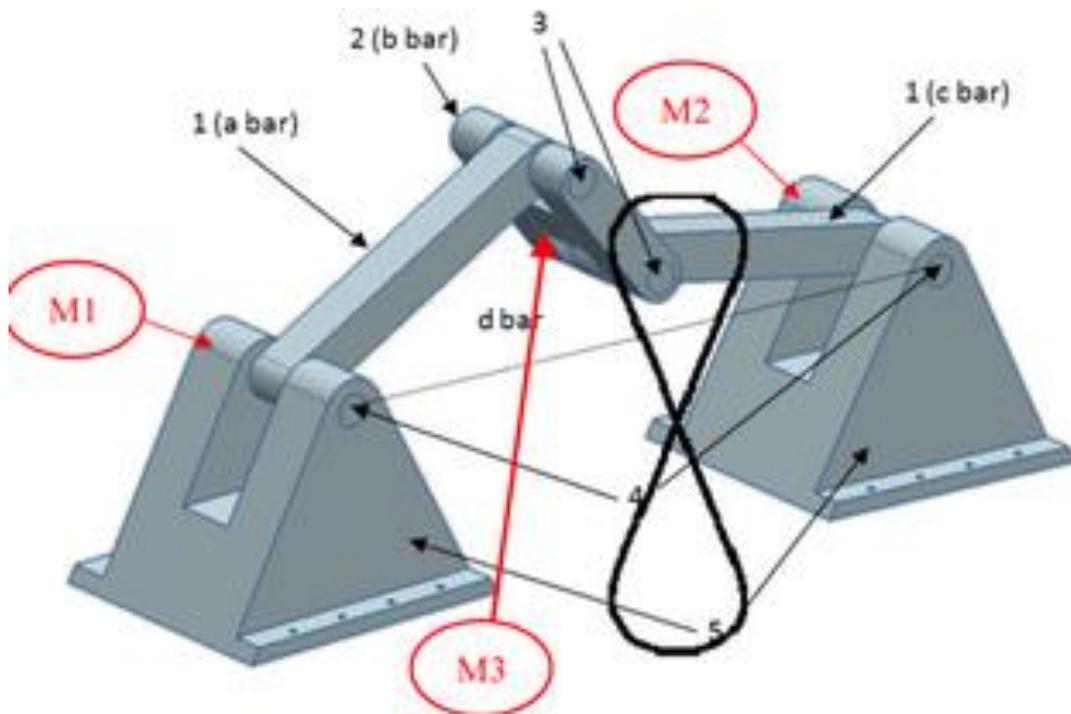


Figura 2.14 Modelo del mecanismo de cuatro barras.

Fuente:(Davinia Font, M. T, 2011)

En los enlaces M1 y M2 de la figura 2.14 se colocan actuadores para producir la trayectoria con la forma de ocho simulando el aleteo de la tortuga de mar. (Davinia Font, 2011)

2.4.2. MECANISMO DIFERENCIAL

Es un mecanismo compacto con dos grados de libertad similar al que se utiliza actualmente para el movimiento de la pierna en robots que caminan. En este mecanismo dos motores colocados en M1 y M2 alimenta dos engranajes cónicos, que se encuentran en el eje horizontal, que transmiten el movimiento a un tercer engranaje situado en un eje vertical.

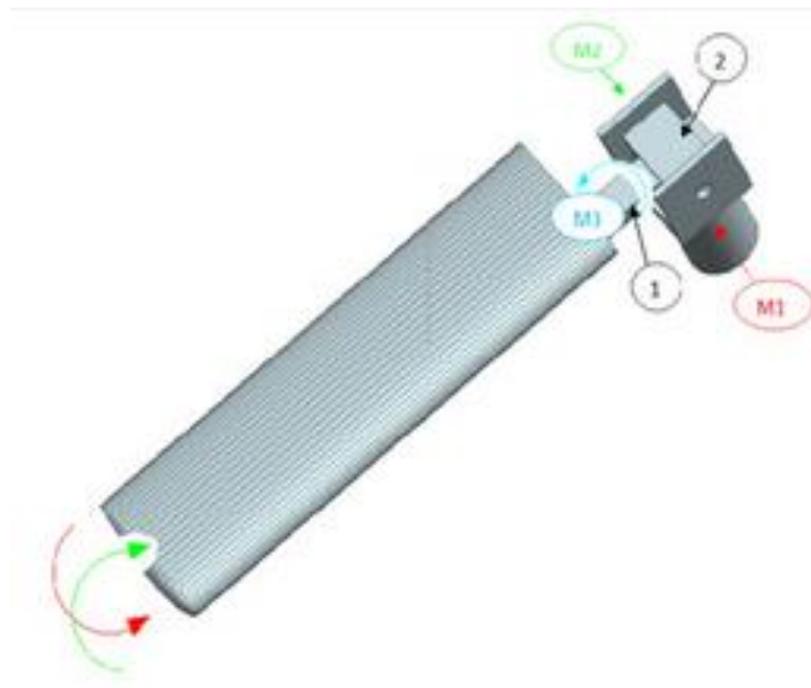


Figura 2.15 Modelo del mecanismo diferencial.

Fuente:(Davinia Font, M. T, 2011)

2.4.3. MECANISMO TRASLACIÓN POLEA

Este mecanismo consiste en dos transmisiones de polea unidas por una guía para transmitir el movimiento axial entre los dos. Cada transmisión de polea genera movimiento a través de un único motor situado en una polea.

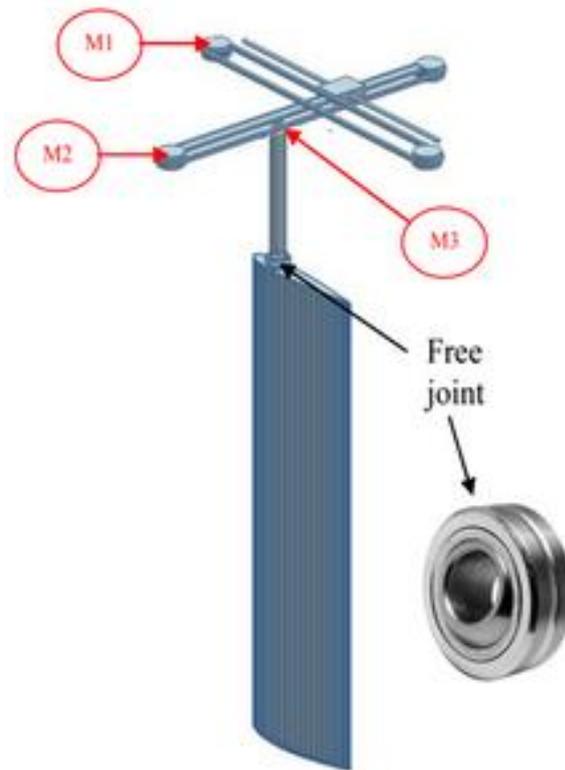


Figura 2.16 Modelo del mecanismo de traslación de polea.

Fuente:(Davinia Font, M. T, 2011)

La combinación de dos motores en M1 y M2 genera la amplitud vertical y horizontal de la trayectoria de propulsión final. Los movimientos de traslación que se generan en las transmisiones se convierten en rotación mediante una articulación libre, que se encuentra en el mismo eje que sujeta el hidropiano. (Davinia Font, 2011)

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este capítulo se procederá a describir la metodología mecatrónica que se debe usar para la realización de un producto o trabajo de ingeniería, se abordará las partes fundamentales de los procedimientos estrictos para la realización de un producto mecatrónico, así como el diseño en paralelo, el cual comprende las especificaciones de cada uno de los tres principales sistemas del diseño del robot mecatrónico capaz de desplazarse en superficies de arena; también en el capítulo se detallará la elección y las especificaciones de cada uno de los materiales elegidos .

3.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA

La metodología es una colección de prácticas, procedimientos y reglas utilizadas para el desarrollo de una determinada rama de conocimiento o disciplina.

Los sistemas mecatrónicos son multidisciplinares, incorporan cuatro disciplinas tecnológicas fundamentales: ciencias de la computación y tecnología de la informática, ingeniería electrónica, y la ingeniería mecánica.

La metodología mecatrónica se basa en un enfoque concurrente para guiar todas las etapas del diseño preliminar, lo que genera sinergia en la integración de los sistemas mecánicos, electrónicos, computacionales de productos y procesos.

La ingeniería concurrente del enfoque de mecatrónica se basa principalmente en el uso de modelado y simulación de sistemas a través de las etapas de diseño y creación de prototipos.

El modelado y la simulación incluyen entornos como diagramas de bloque, diagramas de flujo, diagramas de transición de estados y gráficos. (Devdas Sheety, 2011)

De acuerdo A Devdas (2011), el proceso de diseño mecatrónico se compone en tres fases modelado, prototipado y despliegue.

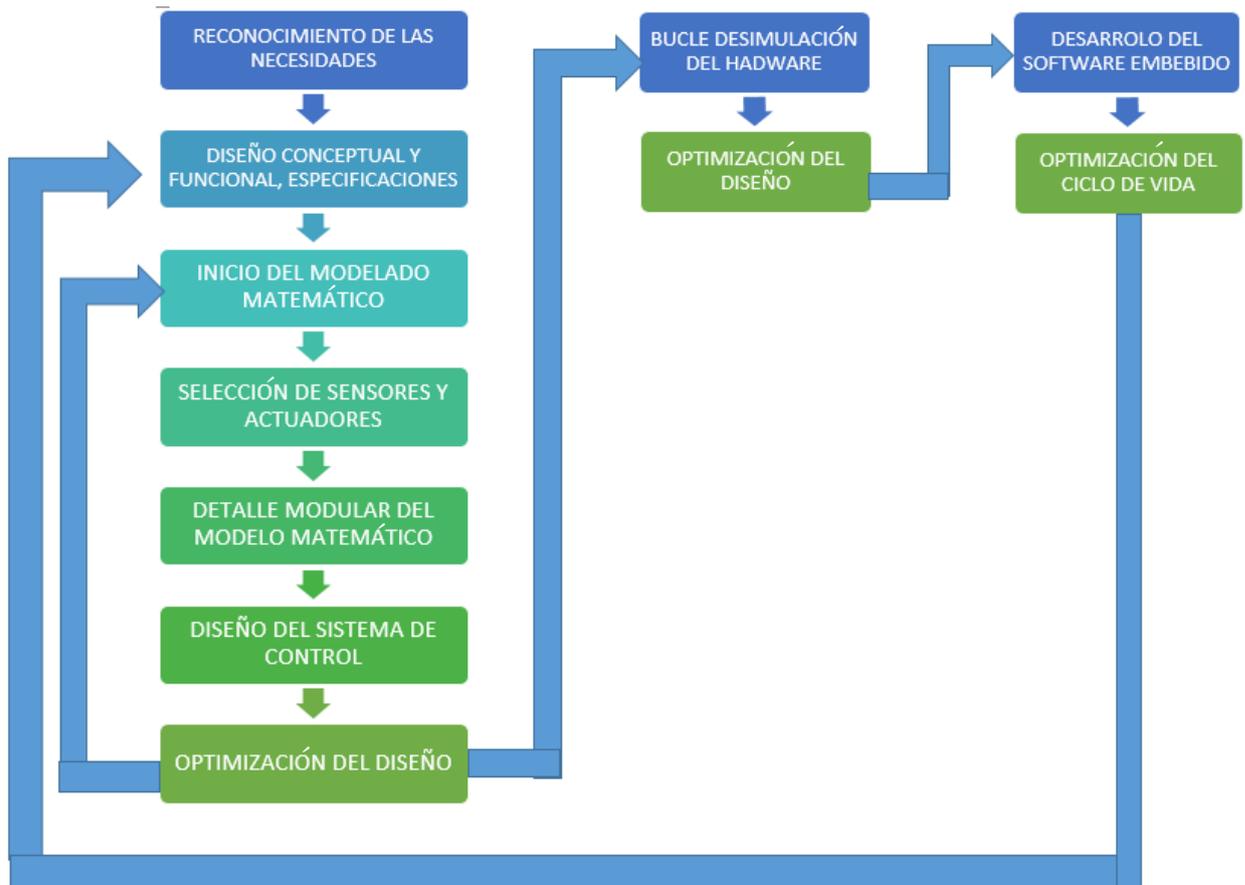


Figura 3.1 Proceso de diseño mecatrónico.

Fuente: (Devdas Sheety, 2011)

3.2. MODELADO MATEMÁTICO

Es un tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos. En la construcción de modelos matemáticos se debe seguir fases determinadas:

- 1) **Identificación:** del problema que necesita ser simulada, optimizada y controlada y por lo tanto requeriría un modelo matemático predictivo.

- 2) **Elección del tipo:** del modelo, esto requiere precisar qué tipo de respuesta o salida pretende obtenerse, cuales son las entradas y factores relevantes, esta elección debe ser simple para permitir un tratamiento matemático asequible con los recursos disponibles.
- 3) **Formalización:** del modelo en la que se detallarán que forma tienen los datos de entrada, que tipo de herramienta matemática se usará, y como se adaptan a la información previa existente.
- 4) **Comparación de resultados:** los resultados obtenidos necesitan ser comparados con los hechos observados para determinar si el modelo está correcto (Rios, 1995).

3.3. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para el diseño del prototipo mecatrónico los requerimientos se llevan a cabo mediante un análisis de las características mecánicas, eléctricas e informáticas que el sistema debe cumplir.

Entre las características principales se puede nombrar:

- Modelo: el modelo del robot se eligió a partir de cuatro diseños de mecanismos de aletas.
- Dimensiones del prototipo y las aletas.
- Implementar los sistemas de aletas con dos grados de libertad
- Peso del prototipo y aletas.
- Materiales para la fabricación de las aletas.
- Conocer las fuerzas de rozamiento de las superficies granulares.
- La fuerza de empuje necesaria para producir la locomoción con las aletas.
- El actuador apropiado para ejercer fuerza de empuje.
- El controlador para el funcionamiento coordinado del sistema de aletas.
- La velocidad de la locomoción en las superficies granulares.

3.4. DISEÑO PARALELO DEL SISTEMA

Para el diseño mecatrónico se debe tener en cuenta el diseño en paralelo de sistemas el cual consiste en realizar los tres prototipos: sistema de control, mecánico y electrónico, en los cuales se indica con gran detalle la forma en la que el prototipo procederá a cumplir los requerimientos y especificaciones mencionadas en el análisis de requerimientos del sistema.

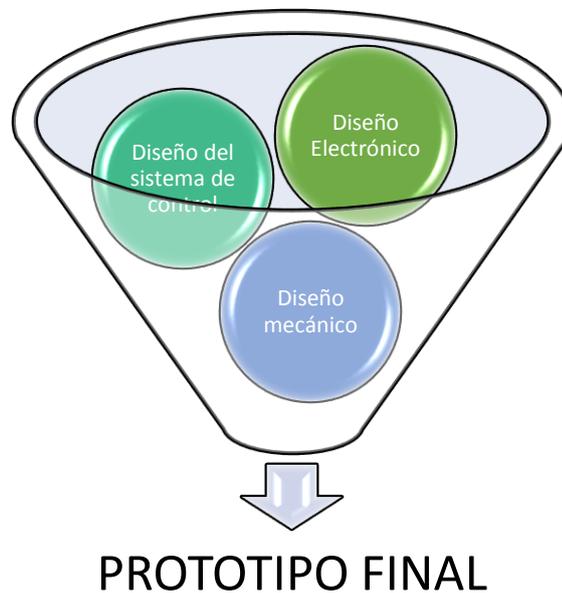


Figura 3.2 Desarrollo del diseño en paralelo.

3.4.1. DISEÑO MECÁNICO

En la etapa del diseño mecánico para que el prototipo mecatrónico cumpla con los requerimientos y especificaciones es importante el diseño y construcción de las aletas y el cuerpo para eso se procedió:

- En el análisis de requerimientos del subsistema mecánico se abordará las especificaciones necesarias que deben cumplir las aletas y el cuerpo.
- Análisis dinámico realizado mediante Euler-Lagrange para la obtención de ecuaciones que rigen los dos subsistemas.

- Análisis cinemático de un subsistema aleta para obtener el modelo matemático de la posición, velocidad, y aceleración.
- Estudio e investigación de los coeficientes de rozamiento que presentan las superficies granulares y los esfuerzos que se presentaron en cada aleta en el sumergimiento en la arena.
- Calculo de las dimensiones del subsistema aletas y del cuerpo.
- Diseño de prototipo virtual en el software SOLIDWORKS 2014
- Elección de materiales para la construcción de aletas y cuerpo
- Construcción del prototipo físico

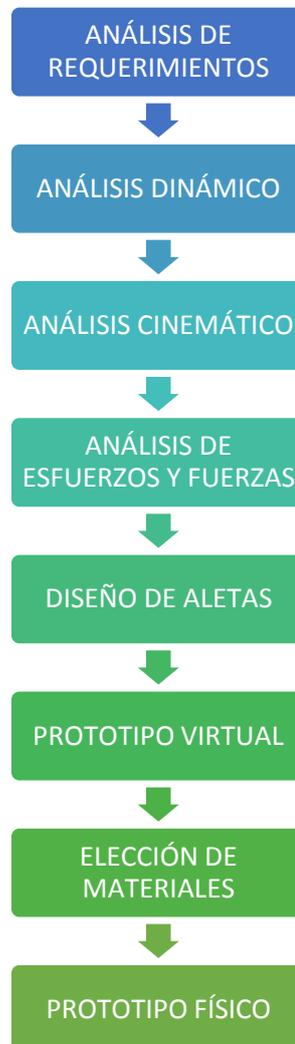


Figura 3.3 Proceso del diseño mecánico.

3.4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

En la etapa del diseño electrónico para que el prototipo mecatrónico cumpla con los requerimientos y especificaciones es importante determinar la capacidad de torque necesaria de cada servomotor para eso se procedió:

- Análisis de fuerzas de empuje necesarias de cada aleta para lograr vencer la fuerza de rozamiento de las superficies granulares y lograr la locomoción.
- Selección de los actuadores capaces de generar la fuerzas óptimas
- Cálculo de la corriente necesaria para la alimentación de los dos subsistemas aleta.
- Elección de la fuente de energía que va alimentar el prototipo.
- Diseño de la interfaz de alimentación del prototipo
- Implementación del sistema, sinergia mecánica y electrónica.

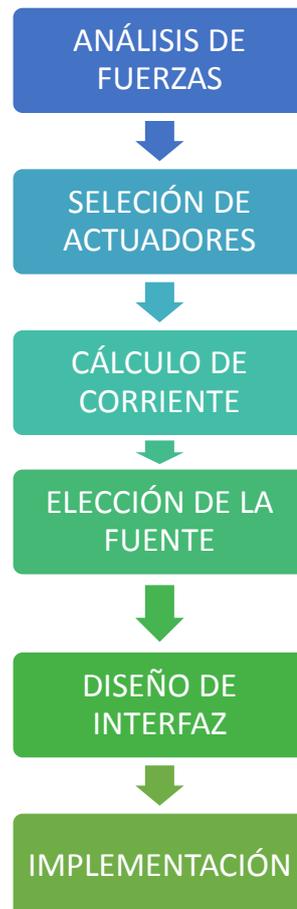


Figura 3.4 Proceso del diseño electrónico.

3.4.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En la etapa del diseño del sistema de control para que el prototipo mecatrónico cumpla con los requerimientos y especificaciones deberá controlar los dos subsistemas de las aletas su posición, velocidad, y aceleración para eso se procedió:

- Análisis del sistema completo mecánico y electrónico su funcionamiento principal.
- Elección del hardware que será el controlador principal del sistema.
- Programación del controlador en base a los requerimientos del sistema.
- Simulación del control de los subsistemas aletas y del sistema global.
- Implementación sinérgica mecánica-electrónica-sistema de control.



Figura 3.5 Proceso del diseño del sistema de control.

3.5. PRUEBAS

Esta fase del diseño mecatrónico es primordial ejecutarla para comprobar el correcto funcionamiento del prototipo y verificar que el sistema opera de la forma esperada y cumple con los requerimientos y especificaciones establecidas por el usuario sometiendo el prototipo a condiciones en las cuales trabajará normalmente.

Para el diseño mecánico se analizará y estudiará el comportamiento del modelo propuesto a través del software CAD SOLIDWORKS 2014 donde se diseñará los elementos mecánicos.

Una vez simulado por separado y en conjunto los tres subsistemas, y se haya comprobado que no hay fallas en el funcionamiento se procederá a la construcción del prototipo según los datos obtenidos en el pre diseño del sistema en paralelo. Después de construir el prototipo se procederá a realizar pruebas de funcionamiento, para lo cual se cumplirá con el siguiente procedimiento:

- 1) Validación del sistema en superficies de arena fina tipo playa seca y húmeda.
- 2) Validación del sistema en superficies de arena gruesa tipo playa.
- 3) Someter a locomoción de marcha simétrica del sistema completo en una superficie granular.
- 4) Someter a locomoción de marcha asimétrica del sistema completo en una superficie granular.
- 5) Validar su eficiencia y eficacia en la locomoción de superficies granulares.

3.6. MATERIALES

Para la construcción del prototipo mecatrónico se eligió componentes que por sus características facilitarán el desempeño del robot de los cuales se destacaron.

3.6.1. ARDUINO MICRO

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un micro controlador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios (Reverte, 2015)

Existen un sin número de arduinos en el mercado de los cuales se puede elegir, una característica principal de este arduino es que presenta 7 canales PWM primordiales para el control de los 4 servomotores, pero la característica principal por la cual fue seleccionada la arduino micro, fue por su tamaño el cual permitirá construir el prototipo con medidas pequeñas.

Tabla 3.1. Características arduino micro

Microcontroladores	ATmega3
Tensión de funcionamiento	5v
Voltaje de entrada recomendado	7-12v
Voltaje de entrada límite	6-20v
Pines Digitales I/O	20
Canales PWM	7
Canales de entrada analógicos	12
Longitud	48mm
Ancho	18mm
Peso	13g

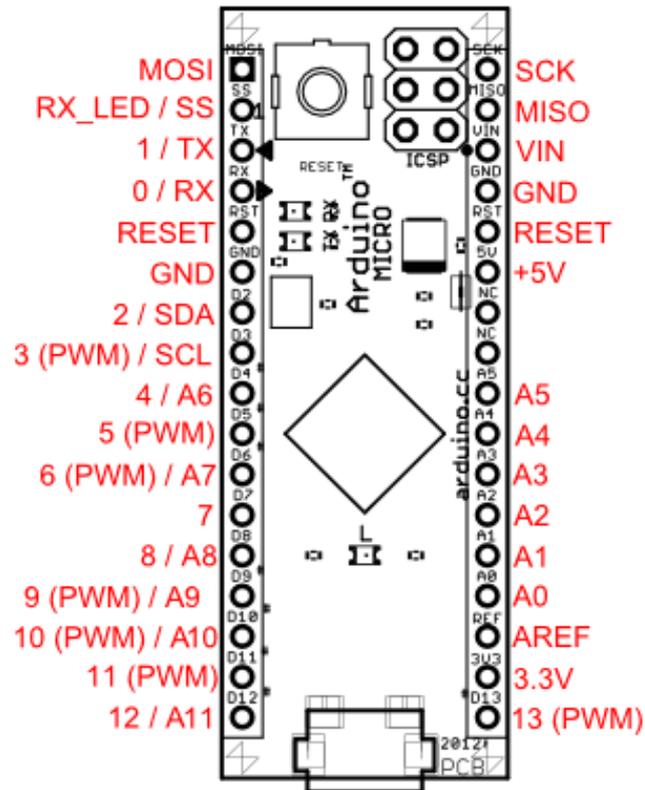


Figura 3.6 Asignación de pines arduino micro

Fuente: (ARDUINO CC, s.f.)

3.6.2. SERVO MOTOR MG 999r

El servomotor es un actuador mecánico con la capacidad de ser controlado, que posee los suficientes elementos de control para que se pueda monitorizar los parámetros de su actuación mecánica, como posición, velocidad, y torque.

Se consideró el servomotor MG996r basados en los cálculos de torques y las fuerzas de empuje y levantamiento que deberán producir dichos servos para lo cual los datos técnicos del mismo nos indican que cumplen con las especificaciones y requerimientos; también su peso ligero y sus dimensiones pequeñas nos facilitan la construcción del prototipo con medidas racionales.

Tabla 3.2. Características ServoMotor MG996R

Modulación	Análoga
Torque	152.8 oz-inch 11.00 kg-cm
Velocidad	0.14 s/60°
Peso	55.0 g
Dimensiones	Longitud 40.6 mm Ancho 19.8 mm Alto 1.69 mm
Tipo de motor	3-polos
Tipo de engranaje	Metálico

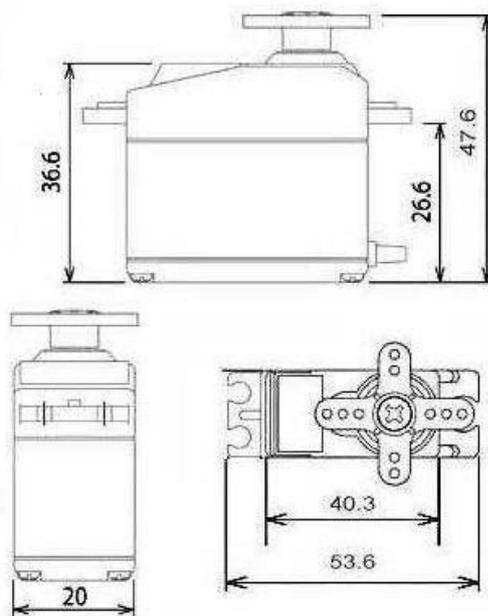


Figura 3.7 Dimensiones servomotor MG996R

Fuente: (IndoHeli, s.f.)

4. DISEÑO

En la etapa de diseño mecatrónico preliminar, tras haber culminado el análisis de las necesidades y requerimientos de cada subsistema: mecánico, electrónico y de control, se debe iniciar el diseño de cada sistema con un enfoque en paralelo, el cual facilita el correcto diseño de los tres prototipos con sus requerimientos cumplidos, necesarios para la sinergia del prototipo final.

4.1. DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico es fundamental en la sinergia del producto, ya que la eficacia y eficiencia de la locomoción en superficies de arena del prototipo de robot está ligada estrictamente al diseño de las aletas, con el cual se predefinirá: las dimensiones mínimas, la selección de material, la dimensión y las secciones transversales.

El modelo dinámico arrojó los datos preliminares de los elementos comunes del sistema, para poder continuar con el análisis cinemático el cual facilitó el conocimiento de las posiciones y velocidades de las aletas.

4.1.1. MODELO MATEMÁTICO

La determinación del modelo del sistema de locomoción del prototipo de robot a partir de la aleta posibilitará la deducción de su comportamiento a partir de las leyes físicas que lo rigen.

Este modelo matemático se configuró a partir del modelo de dos grados de libertad en el plano longitudinal, que describe el movimiento de la aleta en la fase de locomoción, el cual se obtuvo aplicando las ecuaciones de Lagrange a cada sistema arriba-abajo y proa-popa.

La figura 4.1 presenta el modelo de eslabones de cada sistema de aleta, los cuales están configurados uno a continuación del otro para simular el movimiento de los dos grados de libertad necesarios para la locomoción en superficies granulares.

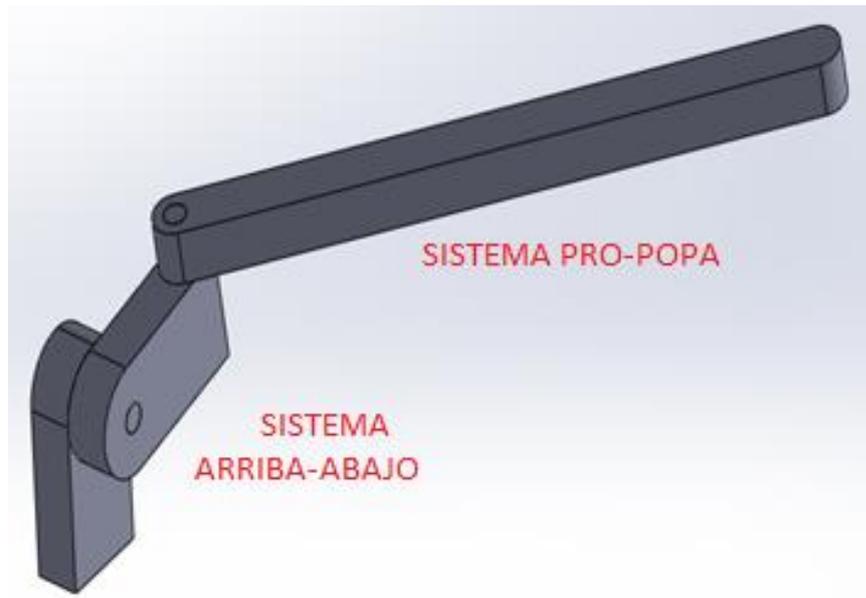


Figura 4.1 Modelo de eslabones de los sistemas de las aletas.

Los dos sistemas que componen la aleta a controlar fueron denominados: arriba-abajo y proa-popa.

Para obtener la ecuación de movimiento del sistema analizado, primero es necesario la formulación de la función de Lagrange, conocida como lagrangiano del sistema y es definida por:

$$L = T - U \quad [4.1]$$

Donde:

T: Energía cinética del sistema.

U: Energía potencial del sistema.

Energía cinética del sistema

Para este sistema rotatorio la energía cinética total se descompone como la suma de la energía cinética de traslación y la energía cinética de rotación.

$$T = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}IW^2 \quad [4.2]$$

Donde:

m: masa del sistema

V: velocidad lineal

W: velocidad angular.

I: Inercia

Energía potencial del sistema

Dependerá de la altura relativa de un objeto a algún punto de referencia, la masa y la fuerza de gravedad.

$$U = mgl \quad [4.3]$$

Donde:

m: masa del sistema

g: gravedad

l: Distancia

Para obtener el modelo matemático dinámico de la ecuación de movimiento, primero es necesario obtener el modelo cinemático; para la obtención del

modelo se cuenta con diferentes métodos, para este análisis se abordará mediante el método de las matrices de transformación homogénea el cual representan las rotaciones y desplazamientos que existen a lo largo de la cadena cinemática completa que componen las aletas.

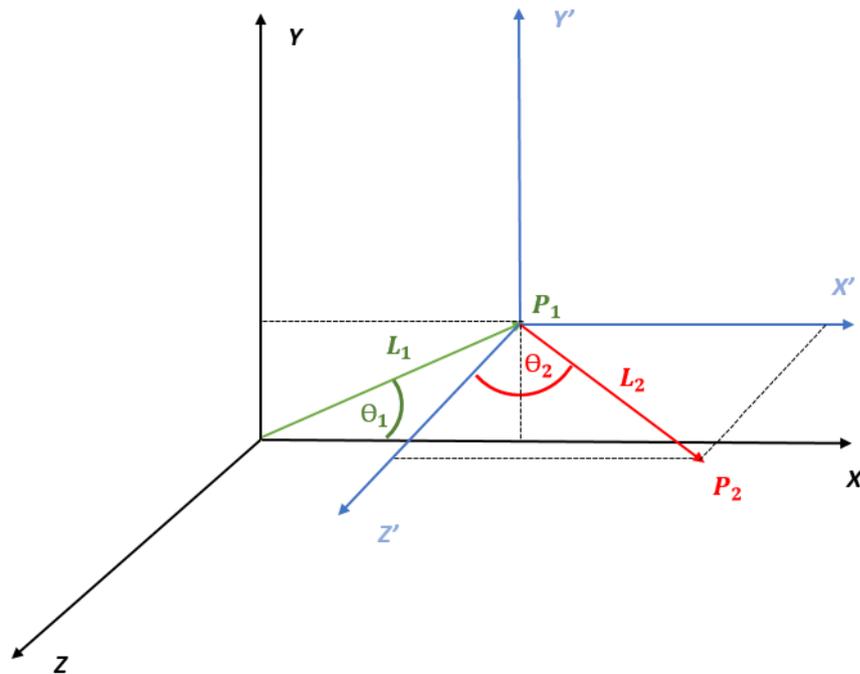


Figura 4.2 Sistema de Coordenadas

La matriz de transformación homogénea facilita el estudio de la traslación y rotación de las cadenas cinemáticas, en este caso el sistema solo presenta la traslación con respecto a plano de referencia XYZ

El primer eslabón representado por P_1 con respecto al plano XYZ tiene por coordenadas cartesianas:

$$x = L_1 * \cos(\theta_1)$$

$$y = L_1 * \text{sen}(\theta_1)$$

$$z = 0$$

El punto P_1 de coordenadas cartesianas antes expuesta tiene por forma matricial:

$$P_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 * \cos(\theta_1) \\ L_1 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

El segundo eslabón representado por P_2 con respecto al plano X'Y'Z' tiene por coordenadas cartesianas:

$$x' = L_2 * \text{sen}(\theta_2)$$

$$y' = 0$$

$$z' = L_2 * \cos(\theta_2)$$

Y su forma matricial del punto P_2 es:

$$P_2 = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 * \text{sen}(\theta_2) \\ 0 \\ L_2 * \cos(\theta_2) \end{bmatrix}$$

Para completar el modelado cinemático del sistema en conjunto se debe obtener las coordenadas del eslabón dos representado por P_2 con respecto al plano principal XYZ el cual se obtiene mediante la multiplicación de las dos matrices:

$$\begin{bmatrix} P_2X \\ P_2Y \\ P_2Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_1 * \cos(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & L_1 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 * \text{sen}(\theta_2) \\ 0 \\ L_2 * \cos(\theta_2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Operando la multiplicación de la matriz se obtiene:

$$\begin{bmatrix} P_2X \\ P_2Y \\ P_2Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 * \cos(\Theta_1) + L_2 * \text{sen}(\Theta_2) \\ L_1 * \text{sen}(\Theta_1) \\ L_2 * \cos(\Theta_2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Para la obtención de vector velocidad del punto P_2 con respecto al plano XYZ es necesario derivar las tres expresiones matemáticas con respecto al tiempo.

Se obtendrá:

$$\dot{P}_2x = -L_1\dot{\theta}_1\text{sen}(\theta_1) + L_2\dot{\theta}_2\cos(\theta_2)$$

$$\dot{P}_2y = L_1\dot{\theta}_1\cos(\theta_1)$$

$$\dot{P}_2z = -L_2\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_2)$$

Para la obtención de la energía cinética del sistema conformado por los dos eslabones con dos grados de libertad se debe reemplazar la velocidad en la ecuación 4.2

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{P}_2x)^2 + \frac{1}{2}m(\dot{P}_2y)^2 + \frac{1}{2}m(\dot{P}_2z)^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}_2^2$$

$$T = \frac{1}{2}m[L_1^2\dot{\theta}_1^2\text{sen}^2(\theta_1) - 2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)\cos(\theta_2) + L_2^2\dot{\theta}_2^2\cos^2(\theta_2)$$

$$+ L_1^2\dot{\theta}_1^2\cos^2(\theta_1) + L_2^2\dot{\theta}_2^2\text{sen}^2(\theta_2)] + \frac{1}{2}[I\dot{\theta}_1^2 + I\dot{\theta}_2^2]$$

Desarrollando y reduciendo la identidad $\text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$

$$T = \frac{1}{2}m[L_1^2\dot{\theta}_1^2 + L_2^2\dot{\theta}_2^2 - 2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)\text{cos}(\theta_2)] + \frac{1}{2}I(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2)$$

Para la energía potencial del sistema es necesario utilizar la ecuación 4.3.

$$U = m * g * L_1 * \text{sen}(\theta_1)$$

Considerando las dos expresiones matemáticas anteriores el lagrangiano del sistema será:

$$L = T - U$$

$$L = \left\{ \frac{1}{2}m[L_1^2\dot{\theta}_1^2 + L_2^2\dot{\theta}_2^2 - 2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)\text{cos}(\theta_2)] + \frac{1}{2}[I\dot{\theta}_1^2 + I\dot{\theta}_2^2] \right\} - \{mgL_1\text{sen}(\theta_1)\}$$

$$L = \left[\frac{m}{2}L_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{m}{2}L_2^2\dot{\theta}_2^2 - mL_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)\text{cos}(\theta_2) \right] + \left[\frac{I}{2}\dot{\theta}_1^2 + \frac{I}{2}\dot{\theta}_2^2 \right] - mgL_1\text{sen}(\theta_1)$$

A partir de esta expresión particularizamos la ecuación para nuestros dos grados de libertad θ_1 y θ_2 .

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta_1} = \tau_1$$

$$\frac{d}{dt} (mL_1^2\dot{\theta}_1 + I\dot{\theta}_1 - mL_1L_2\dot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)\text{cos}(\theta_2)) - (-mL_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{cos}(\theta_1)\text{cos}(\theta_2) - mgL_1\text{cos}(\theta_1)) = \tau_1$$

$$\tau_1 = \ddot{\theta}_1(mL_1^2 + I) + mL_1L_2\text{cos}(\theta_2) [\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\text{cos}(\theta_1) - \ddot{\theta}_2\text{sen}(\theta_1)] + mgL_1\text{cos}(\theta_1)$$

Donde:

$\tau_1 =$ Momento de torque del sistema en θ_1 .

$\tau_2 =$ Momento de torque del sistema en θ_2 .

$\theta_1 =$ Ángulo de posicionamiento en el primer grado de libertad.

$m =$ Masa total del sistema.

$L_1 =$ Distancia del eslabón P_1 .

$L_2 =$ Distancia del eslabón P_2

$\theta_2 =$ Ángulo de posicionamiento en el segundo grado de libertad

$I =$ Inercia del sistema.

Tabla 4.1. Datos del primer grado de libertad θ_1 .

DATOS	VALOR
m	0.9kg
l_1	0.04m
l_2	0.12 m
I	0.02304kg * m ²
g	9.8m/s ²
τ_1	0,6 N.m

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta_2} = \tau_2$$

$$\frac{d}{dt} (mL_2^2 \dot{\theta}_2 + I \dot{\theta}_2 - mL_1 L_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2)) - ((mL_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)))$$

$$= \tau_2$$

$$\tau_2 = \ddot{\theta}_2 (mL_2^2 + I) - mL_1 L_2 \sin(\theta_1) (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_2))$$

Tabla 4.2. Datos del segundo grado de libertad θ_2 .

DATOS	VALOR
m	0.9kg
l_1	0.04m
l_2	0.12m
I	0.02304kg * m ²
τ_2	0,40 N.m

El torque generado por cada eslabón varía respecto a la posición de acuerdo con las leyes de movimiento rotacional, para esto se debe considerar un torque total como el máximo valor obtenido entre τ_1 y τ_2 multiplicado por un factor de seguridad.

$$Td = \tau_m * Fs \quad [4.4]$$

$$Td = 0,6 N.m * 1,5$$

$$Td = 0,9 N.m$$

$$Td = 9 Kgf.cm$$

Donde:

$Td =$ Torque de diseño.

$\tau_m =$ Maximo valor entre τ_1 y τ_2

$Fs =$ Factor de seguridad.

4.1.2. ESFUERZOS

El análisis de los esfuerzos a los cuales las aletas están sometidas es la parte fundamental del diseño estructural de la misma, del sistema que componen y principalmente del modelo mecánico, ya que este análisis arrojará los datos

necesarios tales como, las secciones transversales de las aletas, materiales y modos de sujeción de los subsistemas

La parte crítica del sistema son las aletas ya que de estas dependerán la eficiencia y eficacia del movimiento, estas se sumergirán a la arena para producir la fuerza de empuje necesaria, para esto se ha estudiado a partir de la ingeniería civil el empuje de suelos sobre muros de contención simulando lo que las aletas deberán superar el empuje activo del suelo.

4.1.2.1. FUERZA DE EMPUJE ACTIVO

El estudio de los esfuerzos comenzó con el cálculo de la fuerza de empuje del suelo sobre la sección horizontal de las aletas.

La fuerza de empuje activo de tierras se define como la acción que ejerce el terreno situado en el trasdós de un muro, que se da normalmente en los muros que no tienen anclajes, y que no tienen coartado su movimiento en coronación, ya que para su movilización es necesario cierto desplazamiento del terreno.

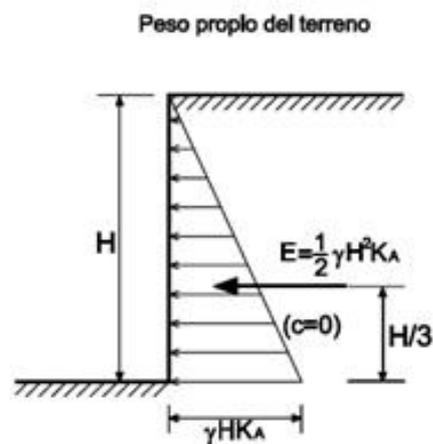


Figura 4.3. Empuje de tierras

Fuente: (Civil,2012)

A partir de la ecuación 4.5 se obtiene el empuje activo que genera el suelo a partir del sumergimiento de superficies.

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad [4.5]$$

Donde:

$E =$ Empuje Activo.

$\gamma =$ Peso específico..

$H =$ Altura de sumergimiento

$K_a =$ Coeficiente de empuje.

El coeficiente de empuje de tierras se calcula con la siguiente ecuación.

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad [4.6]$$

Donde:

$\phi =$ Angulo de fricción interna del suelo.

Conociendo que:

$$\gamma = \rho * g \quad [4.7]$$

Donde:

$\rho:$ Densidad del suelo.

$g:$ Gravedad

Tabla 4.3. Datos de fuerza de empuje.

DATOS	VALOR
ρ	1700 kg/m^3
H	0.04 m
ϕ	30°
g	9.8 m/s^2

Y sustituyendo las expresiones 4.6 y 4.7 en la ecuación 4.5 quedaría:

$$E = \frac{1}{2} \left(1700 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.8 \frac{m}{s^2} \right) (0.04m)^2 \left(\tan^2 \left(45^\circ - \frac{30^\circ}{2} \right) \right)$$

$$E = \frac{1}{2} \left(1700 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.8 \frac{m}{s^2} \right) (0,0016m^2) * (\tan^2(30))$$

$$E = \left(850 \frac{kg}{m^3} \right) \left(0,01568 \frac{m^2}{s^2} \right) * (\tan^2(30))$$

$$E = 4.5 \frac{N}{m}$$

4.1.2.2. SECCIÓN TRANSVERSAL

Dado que se obtuvo la fuerza principal de empuje activo se puede diseñar la sección transversal de la aleta.

En la figura 4.4 se muestra los diagramas de la fuerza cortante y el diagrama de momentos a partir de este último se obtiene el máximo momento, con este se calculará la sección transversal mínima con los siguientes cálculos:

$$\sigma a = \frac{M}{S} \quad [4.8]$$

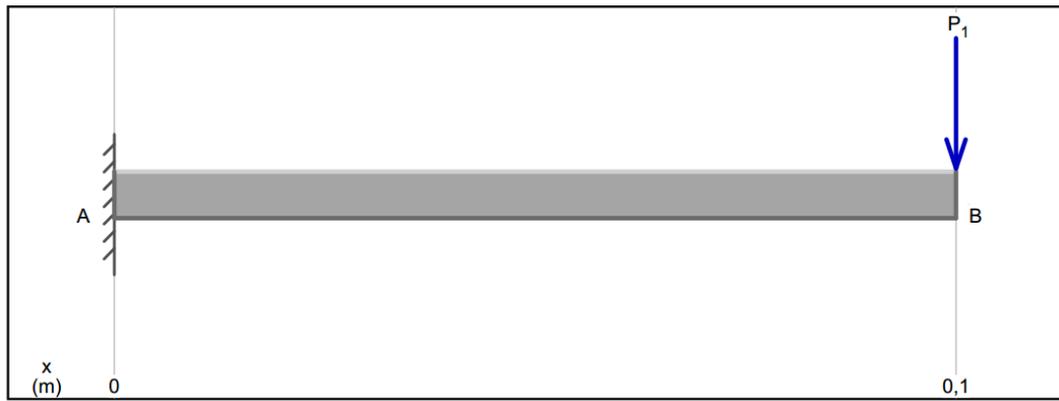
Donde:

M = Esfuerzo flexionante máximo

S = Modulo de la Sección transversal rectangular

En la figura 4.4 se muestra como la aleta está sometida a una fuerza de 4,5 N previamente calculada en su punto extremo B, ejerciendo un momento máximo en el punto A de 0,45N-m, el diagrama de la fuerza cortante muestra que la aleta estará sometida a una fuerza de 4,5 N continua a través de su sección, estos datos son indispensables para el diseño de la sección transversal

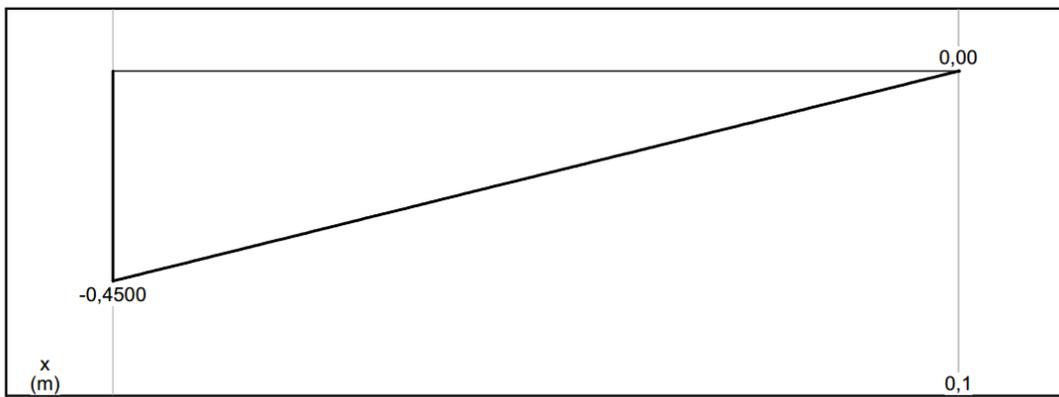
MOMENTO FLECTOR



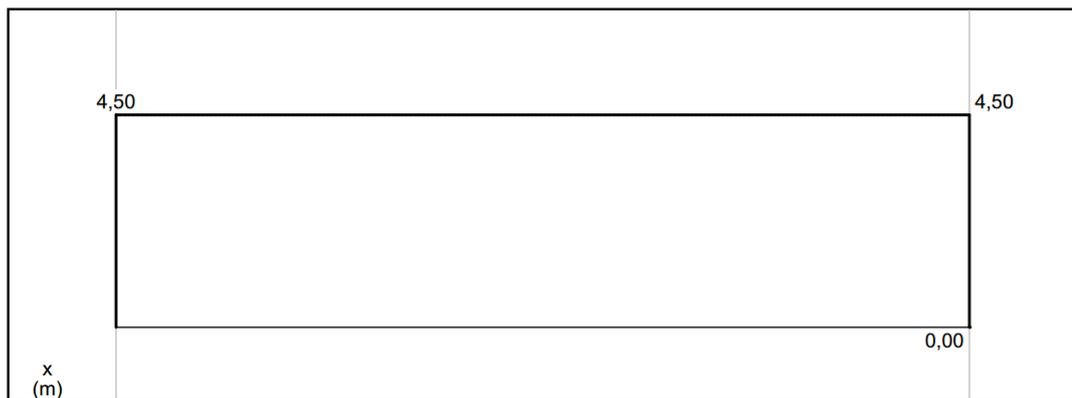
$P_1 = 4,5 \text{ N}$ (down)

Load Diagram

$A_y = 4,50 \text{ N}$ (up)
 $M_{\text{Moment A}} = 0,45 \text{ N-m}$ (ccw)



Moment Diagram (N-m)



Shear Diagram (N)

Figura 4.4 Diagrama de momentos cortante y flector.

Se calculará el valor mínimo de S, a partir del esfuerzo de diseño:

$$\sigma d = \frac{S_y}{N} \quad [4.9]$$

Donde:

S_y = Resistencia a la fluencia

N = Factor de seguridad

$$\sigma d = \frac{35 \text{ Mpa}}{2}$$

$$\sigma d = 17.5 \text{ Mpa}$$

Se debe asegurar que el esfuerzo máximo esperado, no sea mayor que el esfuerzo de diseño.

$$\sigma a = \sigma d$$

$$S = \frac{M}{\sigma d}$$

$$S = \frac{0.45 \text{ Nm}}{17.5 \text{ Mpa}}$$

$$S = 25.71 \text{ mm}^3$$

La relacion de S con las dimensiones geométricas debe ser mayor o igual al S previamente calculado y se calcula de la siguiente manera:

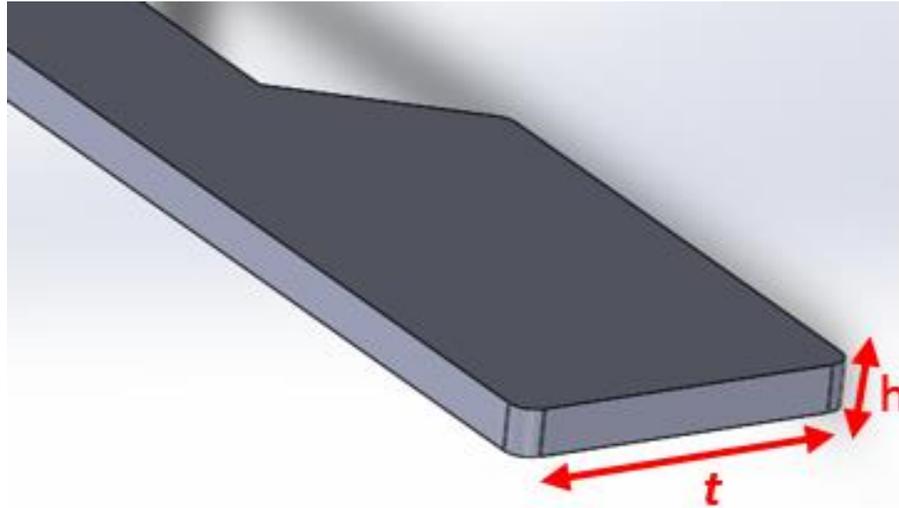


Figura 4.5 Dimensiones geométricas

$$S = \frac{t \cdot h^2}{6} \quad [4.10]$$

$$S = \frac{40\text{mm} \cdot 3\text{mm}^2}{6}$$

$$S = 60\text{mm}^3$$

Por lo tanto la S de diseño es mayor a la S de esfuerzos máximos.

4.1.3. MODELO CAD

Es necesario dimensionar las partes del robot para su correcto funcionamiento del prototipo, mediante la herramienta SolidWorks basado en técnicas de modelado con sistemas CAD, se puede obtener y realizar un modelo virtual del robot.

El prototipo del robot tortuga marina constará de una placa de dimensiones proporcionales, la que imitará la función de la placa plastrón de las tortugas del mundo animal en la cual irán sujetos los dos subsistemas aletas

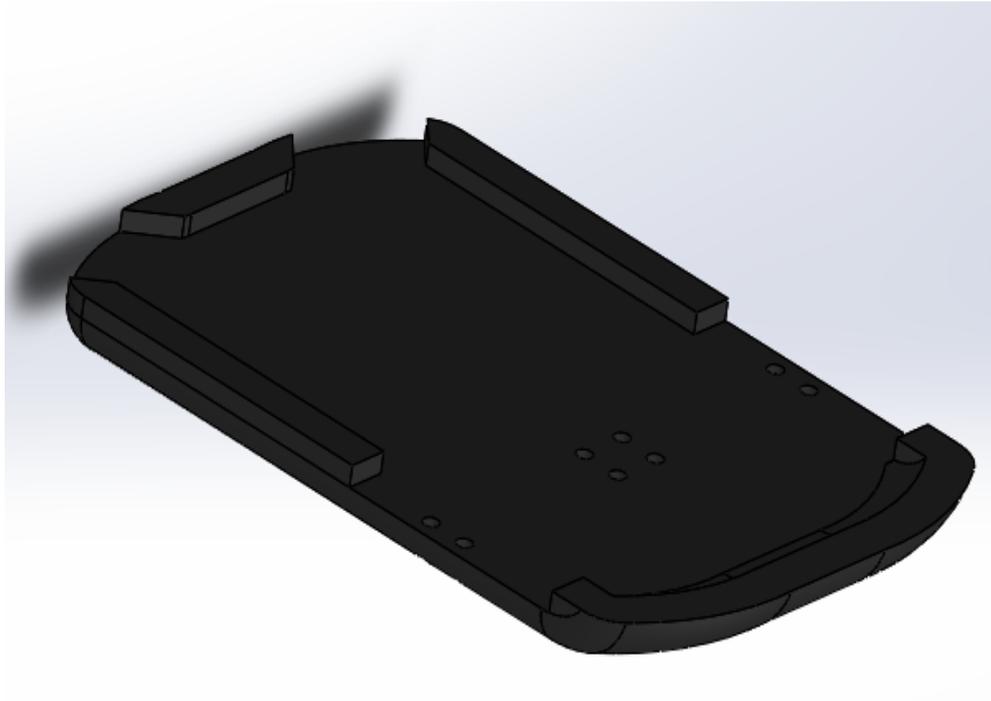


Figura 4.6 Placa plastrón en el software SolidWorks.

Para la sujeción de los dos primeros servos denominados sistema arriba-abajo aleta se utilizó dos servo brackets tipo C figura 4.7, los cuales irán empernados a la placa plastrón.

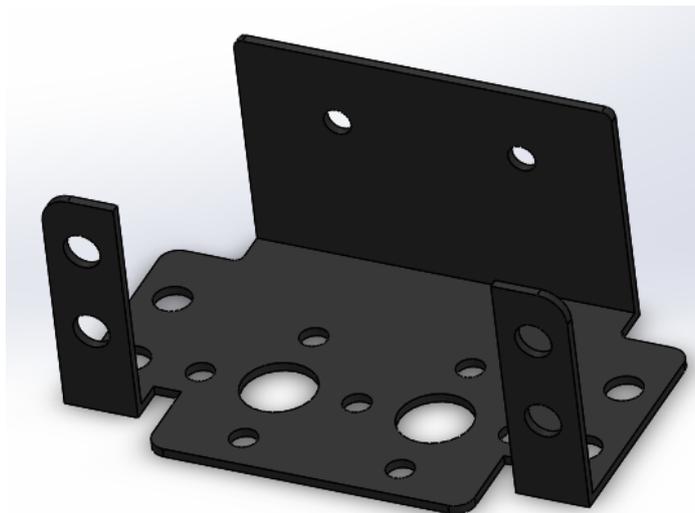


Figura 4.7 Servo bracket tipo C.

Mediante el montaje del primer sub-sistema, la conexión del segundo sistema denominado propa-popa se utilizó dos servo brackets tipo U.

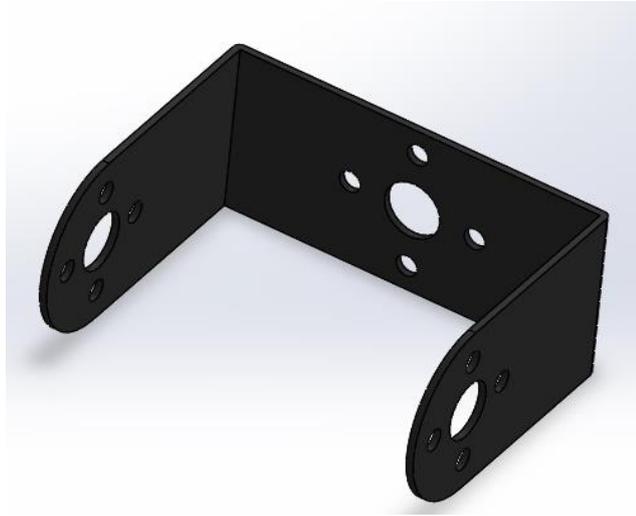


Figura 4.8 Servo bracket tipo U.

El ensamblaje de los dos sistemas arriba-abajo y sistema pro-popa como se describió antes se realizó mediante la utilización de los servo brackets tipo C y U; y mediante la implementación de las denominadas uniones y los ejes implementados para cada servo.

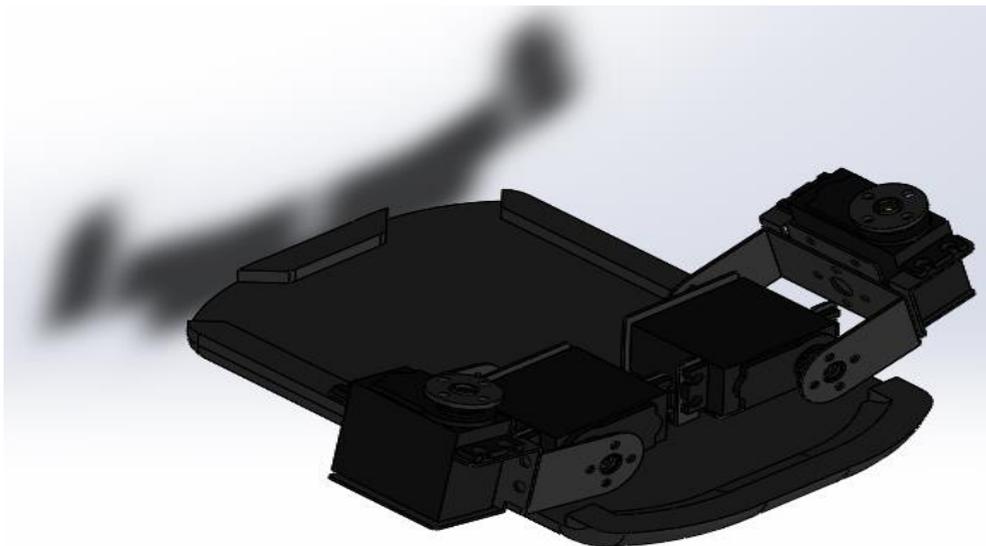


Figura 4.9 Ensamblaje de los dos sistemas.

La parte primordial del prototipo de robot tortuga marina capaz de lograr la locomoción en superficies de arena son las aletas, estas deberán ejercer la fuerzas de empuje, para esto primero se diseñó la placa plastrón y los dos sistemas, una vez culminados los diseños y los cálculos de las secciones transversales, se procedió a dimensionar las aletas con las especificaciones mínimas requeridas.

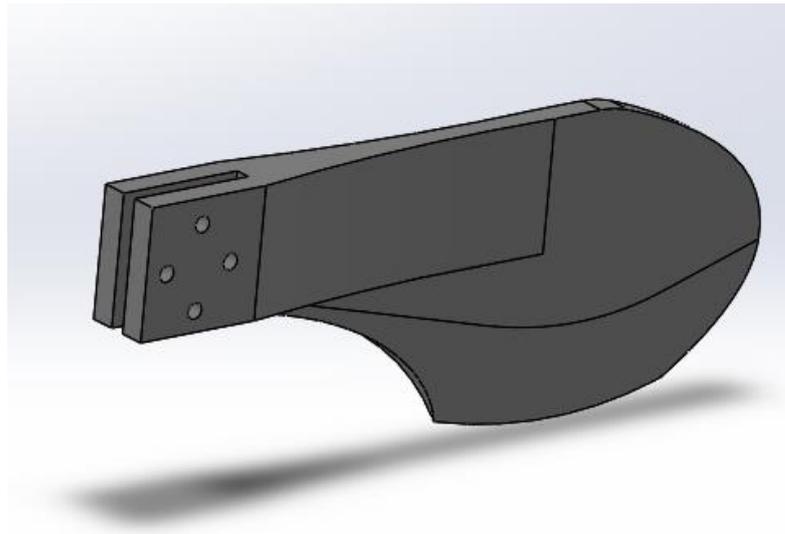


Figura 4.10 Aleta izquierda virtual.



Figura 4.11 Aleta izquierda real.

Culminado el diseño de cada pieza que conforma el prototipo se ensambló el robot animatrónico como se muestra en la figura 4.12.

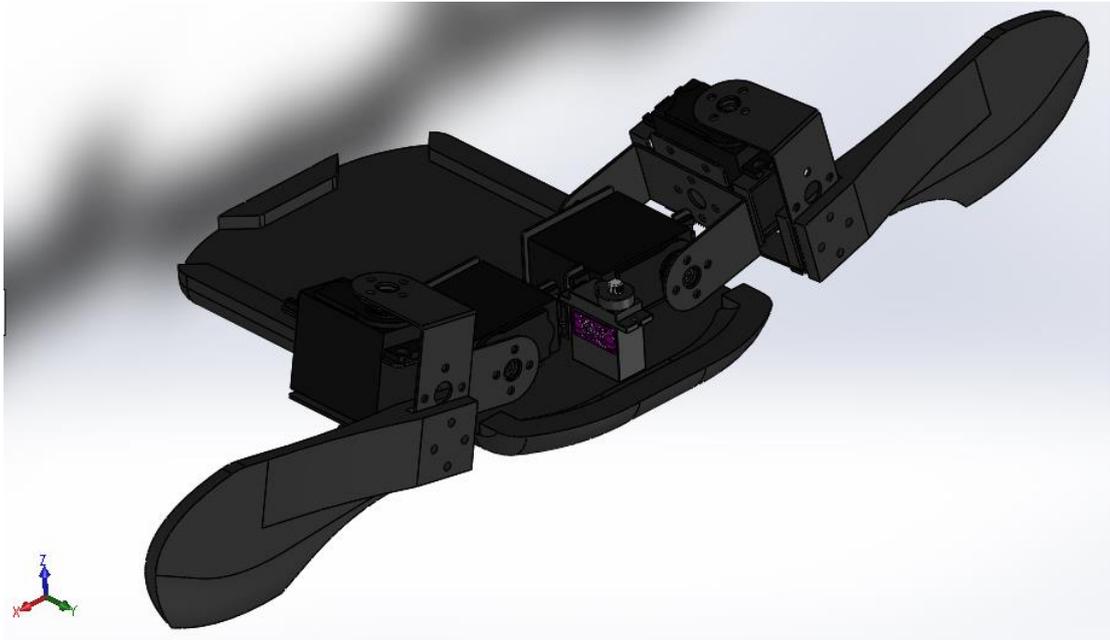


Figura 4.12 Ensamblaje final del prototipo en Software SolidWork.



Figura 4.13 Construcción del prototipo real.

4.1.4. SELECCIÓN DE MATERIALES

El prototipo robótico de la tortuga tiene varias partes fundamentales, las cuales fueron fabricadas y mecanizadas según la necesidad de la construcción, para esto la selección de los materiales para cada una de ellas, fue a partir de sus propiedades mecánicas.

La parte fundamental de todo el robot es la placa plastrón en la cual irán empernados los dos soportes principales de cada subsistema, para esto se eligió el material ABS por sus propiedades mecánicas, su peso ligero y por su maquinabilidad.

Tabla 4.4. Datos técnicos del material ABS.

PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS	
Alargamiento a la Rotura	45(%)
Coeficiente de Fricción	0,5u
Módulo de Tracción	2,1-2,4(GPa)
Resistencia a la Tracción	41-45(MPa)
Resistencia al Impacto Izod	200-400(J m ⁻¹)
Densidad	1,05(g cm ⁻³)

Para las sujeciones de los servos y las uniones se utilizó servo bracket tipo C y U los cuales fueron seleccionados gracias a su peso ligero de una aleación de aluminio.

Las aletas también fueron fabricadas a partir del material ABS cumpliendo las especificaciones mínimas del estudio de esfuerzos, el material fue elegido por sus propiedades mecánicas.

4.1.5. FLOTABILIDAD

La flotabilidad es la tendencia de un fluido para ejercer una fuerza de apoyo igual al peso desplazado sobre un cuerpo ya sea sumergido o flotando colocado en él.

La fuerza ejercida se conoce como fuerza boyante o flotante, la cual actúa verticalmente hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado y se le puede definir de manera matemática mediante el principio de Arquímedes.

$$F_B = \gamma_f V_d \quad [4.11]$$

Donde:

$F_B =$ Fuerza Flotante o boyante.

$\gamma_f =$ Peso específico del fluido.

$V_d =$ Volumen desplazado del fluido.

$$W = M_t * g \quad [4.12]$$

Donde:

$W =$ Peso del cuerpo.

$M_t =$ Masa total del cuerpo.

$g =$ gravedad.

Un cuerpo con peso específico promedio menor que el peso del fluido tenderá a flotar debido a que $W < F_b$ con el objeto sumergido.

Un cuerpo con peso específico promedio mayor que el peso del fluido tenderá a hundirse, debido a que $w > F_b$ con el objeto sumergido

La flotabilidad neutral se presenta cuando un cuerpo permanece en su posición inicial de sumergimiento en el fluido, y cuyo peso específico promedio sea igual al del fluido. (Puig J, 1994)

$$F_b = 9.51 \frac{kN}{m^3} * 0.0412754 m^3$$

$$F_B = 392,52 N$$

$$W = 0,9 KG * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$W = 8,82 N$$

Por lo tanto el prototipo de robot tortuga de peso igual 0,9 kg podrá flotar ya que:

$$w < F_b$$

4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

Finalizado el diseño mecánico y validado su funcionamiento, es necesario continuar con el diseño electrónico, el cual partirá del análisis de fuerzas de empuje previamente realizado en el diseño mecánico, el cual arrojará datos esenciales para la correcta selección de actuadores capaces de suplir los requisitos previos. La etapa fundamental del diseño electrónico una vez seleccionado los actuadores y la placa controladora es el suministro de energía necesaria para que el robot tenga una autonomía adecuada y el diseño de la interfaz de alimentación a cada actuador y la placa controladora.

4.2.1. SELECCIÓN DE ACTUADORES.

En el estudio de fuerzas y de esfuerzos que se realizó en el diseño mecánico otorgo el par del motor, las fuerzas de empuje y levantamiento necesario en cada articulación para realizar la locomoción en superficies de arena, la selección de los actuadores se realizó a partir de este estudio con un factor de seguridad del 1.5 por lo que se escogió el servo motor MG996r.

Tabla 4.5. Datos técnicos servo motor MG996r.

Datos	Unidades
Torque Máximo	9.4 kgf-cm (4.8 V), 11 kgf-cm (6 V)
Voltaje de operación	4.8 V a 7.2 V
Corriente de Consumo	500mA-900mA (6v)
Corriente Máxima	2000mA
Velocidad de operación	0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)

4.2.2. CÁLCULO DE CONSUMO DE CORRIENTE.

A partir de los datos técnicos antes expuestos, se procedió a calcular la corriente de consumo de cada servomotor y de todo el robot.

Para obtener la corriente de consumo de cada servo es necesario obtener la constante de torque del motor la cual se calcula:

$$kt = \frac{Tm}{Im} \quad [4.13]$$

Donde:

Kt = Constante del torque del motor.

Tm =Torque máximo.

Im =Corriente máxima.

$$kt = \frac{11 \text{ kgf.cm}}{2A}$$

$$kt = 5,5 \frac{\text{kgf.cm}}{A}$$

A partir de esta constante la cual indica cuanto torque es producido por cada amperio, calculamos la demanda de amperios de cada servomotor para producir el torque necesario antes calculado.

$$Ic = \frac{Ta}{Kt} \quad [4.14]$$

Donde:

Kt = Constante de torque de motor.

Ta =Torque demandado.

Ic =Corriente necesaria.

$$Ic = \frac{6 \text{ kgf.cm}}{5,5 \frac{\text{kgf.cm}}{A}}$$

$$Ic = 1.090 A$$

4.2.3. SELECCIÓN DE FUENTE DE ENERGÍA

Para conseguir que el prototipo del robot tortuga logre simular los patrones cíclicos de aleteo en locomoción sobre superficies granulares, se decidió utilizar cuatro servos antes especificados. Con el cálculo de corriente de consumo de estos cuatro actuadores se procedió a la selección de la fuente de energía la cual entregará autonomía necesaria para su desplazamiento.

La batería NIMH recargable fue escogida por: su bajo impacto al medio ambiente, por su capacidad de carga la cual es hasta tres veces más que las Ni-Cd, por su ciclo de carga el cual oscila entre 500 y 2000 cargas; y principalmente porque estas baterías se encuentran menos afectadas por el efecto memoria, en el que cada recarga se limita el voltaje o la capacidad.

Tabla 4.6. Datos técnicos batería.

Datos	Unidades
Tipo	Nickel Metal Hydride (NiMH)
Capacidad	5000 mah
Voltaje	6v
Configuración	Paquete 5-celulas
Dimensiones	L: 67,8 mm A: 40,6 mm H: 45,7 mm
Peso	362.9 gr.

4.2.4. DISEÑO INTERFAZ.

El diseño electrónico culmina con la etapa de diseño de la interfaz, dado que se seleccionó todos los actuadores y los controladores dimensionados. Para el diseño la interfaz fue necesario utilizar el software Proteus, el cual facilita la esquematización de la placa como se muestra en la figura 4.15.

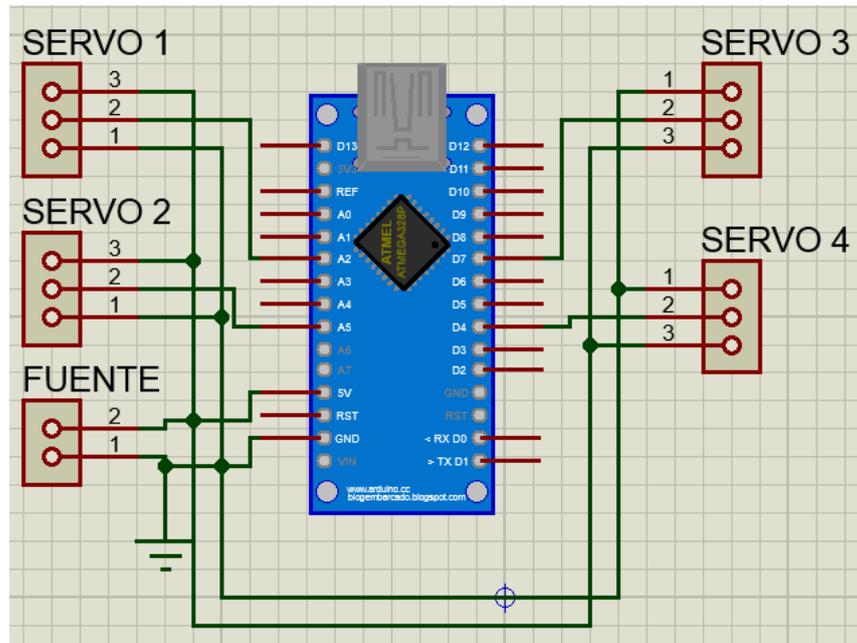


Figura 4.14 Esquematzación de la conexión.

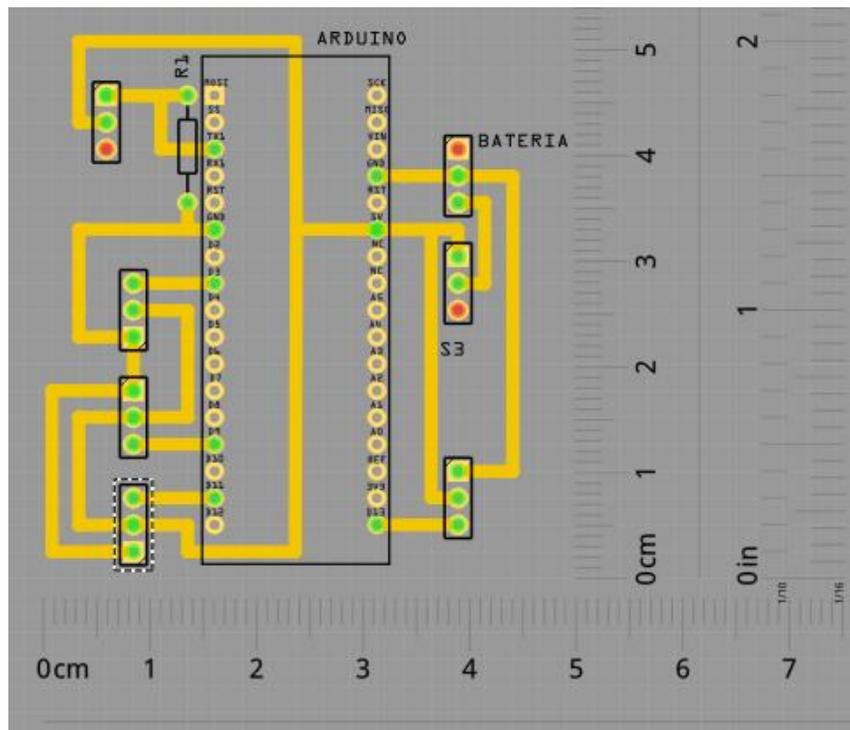


Figura 4.15 Placa de conexiones.

A partir de la finalización de la esquematización de conexión se puede diseñar la placa y sus conexiones en el software fritzing, para conocer sus dimensiones y su distribución.

La construcción de la placa de control del robot animatrónico se muestra en la figura 4.17, la cual fue considerada para cumplir con las medidas diseñadas para no interferir en la sinergia del producto mecatrónico.

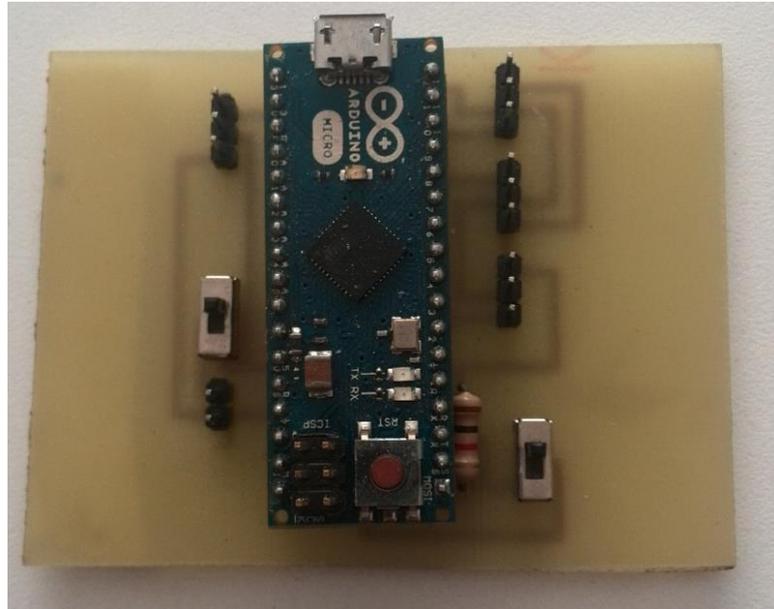


Figura 4.16 Placa impresa de control.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar el mecanismo de locomoción del prototipo de robot animatrónico fue necesario realizar varias pruebas las cuáles arrojaron datos concluyentes sobre la influencia de la configuración de los sistemas de aletas, y la condición química de la arena las cuales serán desarrolladas a lo largo de este capítulo. La validación del mecanismo se obtuvo mediante pruebas en dos configuraciones de marcha simétrica y asimétrica, y en dos tipos de arena las cuales fueron variadas en su estado físico: seco y húmedo.

Las pruebas se realizaron en una caja de pruebas con medidas: Largo 190 cm, ancho 60 cm y alto 15 cm, con un volumen de 0,171 metros cúbicos. La caja fue llenada con dos tipos de arena clasificadas por el tamaño de granos que están compuestas.



Figura 5.1 Caja de pruebas.

Para los ensayos en marcha simétrica es necesario describir la configuración de dicha marcha, la cual comprende de cuatro etapas denominadas: inserción, paso, oscilación, y retorno.

- Inserción: Los dos servo motores que forman parte de los sistemas proa-propa toman un ángulo de 0° con respecto al eje ortogonal, y los dos servo motores que forman parte de los sistemas arriba-abajo descienden para formar un ángulo de 90° .

- Paso: Los servo motores que forman los sistemas pro-popa giran las extremidades con ángulos finales de 90°.
- Oscilación: Las aletas que están controladas por el sistema arriba abajo toman un ángulo de 40° para dejar de rozar con la superficie de arena.
- Retorno: Los servos motores del sistema proa-popa, retornan hacia su posición inicial formando ángulo de 0° con su eje.

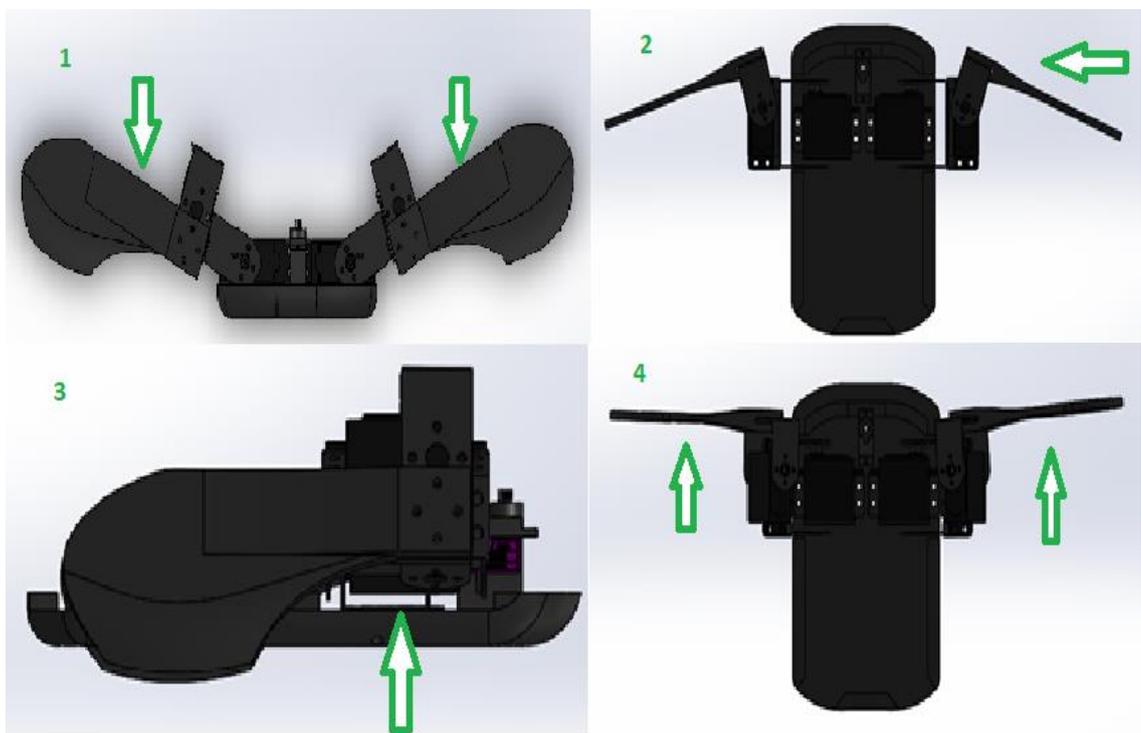


Figura 5.2 Etapas marcha simétrica.

5.1. PRUEBAS ARENA GRUESA

Las pruebas se realizaron primero con la arena gruesa la cual está compuesta con granos, los cuales presentan medidas de entre 1 mm hasta 2mm. Se modificó su estado físico, para realizar experimentos en su condición seca, así también en la húmeda.

5.1.1. ARENA GRUESA SECA

En esta clase de arena se realizaron experimentos en marcha simétrica para la obtención de datos, los cuales se ven reflejados en la tabla 5.1, estos experimentos otorgaron medidas esenciales de: tiempo utilizado en recorrer 190 cm, distancia recorrida por un ciclo de aleteo simétrico, y medida de la huella dejada en un ciclo.



Figura 5.3 Huella arena seca.

La cohesión y la compactación relativa son cualidades que se presentan en suelos, las cuales están estrictamente ligadas a su composición de partículas y a su condición química y física, la cohesión depende del tamaño de sus partículas ya que es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno; y la compactación relativa va ligada a procesos aplicados al suelo, esto quiere decir que la compactación relativa se presenta en suelos húmedos o en suelos mecanizados.

La generación de propulsión en superficies granulares mediante aletas, se debe a la fuerza de propulsión generada por cada aleteo sea mayor a la fuerza de rozamiento entre la arena y la superficie de la placa plastrón; la

propulsión se genera en dos de las cuatro etapas: en la etapa de inserción de la aleta, la cual desciende 3cm por debajo de la placa plastrón y en la etapa de paso en la cual la fuerza de empuje se presenta.

Las dos etapas empleadas a la generación de propulsión se verán afectadas directamente con la condición y las cualidades de la arena, las dos de ellas benefician o afectan por separado a las etapas; por ejemplo una cohesión baja del suelo afecta positivamente la etapa de inserción ya que la penetración es más profunda de la aleta pero en la etapa de paso la cohesión baja disminuye la fuerza de empuje, gracias a su poca fuerza de atracción molecular de sus partículas.



Figura 5.4 Medida de la Huella arena seca.

La marca de huella dejada por el aleteo simétrico obtenida en la caja de pruebas que se muestra en la figura 5.3, demuestra que las cualidades de la arena antes expuestas afectan en la perturbación de la arena, la cohesión baja permite que el suelo sea disperso y con mayor predisposición para dispersarse y su condición física seca hace que la compactación relativa

también sea baja permitiendo perturbaciones de arena con huellas mayores de 10 cm.

La medida de la perturbación del terreno se obtuvo mediante la medida del largo de la huella de un aleteo el cual se ve reflejado en la figura 5.4, los 10 cm de huella reflejados, se debe a la máxima penetración de la configuración del sistema arriba-abajo en la etapa de penetración la cual es 3cm por debajo de la placa plastrón, la cual muestra la mayor perturbación de arena en las etapas de inserción y de paso.

Tabla 5.1. Datos arena gruesa seca.

ARENA GRUESA SECA	
Distancia recorrida por un ciclo de aleteo simétrico.	10 cm.
Medida de la perturbación de la huella.	8 cm.
Tiempos de la marcha en 190 cm.	
T1	23,27 s.
T2	23,33 s.
T3	23,90 s.
T4	23,60 s.
T5	23,70 s.

5.1.2. ARENA GRUESA HÚMEDA

La arena gruesa húmeda presenta la misma cohesión que la arena gruesa seca ya que este fenómeno está ligado directamente con el tamaño de las partículas que la forman, pero gracias a su estado físico húmedo la cohesión

se ve remplazada por la compactación relativa la cual mejora y disminuye la perturbación del terreno como se muestra en la figura 5,5.

Esta cualidad del suelo beneficia a la locomoción en general pero la etapa de paso se ve influenciada positivamente ya que el torque no se dispersa en el movimiento de tierras, por lo contrario entrega su máximo valor a la fuerza de empuje, otra etapa que se ve influenciada es la de penetración, esta última negativamente ya que por su compactación relativa la penetración de la aleta se reduce a 2,5 cm.



Figura 5.5 Huella dejada arena gruesa húmeda.

La forma y la medida de las huellas se ven beneficiadas por la condición húmeda de la arena, como se muestra en la figura 5,5 la perturbación de la arena medida en la huella se reduce a la mitad, es decir 5 cm, esto beneficia claramente al torque y se ve reflejada en la tabla 5.2 en los datos de la

distancia de un ciclo de aleteo y en los tiempos utilizados al recorrer el circuito siendo los menores.



Figura 5.6 Medida Huella dejada arena gruesa húmeda.

Tabla 5.2. Datos arena gruesa húmeda.

ARENA GRUESA HÚMEDA	
Distancia recorrida por un ciclo de aleteo.	13 cm
Medida de la perturbación de la huella.	5 cm
Tiempos de la marcha en 190 cm	
T1	21,91 s
T2	22,03 s
T3	21,80 s
T4	22,15 s
T5	21,70 s

5.2. PRUEBAS ARENA FINA

Para simular el robot animatrónico en su estado natural se realizaron pruebas en arena fina, la cual simula y tiene las mismas partículas de las que contiene la arena de playa, las cuales presentan medidas de entre 0,25mm hasta 1 mm. En esta arena se realizó pruebas en su estado húmedo tanto como el seco en sus diferentes configuraciones de marcha simétrica y asimétrica.

5.2.1. ARENA FINA SECA

La arena fina seca presenta las condiciones más críticas de los experimentos realizados, a pesar de su cohesión alta la cual beneficia a la penetración, pero afecta mayoritariamente a la generación de empuje; la inexistencia de la compactación relativa hacen que la huella dejada mostrada en la figura 5.6 sea la más superficial de todas las arenas.



Figura 5.7 Huella dejada arena fina seca.

La alta cohesión de las arenas finas, perjudican la etapa de inserción la cual es la etapa fundamental de la propulsión, al dificultarse la penetración de la aleta en la superficie, la fuerza de empuje se ve afectada negativamente ya que la reacción de la arena se ve dispersada mayoritariamente en la perturbación de arena.



Figura 5.8 Medida Huella dejada arena gruesa húmeda.

La medida de la perturbación de la huella comparada con su par en el mismo estado físico se reduce en 25% lo cual beneficia a la disminución de la perturbación de la arena, pero la distancia recorrida por un ciclo de aleteo simétrico también se ve afectada en un 10%, gracias a la pérdida de penetración la huella y la perturbación disminuye pero a pesar de esto como se muestra en la tabla 5.3 la distancia de un aleteo y los tiempos se ven afectados ya que el empuje no recibe la reacción necesaria en la penetración del suelo fino seco.

Tabla 5.3. Datos arena fina seca.

ARENA FINA SECA	
DISTANCIA RECORRIDA POR UN CICLO DE ALETEO SIMÉTRICO	9 cm
MEDIDA DE LA PERTURBACIÓN DE LA HUELLA	6cm
TIEMPOS DE LA MARCHA EN 190 CM	
T1	25,24 s
T2	25,54 s
T3	25,77 s
T4	25, 30 s
T5	25,55 s

5.2.2. ARENA FINA HÚMEDA

La alta compactación relativa presente en la arena fina húmeda con su alta cohesión dibuja una huella totalmente diferente, comparada con las expuestas anteriormente, la perturbación del terreno se ve totalmente disminuida ya que la penetración mostrada es igual a la que se presenta en la arena gruesa húmeda, la cohesión alta propia de arenas finas contribuye para que la arena no se desplace y presente reacción a la fuerza de empuje.

La medida de la perturbación de la huella dibujada es la menor de todos los experimentos, la cual se muestra en la figura 5,9, es decir que la menor perturbación de arena se presenta como es lógico en el suelo que presenta la cohesión alta y la compactación relativa alta, pero al contrario de lo que se pueda concluir el tiempo y la distancia mostradas en la tabla 5.4 no muestran mayor eficiencia con respecto a sus pares anteriores.



Figura 5.9 Huella dejada arena fina seca.



Figura 5.10 Medida Huella dejada arena fina húmeda.

Tabla 5.4. Datos arena fina húmeda.

ARENA FINA HÚMEDA	
DISTANCIA RECORRIDA POR UN ALETEO	10 cm
MEDIDA DE LA HUELLA	4 cm
TIEMPOS RECORRIDO 190 CM	
T1	23,20 s
T2	23,69 s
T3	23,76 s
T4	23,33 s
T5	23,49 s

5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados anteriormente mostrados del rendimiento del robot animatrónico en cuatro superficies granulares con variación de dos de las cualidades y sus estados físicos, muestran la influencia en cada etapa de la marcha simétrica.

La comparación de los datos obtenidos permitió concluir acerca de cual de las dos etapas más importantes en la generación de propulsión afecta el rendimiento, la eficiencia y la eficacia; la cohesión y compactación relativa mostraran la parte crítica del aleteo y su influencia tanto así en la perturbación como en la pérdida de empuje.

Las velocidades de las cuatro marchas experimentadas se muestran en la figura 5.11, como se observa los cuatro experimentos realizados fueron hechos con dos tipos de arena, a las cuales se les modifico su estado físico, la arena gruesa húmeda muestra cinco velocidades superiores a las

anteriores, es decir que la compactación relativa beneficio a la locomoción y su cohesión menor a la de la arena fina no afecto su desempeño.

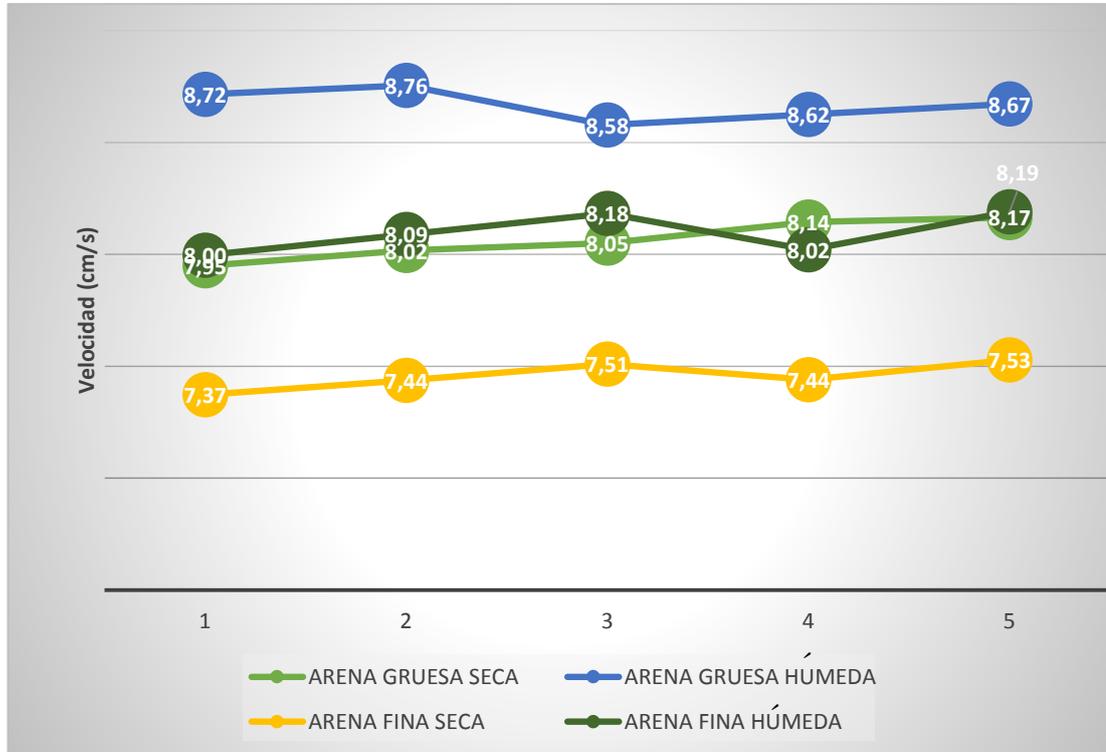


Figura 5.11 Grafica de las velocidades de las cuatro marchas.

La condición húmeda de la arena es más influyente en el fenómeno de la locomoción con aletas, como muestra la gráfica las arenas con estado físico húmedo son las más rápidas en comparación con sus pares en estado físico seco, la composición granular de las arenas, influye minoritariamente en el desempeño.

La grafica 5.12 demuestra que la locomoción por aletas está gobernada por cuatro datos influyentes en la marcha simétrica, la arena gruesa húmeda presenta los grupos de datos óptimos, la distancia recorrida por un ciclo de aleteo máximo se presenta en esta arena así también como la mínima perturbación, demostrando que la eficiencia de la locomoción depende y está más ligada a la condición de alta compactación y baja cohesión.

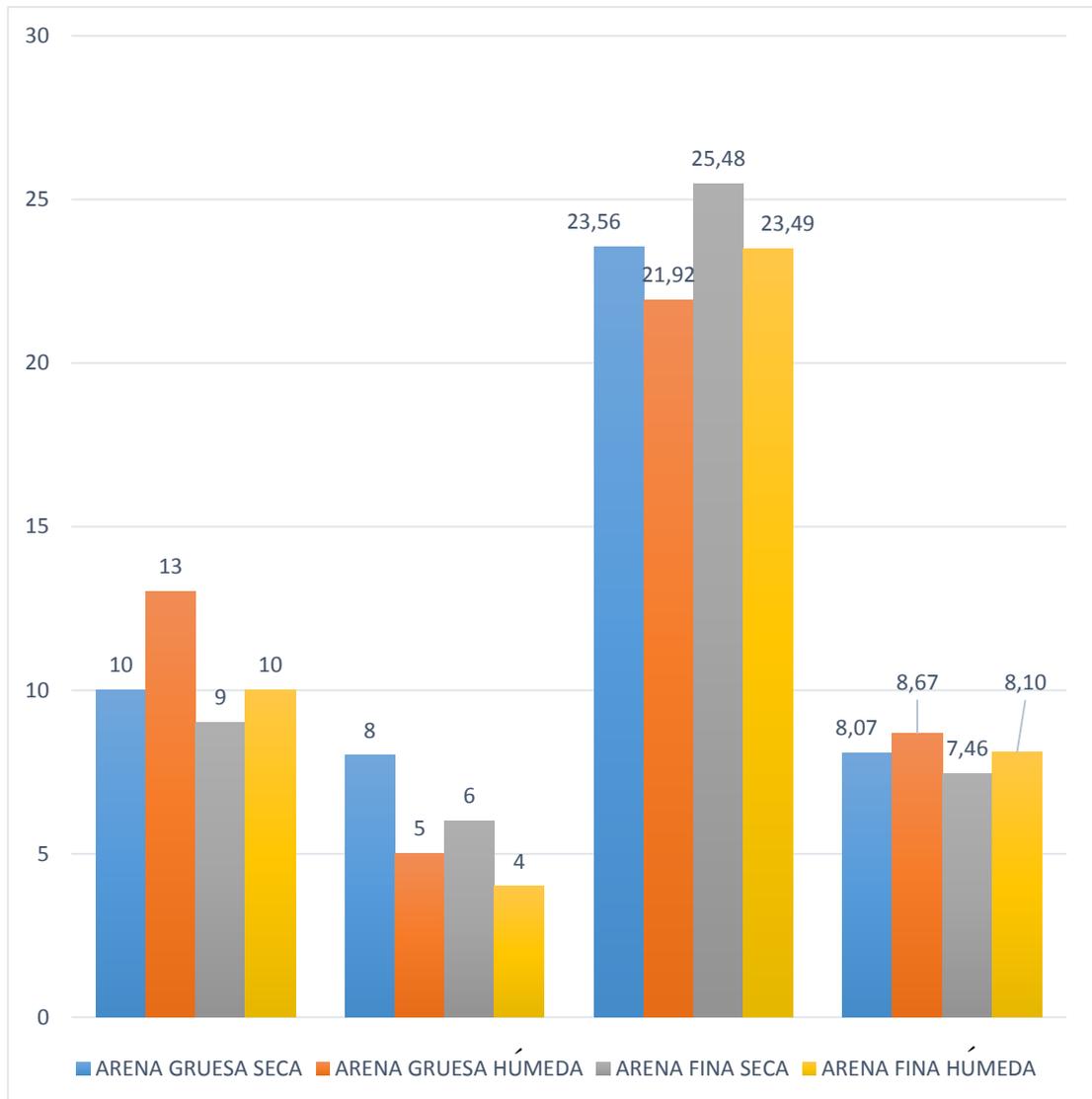


Figura 5.12 .Muestreo de datos.

5.4. MARCHA ASIMÉTRICA.

Las tortugas en su gran mayoría disponen de dos configuraciones de marcha, la simétrica para la locomoción en arena y la asimétrica para la locomoción acuática. Sin embargo algunas especies utiliza la marcha asimétrica en la locomoción terrestre, este uso de marcha va destinado a la dirección y giros en las superficies granulares.



Figura 5.13 Huella dejada por la marcha asimétrica.

Se realizó pruebas de esta marcha asimétrica la cual comprende el desfase del aleteo, un ciclo de aleteo asimétrico consta de la ejecución de dos etapas de cada subsistema de aletas, las cuatro etapas de la marcha simétrica se conservan pero cada subsistema ejecuta cada etapa por separado.

La huella mostrada en la figura 5.13 muestra baja perturbación de arena, pero la distancia recorrida por un ciclo de aleteo y los tiempos expuestos en la tabla 5,5 muestran que esta configuración de marcha no es eficiente en superficies terrestres.

Tabla 5.5. Datos de marcha asimétrica

MARCHA ASIMÉTRICA	
DISTANCIA RECORRIDA POR UN ALETEO	3 cm
MEDIDA DE LA HUELLA	3 cm
TIEMPOS RECORRIDO 190 CM	
T1	73,5 s
T2	83,17 s
T3	70,17 s
T4	77,20 s
T5	82,56 s

Las velocidades obtenidas en la marcha asimétrica dentro de la misma caja de pruebas muestran la pérdida de recursos implicados en la locomoción, los tiempos de la marcha asimétrica se ven aumentados hasta tres veces, con respecto a la simétrica, la velocidad se ve deteriorada gravemente disminuyendo en un 75% comparada con la menor velocidad de las marchas simétricas.

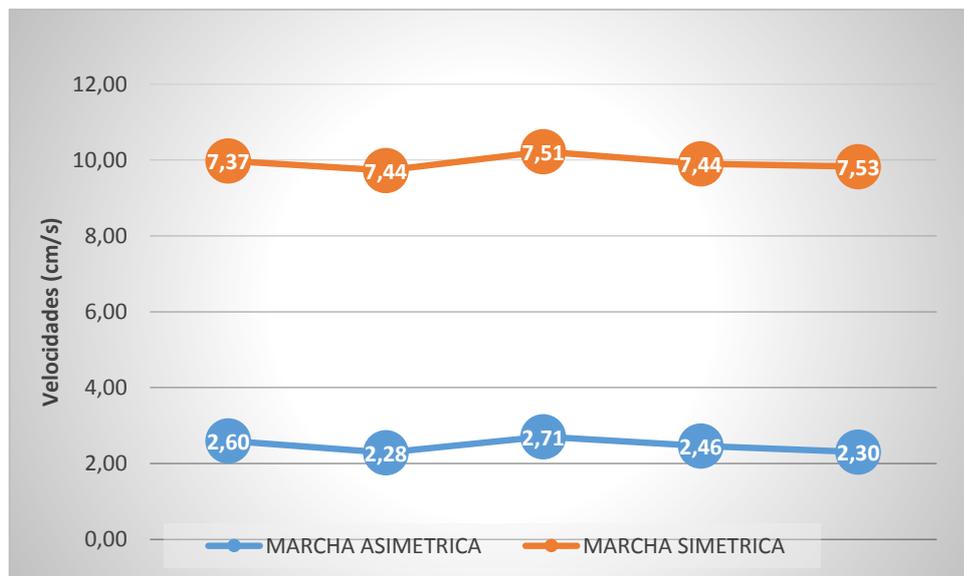


Figura 5.14 Grafica de las velocidades de las marchas simétrica y asimétrica.

5.5. VERIFICACIÓN DEL CONSUMO DE CORRIENTE

Como parte final de las pruebas es necesario verificar el cálculo de corriente previamente realizado en el capítulo de diseño, para esto mediante la herramienta del osciloscopio se midió la corriente de los servos con carga.

Los datos técnicos del fabricante presentan que la corriente máxima de consumo del servo TowerPro Mg996r sea de 2,5 A, esto ocurrirá solo cuando el servo motor se enclave, para nuestras necesidades de torque se calculó que la corriente rondaría el 1A por servo motor, mediante las pruebas realizadas con la pinza amperimétrica como se muestra en la figura 5.15, la corriente demanda por el motor para realizar las etapas es de 0.625 A.



Figura 5.15 Experimentos realizados con pinza amperimétrica.

Mediante la verificación de la corriente real demanda por los servomotores en carga es de 0,89 A se puede realizar un cálculo básico de la autonomía de la batería, siendo esta de capacidad de 5 Ah , el robot animatrónico tiene una autonomía de locomoción de 1 hora y media, resultando eficiente para cualquier tipo de aplicación futura del prototipo.

En la tabla 5.6 se muestran los cinco diferentes datos de corrientes del servo Mg996r, obtenidas experimentalmente, calculadas y verificadas a través de los datos del fabricante; principalmente la corriente calculada y la corriente real son las que determinaron la elección de la fuente de energía previamente analizada.

Tabla 5.6. Corrientes de funcionamiento.

Tipo de Trabajo del servo.	Corriente utilizada.
Corriente de funcionamiento	0,5 A – 0,6 A
Corriente de enclave	2.5 A
Corriente calculada	1 A
Corriente experimental	0,625 A
Corriente real	0,89 A

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

- La distancia superada por cada ciclo de aleteo simétrico debe ser superior a la medida de la perturbación de la huella del paso anterior, para que los ciclos de aleteos secuenciales no se vean afectados por la deformación del suelo.
- La locomoción es sensible a la profundidad de la inserción de la aleta, un pequeño descenso en la penetración a la superficie granular, reduce en gran medida el desplazamiento del ciclo de aleteo.
- Cuando las aletas interactúan con el suelo perturbado durante los pasos anteriores, ocasionan que la parte delantera del robot se incline hacia abajo, reduciendo el desplazamiento hasta convertirlo en nulo.
- La aplicación de aletas en lugar de patas, ruedas u otros accesorios, en la interacción con ambientes poco comunes, puede mejorar el rendimiento en la locomoción y el uso de recursos.
- Los sistemas aletas pueden ser un modelo para los futuros robots multi-terrenos, capaces de nadar y ejecutar la utilización eficaz del mismo sistema de arrastre para ambos medios.
- El uso de los medios granulares para la interacción con aletas, revelaron las propiedades mecánicas esenciales en el rendimiento de la locomoción, los cuales pueden dar una idea en otros materiales más complejos y poco estudiados como el barro, arena mojada, grava y nieve.
- La cohesión de la superficie granular interactúa principalmente en la etapa de inserción de la aleta, una baja cohesión mejora la medida de la profundidad de la aleta provocando un pequeño levantamiento del robot reduciendo el rozamiento.
- La compactación del suelo influye directamente en la etapa de generación de fuerzas de empuje, la compactación alta reduce la pérdida de torques y de recursos, mejorando la velocidad de los ciclos de aleteo simétricos.
- La deficiencia de la locomoción en superficies granulares ocurre cuando las fuerzas de empuje realizadas por los sistemas de aletas, no logran

superar a la fuerza de rozamiento, y esto se presenta cuando el ángulo de inclinación de la parte delantera del robot no supera el cero provocando mayor rozamiento e incluso el hundimiento en la superficie.

- El aparato locomotor aletas adaptado a la locomoción terrestre difiere fundamentalmente en su función, durante la marcha terrestre las extremidades deben generar dos fuerzas, fuerza de empuje para avanzar y fuerza de levantamiento para contrarrestar con la gravedad, mientras que en la locomoción acuática el agua soporta el cuerpo y las fuerzas de propulsión derivan enteramente de las extremidades.

RECOMENDACIONES.

- Los motores que forman los dos sistemas de aletas deben estar regulados correctamente en los mismos ángulos de partida, para no ocasionar giros inesperados.
- El ángulo de profundidad preestablecido debe ser fijado correctamente para no deteriorar la placa plastrón.
- El peso del robot puede ser reducido si se diseña y construye los anclajes y las uniones de los servos a partir del material ABS en una impresora 3d.
- En el diseño de la placa electrónica se puede introducir un contralor para variar la velocidad de retraso de la ejecución de los grados en los servomotores.
- Los valores de los ángulos que toman los servomotores y el valor de la corriente que demandan cada servomotor dentro de las cuatro etapas de la marcha simétrica deberían ser enviados y registrados en un dispositivo.
- La placa controladora y los cables de señal del servo motor deben ir por encima del nivel de la placa plastrón, para evitar el contacto con la arena húmeda y producir corto circuito.
- La selección de la fuente de batería siempre debe estar considerada a partir del consumo de corriente máxima proporcionada por el fabricante.
- Para no ocasionar daños irreparables en la batería se debe escoger en función de su máxima tasa de descarga, es decir basado en el máximo consumo previsto agregando un factor de seguridad del 50%.

BIBLIOGRAFÍA

- ARDUINO CC. (s.f.). Recuperado el 20 de 02 de 2015, de Arduino Micro: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMicro>
- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcobo.
- BioEnciclopedia*. (2015). Obtenido de Tortuga Marina: <http://bioenciclopedia.com/tortuga-marina/>
- C. Ross Ethier, C. A. (2007). *Introductory Biomechanics: From Cells to Organisms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Davinia Font, M. T. (12 de 11 de 2011). *Sensors*. Recuperado el 09 de 02 de 2015, de <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/12/11168/htm>
- Devdas Sheety, R. A. (2011). *Mechatronics System Design*. Stamford: CENGAGE Learning.
- Dibujos imagenes biologia y mas*. (21 de Octubre de 2011). Recuperado el 22 de Septiembre de 2014, de <http://biologiafotosdibujosimagenes.blogspot.com/2011/10/lobulos-del-cerebro-humano.html>
- Gutiérrez, M. A. (2000). *Biomecánica: la física y la fisiología*. Madrid: CSIC.
- Huston, R. L. (2009). *Principles of Biomechanics*. London: CRC Press.
- IndoHeli*. (s.f.). Recuperado el 20 de 02 de 2015, de TowerPro: http://www.indoheli.com/towerpro-mg90s-metal-gear-micro-servo.html#.VOeH__m-9ic
- Jacko, J. A. (2011). *Human-Computer Interaction*. Orlando: Springer Science & Business Media.
- Joseph Hamill, K. M. (2006). *Biomechanical Basis of Human Movement*. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.
- Knudson, D. (2007). *Fundamentals of Biomechanics*. Chico: Springer Science & Business Media.
- Lozoya, J. (06 de Julio de 2013). *Suite101*. Recuperado el 03 de Febrero de 2015, de Naturalez y Animales: <http://suite101.net/article/reptiles-caracteristicas-tipos-reproduccion-y-clasificacion-a83038#.VNE3qWi-9ic>

- Marquez, R. (1996). *LAS TORTUGAS MARINAS Y NUESTRO TIEMPO*. Mexico D.F.: D.R.
- Miller, C. H. (2014). *Digital Storytelling*. Burlington: Focas Press.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de maquinas*. Mexico: PEARSON.
- Nihat Özkaya, M. N. (2012). *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation*. New York: Springer Science & Business Media.
- Peter L. Lutz, J. A. (1996). *The Biology of Sea Turtles*. Boca Raton: CRC Press .
- Popovic, M. B. (2013). *Biomechanics and Robotics*. Boca Raton: CRC Press.
- Puig, J. O. (1994). *Teoría del buque. Flotabilidad y estabilidad*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Rios, S. (1995). *Modelizacion*. España: Alianza Universidad.
- Storyboard. (18 de Junio de 2013). *The Walt Disney Museum*. Recuperado el 11 de 02 de 2015, de The Early Days of Audio-Animatronics: <http://www.waltdisney.org/storyboard/early-days-audio-animatronics%C2%A9>
- Trejo, M. H. (2014). *CIATEC*. Recuperado el 02 de febrero de 2015, de Biomecanica : <http://www.ciatec.mx/laboratorios/biomecanica/>
- Triana, J. C. (s.f.). *Universidad de los Andes Colombia*. Recuperado el 02 de febrero de 2015, de Departamento de Ingenieria Biomedica: <https://ingbiomedica.uniandes.edu.co/index.php/departamento/areas-departamento/biomecanica>
- Victor. (s.f.). *UNAM*. Recuperado el 05 de Febrero de 2015, de MATCUER: http://www.matcuer.unam.mx/~victor/Sistemas/modelado_sistemas_dinamicos.pdf
- Wyneken, J. (Mayo de 2004). *SEFSC*. Recuperado el 03 de Febrero de 2015, de La anatomia de las tortugas marinas: http://www.sefsc.noaa.gov/turtles/TM_470_Wyneken_spanish.pdf

ANEXOS

ANEXO 1
PLANOS MECÁNICOS

1

2

3

4

5

6

7

8

A

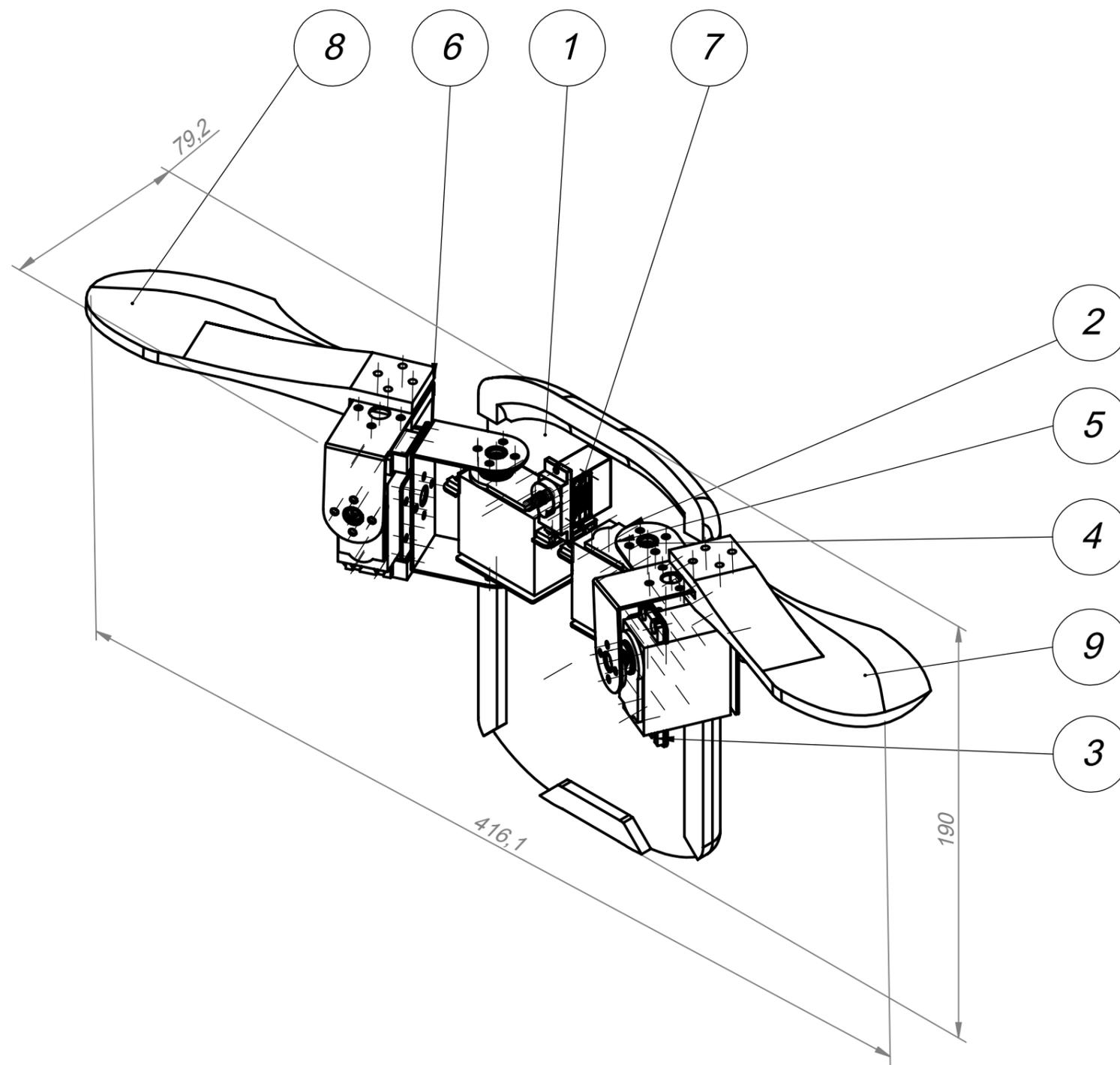
B

C

D

E

F

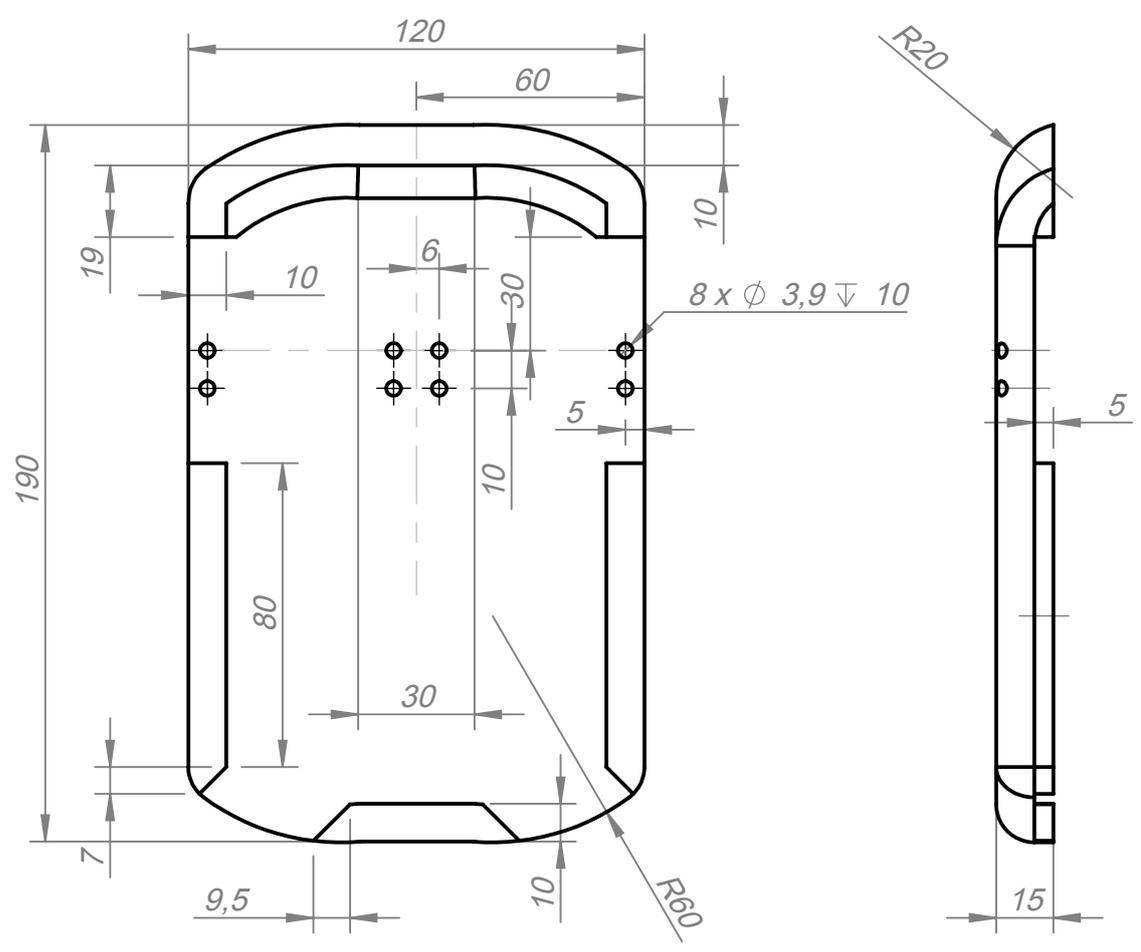


N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	CANTIDAD
1	PLACA PLASTRON	1
2	BRACKET J	4
3	SERVO ALETAS	4
4	JUNTA	4
5	BRACKET U	2
6	BRACKET U M	2
7	SERVO CABEZA	1
8	ALETA IZQUIERDA	1
9	ALETA DERECHA	1

				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1			
				Fecha	Nombre	ENSAMBLAJE ESCALA: 1:2	
				Dibujado 03/09/2015			
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE 		PLANO PRINCIPAL 001	A3
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1 2 3 4

A
B
C
D
E



		TOLERANCIA:		PESO [Kg]:		MATERIAL:	
		± 0.1				ABS	
		Fecha		Nombre		PLACA PLASTRON	
		Dibujado 03/09/2015					
		Revisado					
		Aprobado					
		FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:		ESCALA:	
		UTE		PLANO 101		1:2	
		UTE				HOJA:	
						A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

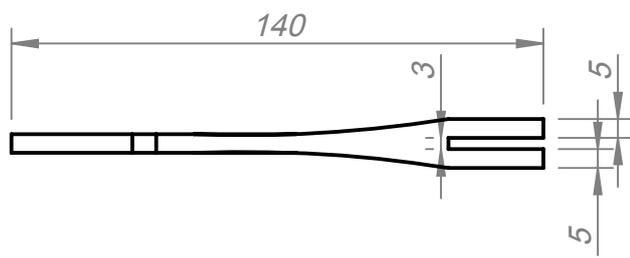
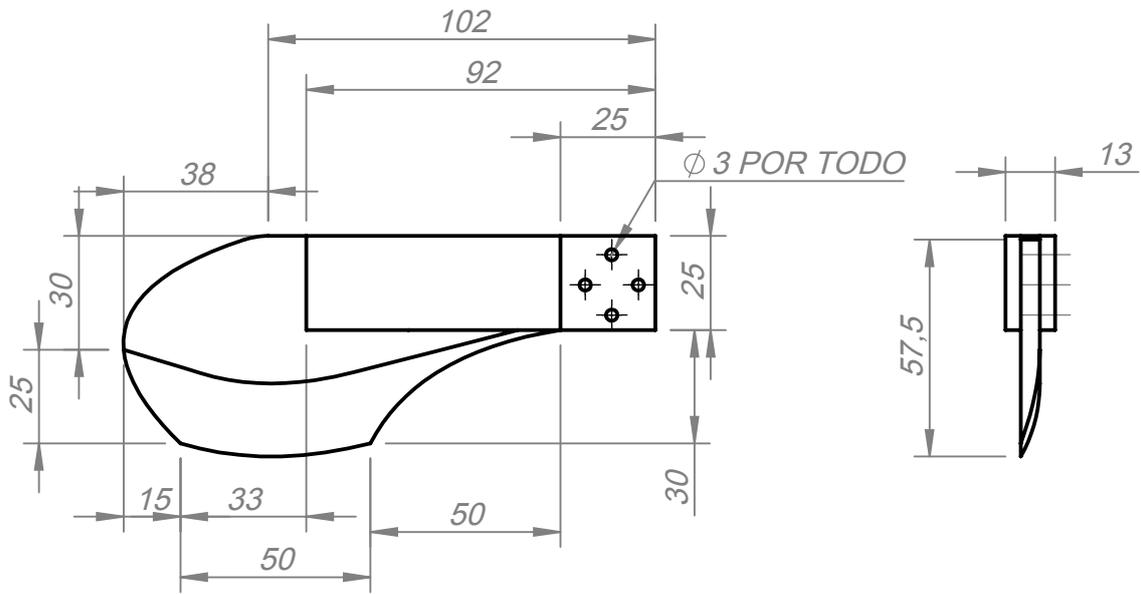
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [Kg]:	MATERIAL: ABS	
						<h1>ALETA</h1>	ESCALA: 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dibujado 03/09/2015			
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO N°: PLANO 102	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

ANEXO 2

ESPECIFICACIONES BATERIA

FEATURES

Cells connected with the latest Quad Welding technology for superior strength and optimum power

Delivers maximum punch and run time for demanding R/C racers

Venom Universal Four Plug System allows connectivity between today's four most common battery plugs, Tamiya, Traxxas, Deans and EC3, simply attach desired plug to Venom plug on battery's wire leads

INCLUDES

Venom-Racing 7.2V 5000mAh NiMH Stick Battery pack with Tamiya, Traxxas, Deans and EC3 Plugs

REQUIREMENTS

Charger capable of charging NiMH batteries, such as the Duratrax Intellipeak series or the Great Planes Triton series

SPECIFICATIONS

Length: 5.39" (137mm)

Width: 1.77" (45mm)

Thickness: .94" (23.9mm)

Weight: 14.4 oz (408g)

jxs 6/19/07

ir/jxs

updt jxs 4/13/10

updated tlc 7/2/14