

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Rediseño mecánico y fabricación de BART (Bio-inspired Aquatic Robot) a prueba de filtraciones.

Trabajo de graduación presentado por René Adrián Martínez Girón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Rediseño mecánico y fabricación de BART (Bio-inspired
Aquatic Robot) a prueba de filtraciones.**

Trabajo de graduación presentado por René Adrián Martínez Girón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,


2020

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Miguel Zea

(f) 
MAEB. Pablo Mazariegos

(f) 
MSc. Renato Conedera

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de Enero del 2021.

La elaboración de la presente tesis surgió del interés personal de diseño en 3D, fabricación y prototipado. Durante el transcurso de mi licenciatura, siempre mostré un especial interés en la fabricación de hardware, y en el diseño 3D. Trabajar en el diseño mecánico de un hardware que interactúa directamente con el agua es un desafío que llamó mi atención.

Se recomienda al lector leer las tesis de las fases anteriores, no es un requerimiento para entender este documento, pero si una gran ayuda para el contexto del mismo.

Este trabajo no hubiera sido posible de no ser por mi familia y amigos. A mi padre Marco Tulio Martínez y a mi madre Marta Lilian Girón, les agradezco el siempre apoyarme emocional y económicamente, a mi hermana Marlyn Martínez, por confiar y darme los ánimos de continuar. A mi amigo Kurt Kellner, por darme la oportunidad de trabajar con él y aprender tanto. A Pablo Mazariegos por siempre estar dispuesto a ayudarme a fabricar algo. A Estuardo Mancio por ayudarme a poner mis ideas en orden cuando mi cabeza no me lo permitía. A Miguel Zea por guiarme en la redacción de este documento, y en el diseño de BART.

Prefacio	V
Lista de figuras	X
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
7. Materiales y equipo	25
7.1. Impresora FDM	25
7.1.1. Especificaciones	26
7.1.2. Materiales	26
7.1.3. Software	26
7.2. Impresora SLA	26
7.2.1. Especificaciones	27
7.2.2. Materiales	27
7.2.3. Software	28

8. Metodología general	29
8.1. Diseño	30
8.2. Slicer	32
8.2.1. Configuraciones en FDM	33
8.2.2. Configuraciones en SLA	33
8.3. Piezas impresas	33
8.4. Pruebas de mecanismo a prueba de filtraciones	33
9. Diseño mecánico	35
9.1. Mecanismo a prueba de filtraciones	35
9.1.1. Fases previas	35
9.1.2. Diseño del mecanismo a prueba de filtración	37
9.1.3. Fabricación de las piezas de prueba	38
9.1.4. Implementación de la prueba	39
9.1.5. Recapitulación	42
9.2. Mecanismo de transmisión de potencia	42
9.2.1. Fabricación de los engranajes	44
9.2.2. Diseño del banco de pruebas	45
9.2.3. Fabricación del banco de prueba	46
9.2.4. Recapitulación	47
10. Validación de diseño hidrodinámico	49
10.1. Análisis de presión	50
10.2. Análisis de velocidad	50
10.3. Coeficiente de arrastre	53
10.4. Recapitulación	54
11. Diseño y fabricación del casco	55
11.1. Primera iteración del casco	56
11.1.1. Diseño	57
11.1.2. Fabricación	59
11.1.3. Recapitulación	61
11.2. Segunda iteración del casco	62
11.2.1. Diseño de la segunda iteración	63
11.2.2. Fabricación de la segunda iteración	65
11.2.3. Recapitulación	68
12. Conclusiones	69
13. Recomendaciones	71
14. Bibliografía	73
15. Glosario	75

Lista de figuras

1.	Simulación de la trayectoria deseada del mecanismo [1]	4
2.	Primer mecanismo ensamblado en BART [1]	4
3.	Propuesta diseño con pata en la parte inferior del casco [2]	5
4.	Geometría del casco [2]	5
5.	Piezas de prueba para O-rings[2]	5
6.	Caja de relleno. [4]	13
7.	Caja de relleno en chorros. [5]	14
8.	Anatomía de una impresora 3D FDM [6]	15
9.	Proceso de impresión SLA [6]	16
10.	Materiales comunes para impresoras FDM	17
11.	Escala de dureza de Shore [8]	18
12.	Proceso de modelado en sólidos [12]	19
13.	Proceso de modelado en mallas	19
14.	Corte virtual a un modelo 3D en capas 2D [14]	20
15.	Flujo laminar [17]	21
16.	Engranés cónicos rectos[18]	22
17.	Engranés cónicos Helicoidales[18]	23
18.	Impresora FDM - CATZ	25
19.	Impresora SLA - Elegoo MARS[20]	27
20.	Objeto no euclidiano[12]	30
21.	Bordes limítrofes[12]	31
22.	Caras entrelazadas[12]	31
23.	Diseño a prueba de filtración - Fase 1 BART	36
24.	Diseño a prueba de filtración - Fase 2 BART	36
25.	Motores verticales y casco rectangular - fase 2 BART.	37
26.	Representación del diseño de pruebas	38
27.	Prueba del mecanismo a prueba de filtración.	38
28.	Pieza de prueba sumergida bajo agua.	39
29.	Resultado de pieza 1 antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar trata- miento	40

30.	Resultado de pieza 2	41
31.	Resultado de pieza 3.	41
32.	Engranajes fase 1.	42
33.	Diseño 2D engranajes	43
34.	Diseño 3D engranajes	43
35.	Diseño 3D engranajes forma helicoidal.	44
36.	Primera versión de engranajes.	45
37.	Diseño de la segunda iteración del banco de pruebas.	45
38.	Primer banco de prueba para engranajes y motor.	46
39.	Segundo banco de prueba para engranajes y motor.	47
40.	Cuerpo simulado en Fluent para obtener coeficientes de arrastre en fase 1.	49
41.	Simulación de presión de un flujo laminar a 10m/s.	50
42.	Simulación de patas extendidas en flujo laminar de 10m/s.	51
43.	Simulación de patas flexionadas en flujo laminar de 10m/s.	52
44.	Coefficiente de arrastre, patas extendidas en flujo laminar de 10m/s.	53
45.	Coefficiente de arrastre, patas flexionadas en flujo laminar de 10m/s.	53
46.	Casco impreso en FDM con material PLA de la fase 1.	55
47.	Casco rectangular utilizado en la fase 2.	56
48.	Casco BART iteración 1.	57
49.	Diseño de la pata en la fase 2.	58
50.	Ensamble de patas BART iteración 1.	58
51.	Patas ensambladas en la iteración 1 del casco.	59
52.	Tolerancia cojinete	60
53.	Eje rotacional fabricado.	60
54.	Problemas con los engranajes.	61
55.	Cojinetes en las articulaciones de las patas.	62
56.	Ensamble de la pata.	62
57.	Modificación a engranajes.	63
58.	Ajustes al casco, iteración 1 izquierda, iteración 2 derecha	64
59.	Compartimiento batería.	64
60.	Diseño modular.	65
61.	Casco iteración 2.	66
62.	Tuercas insertadas con calor.	67
63.	Movimiento de la pata.	68

Lista de cuadros

1.	Ejemplo de organización de datos.	33
2.	Resultados de pruebas.	40
3.	Piezas banco de prueba	46
4.	Piezas casco iteración 1.	59
5.	Piezas utilizadas para la segunda iteración del casco.	66

Entre el año 2016 y 2017 se dio origen al proyecto BART (Bio-Inspired Aquatic Robot) que nace en la Universidad del Valle de Guatemala, teniendo como objetivo crear una plataforma robótica bio-inspirada en el escarabajo Gyrinidae[1], el cual puede nadar de forma rápida en la superficie del agua e incluso zambullirse. Su nado está catalogado como uno de los más eficientes. En la primera fase se obtuvo una plataforma capaz de simular el nado del escarabajo y se logró su implementación de su sistema de control. Sin embargo, el robot no fue capaz de nadar por un tiempo prolongado sin que el agua se filtrara dentro del casco.

El proyecto se continuó en una segunda fase en el año 2018, donde el enfoque principal fue el de obtener una plataforma a prueba de filtraciones, en el mismo se logró incrementar el tiempo en el que podía estar en el agua. Sin embargo, el mecanismo de transmisión de potencia necesitó demasiada fuerza por parte de los motores para poder funcionar. Esta fase dejó varias interrogantes entre las cuales está la de explorar distintos materiales para poder hacer el robot sumergible y la de tener en cuenta las tolerancias de las piezas.

Este trabajo explora distintos materiales para el rediseño del caso, así como otras opciones para evitar filtraciones de agua dentro del casco del robot. Entre estas opciones nos basaremos en la tecnología utilizada en botes de escala real y de radio control. Dicha tecnología fue adaptada al proceso de fabricación de las impresoras 3D.

Between 2016 and 2017 BART (Bio-Inspired Aquatic Robot) project was born at the Universidad del Valle de Guatemala, with the objective of creating a robotic platform bio-inspired by the Gyrinidae beetle [1], which can swim quickly on the surface of the water and even dive, his swim is listed as one of the most efficient. In the first phase, a platform capable of simulating the beetle's swimming was obtained and its control system was implemented. However, the robot was not able to swim for a long time without water seeping into the hull.

The project was continued in a second phase in 2018, where the main focus was to obtain a leak-proof platform, in which it was possible to increase the time it could be in the water. However, the power transmission mechanism required too much force from the motors in order to function. This phase left several questions, among which is to explore different materials to make the robot submersible and to take into account the tolerances of the parts.

This work explores different materials for the redesign of the case, as well as other options to avoid water leaks inside the robot's helmet. Among these options we will base ourselves on the technology used in full-scale and radio-controlled boats. This technology was adapted to the manufacturing process of 3D printers.

El proyecto consistió del diseño y fabricación de un chasis para BART a prueba de filtraciones de agua y de un mecanismo de transferencia de potencia que permita a los actuadores interactuar con el medio líquido evitando filtraciones, se planeó realizar el estudio sobre dos materiales distintos, PLA impreso con tecnología FDM y resina fotocurable impresa con tecnología SLA. Los diseños fueron modelados, luego fabricados, puestos a prueba, y de ser necesario, repetir el proceso.

Se modeló el mecanismo de transferencia de potencia basándose en el que utilizan los botes a control remoto, el cual consta de un cilindro relleno de grasa el cual evita que se filtre agua sin cargar a los actuadores con mucha resistencia. La primer fase consta de hacer pruebas de dicho mecanismo en ambos materiales propuestos con diferentes características de impresión y tratamientos posteriores al material (cubiertas de barniz, pintura, sellador, etc). Las siguientes fases constan ya de diseñar el primer prototipo, para lo que se definirá que materiales, motores, cojinetes, etc. deben ser utilizados.

2.1 Megaproyecto BART

BART (Bioinspired Aquatic RoboT) es una plataforma robótica que incorpora un mecanismo innovador de propulsión inspirado en las extremidades de los escarabajos de la familia Gyrinidae.[1] BART ha sido desarrollado en dos fases en los años anteriores, en la primera fase se modelaron y fabricaron las patas del robot como un mecanismo de cuatro barras capaz de generar un movimiento similar al del escarabajo de la familia Gyrinidae, mientras que en la segunda fase se buscó mejorar las tolerancias del mecanismo de transmisión de potencia.

Se modeló y fabricó un mecanismo de cuatro barras para el movimiento de las extremidades, se desea un movimiento alternante deseado de una pata.

En el año 2017 se realizó el primer prototipo utilizando juntas tóricas como mecanismo de transmisión de potencia para evitar las filtraciones. Las juntas tóricas fueron fabricadas por medio de moldes y se caracterizaron por tener una forma circular con sección anular radial. [2]

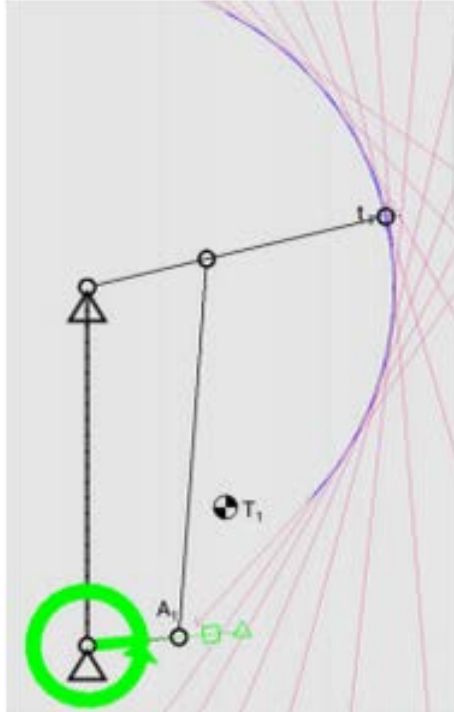


Figura 1: Simulación de la trayectoria deseada del mecanismo [1]

En el trabajo realizado en BART en el año 2018 se trató de diseñar un movimiento omnidireccional basado en los resultados de estudios previos. Con esto se diseñó un nuevo modelo capaz de desplazarse en el plano xy . [2]



Figura 2: Primer mecanismo ensamblado en BART [1]

Se realizaron pruebas preliminares en PLA con tecnología FDM con una impresora Ultimaker 3 y en resina en una impresora Object 30 Prime [2]

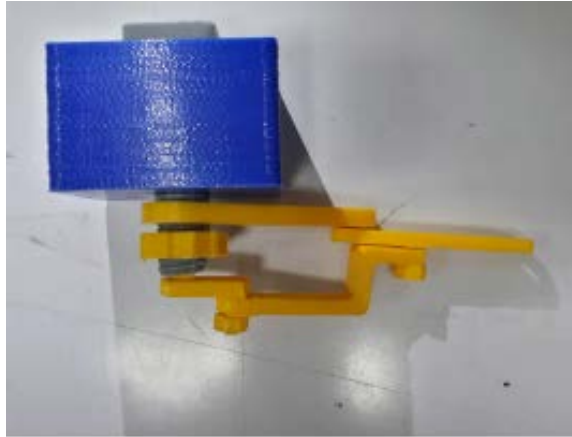


Figura 3: Propuesta diseño con pata en la parte inferior del casco [2]

Se probaron distintas geometrías para el diseño del casco, obteniendo que la combinación de la geometría totalmente curva con el modelo bio-inspirado fue el prototipo que tuvo los mejores resultados presentando mayor velocidad y aceleración.[2]

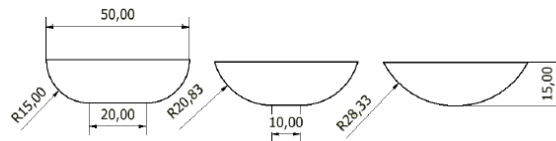


Figura 4: Geometría del casco [2]

Como mecanismo para evitar filtraciones se utilizó un sello con 0-rings, el cual no fue eficiente, genera mucha fricción y no logra evitar que se filtre el agua.

Luego de varias pruebas el sello agregó mucha fricción al mecanismo de propulsión y el motor utilizado no tenía el torque necesario para mover el eje; esto generó otro problema ya que no sería eficiente utilizar motores más potentes debido a que BART funcionaba con baterías.

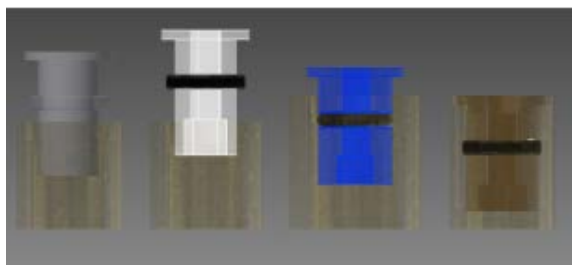


Figura 5: Piezas de prueba para O-rings[2]

Un robot de nado superficial puede utilizarse para exploración de cuerpos de agua o vida acuática de una manera no invasiva en el ecosistema. BART estimularía la investigación y avance tecnológico en Guatemala, esto debido a que se puede fabricar con recursos accesibles y de bajo costo. Por otra parte es un proyecto innovador, no existen proyectos similares en curso en Guatemala y, a nivel internacional, se hace muy poco trabajo con robots móviles acuáticos.

Desde el punto de vista de diseño y fabricación es un desafío el poder exponer un robot fabricado con impresoras 3D y piezas mecánicas, a un ambiente acuático.

Se busca un mecanismo más eficiente que los O-rings para la transmisión de potencia y para evitar filtraciones en el casco, ya que el sistema de O-rings genera demasiada fricción y no soluciona por completo el problema principal de las filtraciones.

4.1 Objetivo general

Diseñar y fabricar el chasis de BART (Bio-inspired Aquatic RoboT) para evitar filtraciones de agua.

4.2 Objetivos específicos

- Implementar un mecanismo que presente una transmisión de potencia eficiente, y que sea manufacturable en impresión 3D con fácil reproducibilidad.
- Definir que material y tratamiento al material es el más adecuado (PLA en FDM vs Resina en SLA).

Este proyecto fue realizado durante la pandemia de COVID-19, por lo que las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, así como talleres de terceros se encuentran cerrados. Los material y suplementos necesarios son escasos y las importaciones pueden tardar meses.

Gracias a que el autor posee instalaciones y maquinaria necesaria para el diseño y fabricación, esto no imposibilitó por completo el proyecto. Sin embargo aún existieron retrasos en la entrega de materiales.

Este proyecto no tratará la parte electrónica y de control de BART, esto se detalla en el trabajo “BART: Diseño de controladores de un robot acuático bio-inspirado de nado superficial” por Josué David del Cid Ramírez.

6.1 Caja de relleno

En un barco que tiene un motor interno que gira un eje conectado a una hélice externa, dicho eje pasa a través de una caja de relleno. La caja de relleno evita que el agua entre en el casco del barco. La “caja” es un conjunto cilíndrico, típicamente de bronce, que comprende un mango roscado en un extremo para conectar tuercas de ajuste y bloqueo. [3]

Una caja de relleno consiste de la sección de una porción de un rotor en el cual está confinado un fluido bajo presión. [4] Se utiliza grasa como el fluido este evitaría que el agua ingrese a la estructura o mecanismo interior.

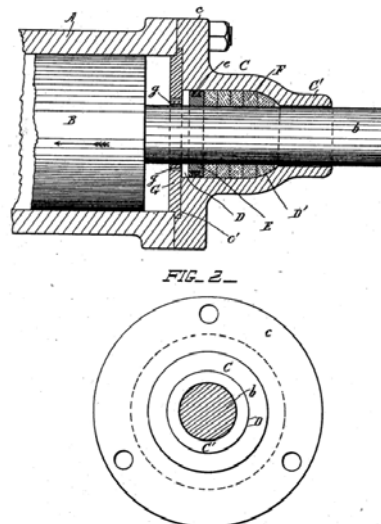


Figura 6: Caja de relleno. [4]

Pueden encontrarse en chorros de agua.

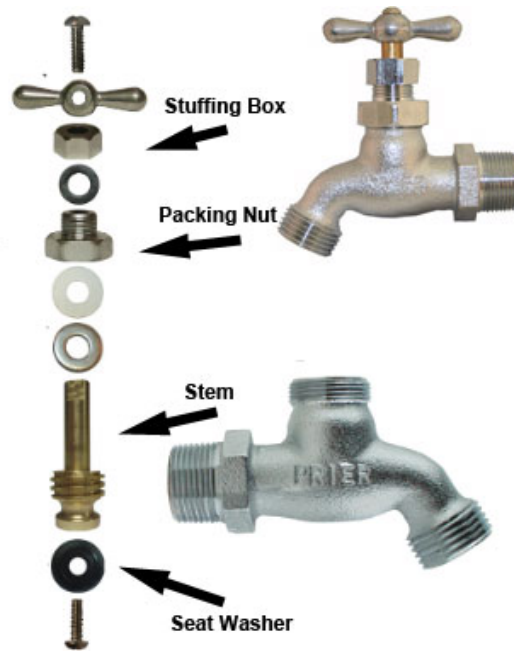


Figura 7: Caja de relleno en chorros. [5]

6.2 Tecnologías de impresión 3D

Hay dos principales tipos de impresora 3D de escritorio: aquellas que utilizan modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés) y aquellas que utilizan resina por estereolitografía, o SLA.

6.2.1 FDM



Las impresoras 3D de escritorio se volvieron disponibles alrededor del 2009, con mucho de su crecimiento empezando en el 2012. Muchas si no es que todas las impresoras de escritorio utilizadas hoy vinieron de un proyecto de la comunidad RepRap; RepRap viene de “Replicating Rapid Prototype”, o replicador rápido de prototipos.[6]

El primer enfoque del proyecto RepRap fue en las impresoras FDM; las cuales presentan los componentes de la Figura 8.

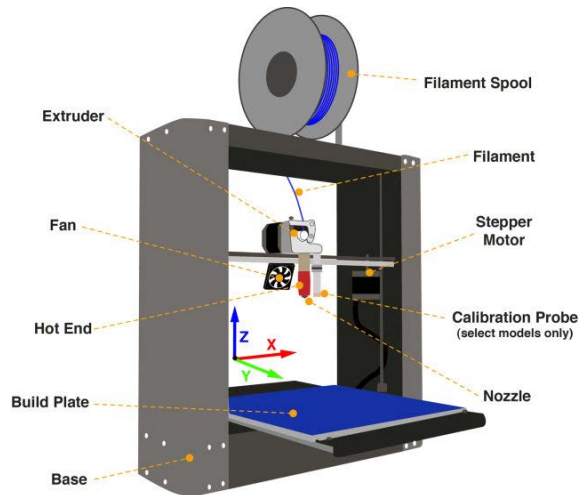


Figura 8: Anatomía de una impresora 3D FDM [6]

Esta técnica es considerada a menudo el método existente más sencillo. La tecnología de modelado por deposición fundida o FDM se basa en tres elementos principales: una placa/cama de impresión en la que se imprime la pieza, una bobina de filamento que sirve como material de impresión y una cabeza de extrusión también llamada extrusor. En resumen, el filamento es succionado y fundido por el extrusor de la impresora 3D, que deposita el material de forma precisa capa por capa sobre la cama de impresión.[6]

6.2.2 SLA



Las impresoras FDM abarcan el 90 % del mercado del consumidor. el otro 10 % pertenece a a las impresoras SLA. SLA quiere decir estereolitografía o en otras palabras, aparato que escribe con luz, estas impresoras tienen mucho mejor nivel de detalle que las impresoras FDM pero son más complicadas de utilizar.[6]

Estas impresoras no utilizan filamento, sino que utilizan un polímero líquido que se endurece o cura cuando es expuesto a una longitud de onda de luz específica, usualmente 405nm (dentro del espectro de luz ultravioleta), las impresiones siguen siendo capa por capa pero se crean de forma distinta.

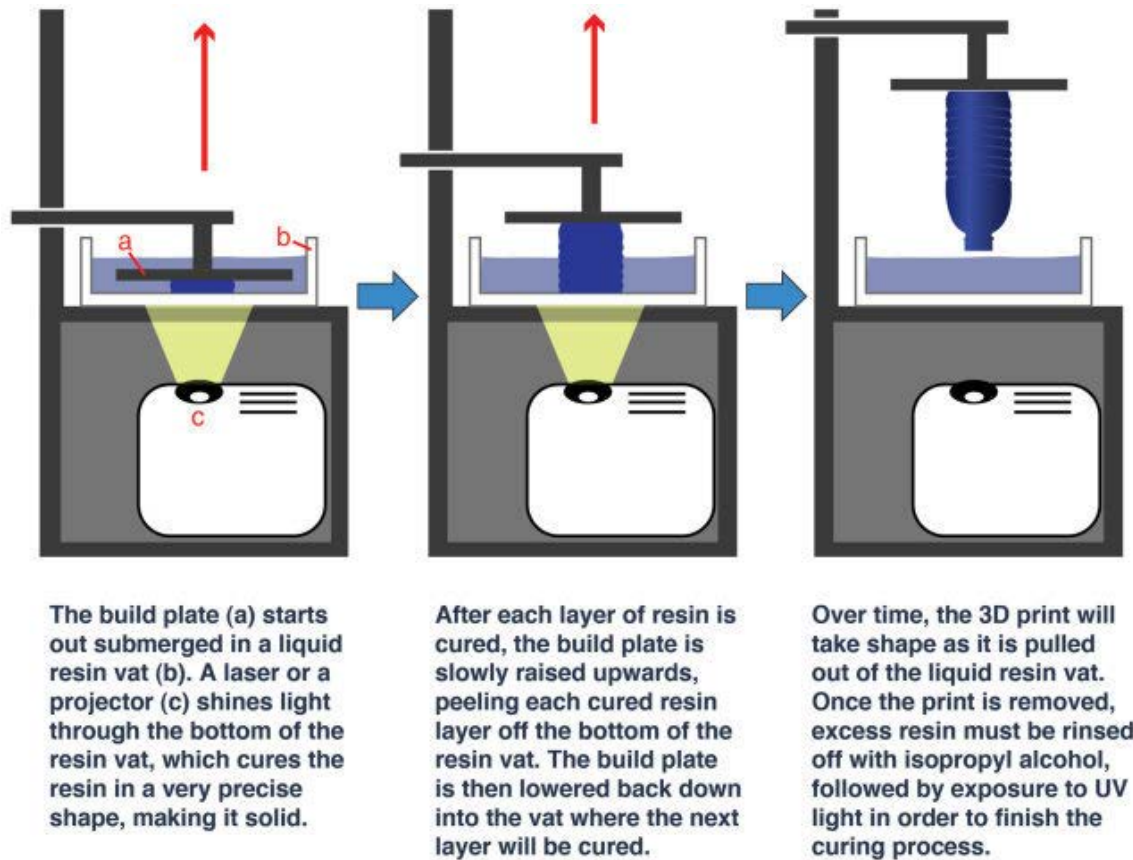


Figura 9: Proceso de impresión SLA [6]

En la Figura 9 se puede observar una impresora SLA que utiliza la tecnología DLP (Digital Light Processing) con un proyector, sin embargo en la actualidad en vez del proyector se utiliza una pantalla LCD de alta resolución y una retro-iluminación UV.

6.2.3 Materiales

Los materiales que pueden utilizarse varían dependiendo del tipo de impresora, para FDM puede verse la Figura 10.



Figura 10: Materiales comunes para impresoras FDM

Para las impresoras SLA se emplea resina, la cual es comúnmente más cara que el filamento usado en FDM, y puede encontrarse en las variedades: normal/uso común, duradera/resistente, flexible, y moldeable.

Para entender la medida de dureza se emplea la escala Shore hardness la cual fue definida por Albert Ferdinand Shore para medir dureza en la época de 1920s, en general es utilizada para medir dureza en polímeros, elásticos, y caucho. [7]



Figura 11: Escala de dureza de Shore [8]

Puede observarse que la dureza 79D hace referencia al Shore D, número 79, lo que nos da una comparación a un casco industrial de seguridad.

Otro dato de interés es la fuerza de tensión, de 23.4 Mega Pascales, lo cual es el valor del máximo estrés que el material puede soportar al ser estirado o jalado antes de romperse. [9]

6.3 Diseño

6.3.1 Software CAD

CAD o Diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés, se refiere al uso de computadoras para asistir en el proceso de diseño en todo tipo de industrias. Con software CAD es posible construir un modelo completo en un espacio imaginario, permitiendo visualizar propiedades como altura, ancho, distancia, material, o incluso color del modelo antes de que el modelo sea utilizado en una aplicación en particular. [10]

Al principio CAD solo era utilizado para propósitos de investigación, pero en los años 70s, las grandes compañías de automóviles y de aeronáutica empezaron a desarrollar sus propios software, expandiendo sus aplicaciones a otras industrias en los 80s. Fue hasta los años noventa que CATIA y AutoCAD fueron creados, haciendo posible que fueran utilizados un muchos sectores profesionales. [10]

6.3.2 Modelado en sólidos

El modelado en sólidos es un conjunto consistente de principios para modelado matemático y asistido por computadora de objetos sólidos tridimensionales. Involucra trabajar con formas predefinidas, como cubos, cilindros, esferas y otros poliedros, quitando y agregan-

do material. Los objetos pueden ser partidos para revelar características internas e incluso pueden ser utilizados en simulaciones de estrés.[11]

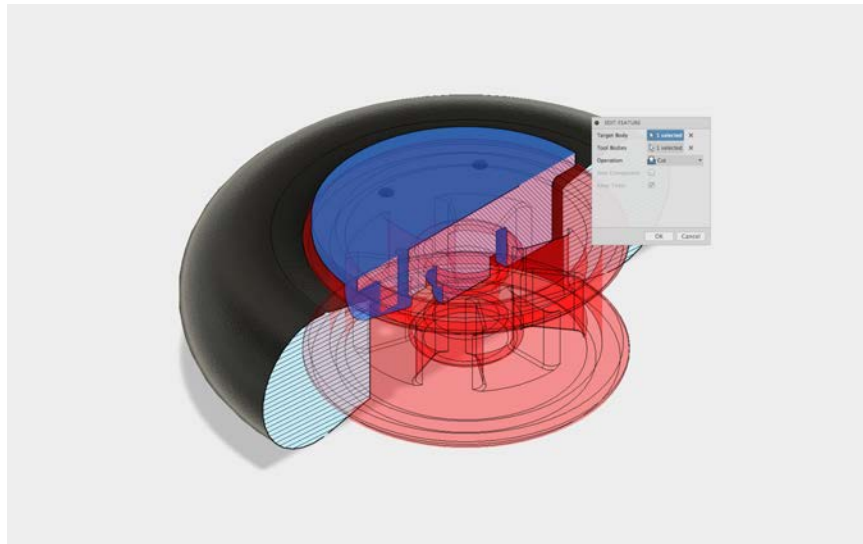


Figura 12: Proceso de modelado en sólidos [12]

6.3.3 Modelado en mallas

El modelado de mallas consiste de numerosas caras poligonales. Estos polígonos pueden ser pensados como píxeles, con cada objeto teniendo una resolución definida. Esto puede considerarse un poco antiguo, sin embargo, significa que objetos complejos son más fáciles de representar matemáticamente. Por lo tanto, los modelos basados en mallas son fáciles de desplegar en un amplio rango de programas de diseño 3D. [11]

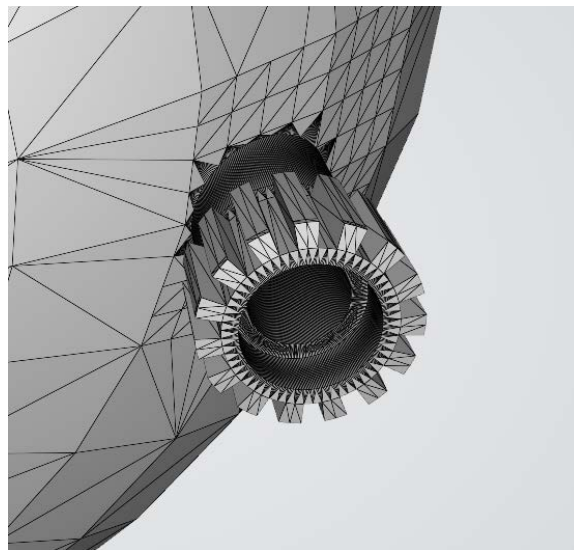


Figura 13: Proceso de modelado en mallas

6.3.4 Software *Slicer*

Un *Slicer* es un programa que convierte modelos digitales 3D en instrucciones de impresión para una impresora 3D dada. Además del modelo en sí, las instrucciones contienen parámetros de impresión dados por el usuario, como la altura de las capas, velocidad, y estructura de soporte.[13]

Las tecnologías de impresión 3D crean objetos 3D agregando material capa por capa. El software de *Slicer* (rebanador) está correctamente nombrado ya que virtualmente corta el modelo 3D en muchas capas horizontales 2D que luego pueden ser imprimidas una a la vez. [13]



Figura 14: Corte virtual a un modelo 3D en capas 2D [14]

6.3.5 Archivo STL

Un archivo STL guarda la información sobre modelos 3D. Este formato describe únicamente la forma geométrica de la superficie de un objeto tridimensional sin ninguna representación de color, textura u otros atributos comunes. Los archivos STL han sido adoptados y son soportados por muchos software CAD, y actualmente son ampliamente usados para prototipado rápido, impresión 3D, y manufactura asistida por computadora.[15]

El significado de las siglas STL se ha perdido con el tiempo. Se cree que es la abreviación de la palabra *STereoLithogaphy*, aunque algunas veces es referido como *Standard Triangle Language* o *Standard Tessellation Language*.[15]

6.4 Mecánica de fluidos

6.4.1 Fluido

Definimos un fluido como una sustancia que cambia de forma continuamente mientras esté sometida a una tensión cortante, aunque sea pequeña. Los fluidos se componen de moléculas, que se mueven y entran en colisión constantemente. [16]

6.4.2 Arrastre

Definimos la resistencia o arrastre F_d , como la componente de la fuerza ejercida sobre un cuerpo en movimiento en la dirección de la corriente libre del fluido lejos del cuerpo.

El arrastre de un cuerpo en un fluido es una cantidad difícil de determinar, ya que depende de factores como la transición en las capas límites y la separación de la capa límite, por mencionar algunas. Por esta razón se utilizan datos experimentales, en donde se expresa, generalmente, el arrastre como: [16]

$$F_d = C_d A \frac{\rho V_o^2}{2}$$

Donde C_d es el coeficiente de arrastre, A es el área proyectada en la dirección del flujo, y V_o es la velocidad de la corriente libre. [16]

6.4.3 Flujo laminar

El flujo laminar es un tipo de flujo ordenado en el que las capas del fluido se deslizan una sobre otra. [16] Cada partícula del fluido sigue una trayectoria suave sobre una línea de corriente.

En la Figura 15 se muestran patrones de tinte en el agua que fluye entre dos placas de vidrio cercanas representa el flujo laminar, en el que capas adyacentes de fluido se deslizan suavemente una sobre otra, y el flujo es estable.[17]

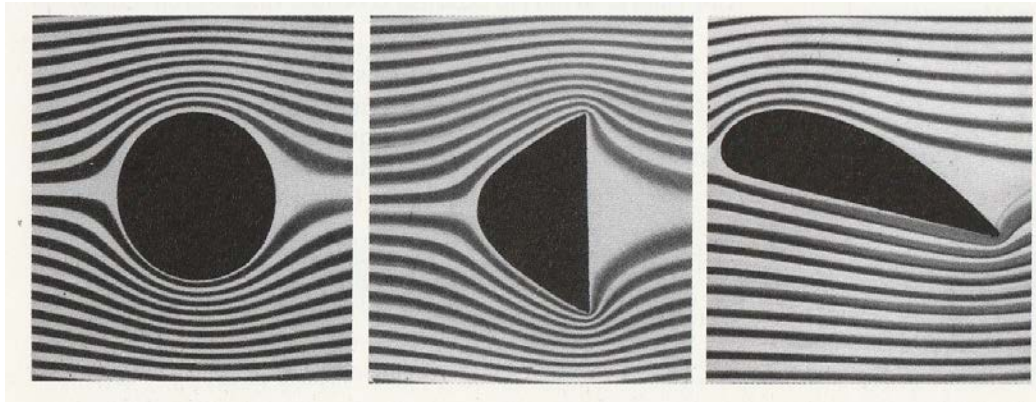


Figura 15: Flujo laminar [17]

6.5 Engranajes

6.5.1 Engranajes helicoidales

Los engranajes helicoidales se diferencian de los rectos en que los dientes son inclinados con respecto al eje de rotación. Una de sus ventajas son más silenciosos debido al engranado

más gradual de los dientes durante el acoplamiento.[18]

6.5.2 Engranos no paralelos co-planares

El uso común de estos engranes es la de la reexpedición de la potencia alrededor de una esquina, como se podría requerir cuando se conecta un motor horizontalmente al eje del rotor montado verticalmente, como se puede observar en la Figura 16.[18]

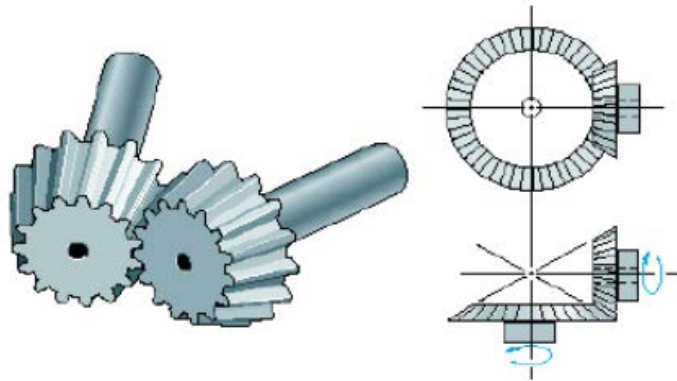


Figura 16: Engranos cónicos rectos[18]

Este tipo de engranes son de forma cónica, y existen cuatro tipos principales: engranes cónicos rectos, engranes cónicos helicoidales, y engranes cónicos hipoidales.[18]

6.5.3 Engranajes cónicos helicoidales

Los dientes de un engrane cónico son curvos y oblicuos, lo que permite que siempre más de un diente este en contacto, lo que permite un acoplamiento gradual, como puede verse en la Figura 17.[18]



Figura 17: Engranés cónicos Helicoidales[18]

Las cargas que se transmiten con un engrane de este tipo son mayores a las que se transmiten en un engrane cónico recto del mismo tamaño, además de generar un giro más suave y silencioso.[18]

7.1. Impresora FDM

Para imprimir en la tecnología FDM se utilizó la impresora CATZ, esta impresora es basada en el diseño de hardware abierto por LULBOT, específicamente entre la TAZ5 y TAZ6 [19], el rediseño de esta impresora se basa en poder ser fabricada con materiales encontrados en Guatemala.

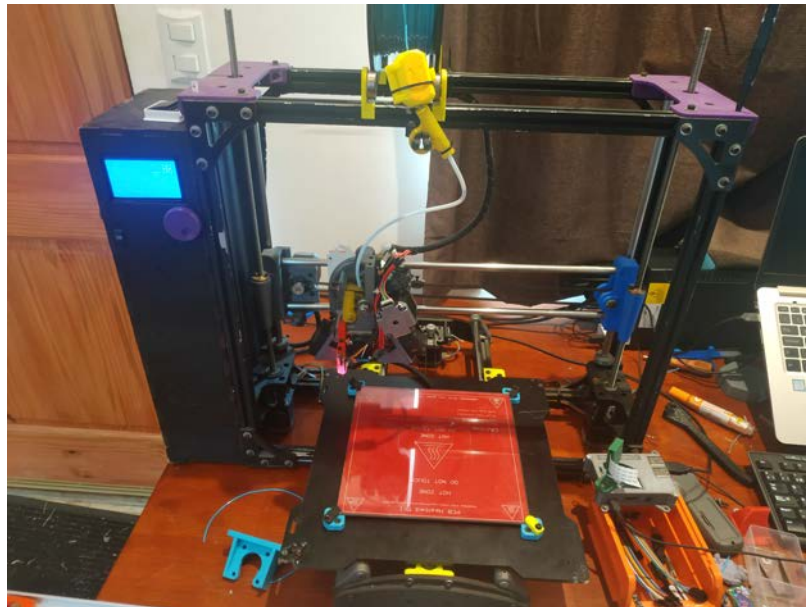


Figura 18: Impresora FDM - CATZ

7.1.1. Especificaciones

- Extrusora: extrusora única con Nozzle de 0.4mm
- Resolución de capa: 0.05mm - 0.35mm
- Máxima temperatura Nozzle: 250°C
- Nivelación de la cama: compensación automática del eje Z
- Volumen de impresión: 270 mm x 270 mm x 240 mm
- Tolerancia calculada XYZ: +/-0.2mm

7.1.2. Materiales

- Diámetro del filamento: 1.75mm
- Materiales: PLA, TPU, ABS, PETG.

7.1.3. Software

- Compatibilidad de OS: GNU/Linux, Mac, Windows
- Programa *Slicer* recomendado: Prusaslice v2.x, Cura 4.7 o más nuevo
- Firmware: Marlin
- Archivos soportados: .stl, .obj

7.2. Impresora SLA

La impresora utilizada fue Elegoo MARS, es una impresora 3D UV de fotocurado económica y con alta resolución.



Figura 19: Impresora SLA - Elegoo MARS[20]

7.2.1. Especificaciones

- Tecnología: pantalla de LED fotocurado
- Fuente de luz: Luz UV 40W integrada (405nm)
- Grosor de capa: 0.01 mm - 0.2 mm
- Volumen de impresión: 120 mm x 68 mm x 155 mm
- Nivelación de la cama: manual
- Precisión del eje Z: 0.00125mm
- Resolución XY: 0.047mm (2560x1440)

7.2.2. Materiales

- Materiales: resina foto-polimérica
- Longitud onda de curado: 405nm

7.2.3. Software

- Compatibilidad de OS: GNU/Linux, Mac, Windows
- Programa *Slicer* recomendado: Chitubox 1.6.5 o más alto
- Firmware: Mars Firmware v4.2.3.
- Archivos soportados: .stl, .obj, .cbdDLP, .photon

Específicamente, se utilizará resina “ABS-like” de la empresa Eleego. “ABS-like” hace referencia a que tiene propiedades muy similares al plástico ABS, haciéndolo más resistente que la resina común. Entre sus características físicas encontramos [20]:

- Longitud de onda para curado: 405nm
- Dureza: 79.0D
- Encogimiento: 7.1 %
- Viscosidad (25C): 552.0 MPa
- Densidad líquida: 1.100 g/cm^3
- Densidad sólida: 1.184 g/cm^3
- Fuerza de tensión: 23.4 Mpa
- Punto de quiebre al estirar: 14.2 %
- Tiempo de curado: 6-10s por capa
- Vida útil almacenada en forma líquida: 1 año

El primer prototipo se realizó en diversas fases:

La primera fase constó del diseño y fabricación de modelos de prueba, dichos modelos constaron de una recámara y un cilindro que contuvo el mecanismo de transmisión de potencia. Luego, dichos modelos se sumergieron bajo agua y se revisó si existieron filtraciones. Se realizaron pruebas en materiales de PLA sin tratar y PLA tratado, así como en resina fotocurable, los parámetros de tamaño, longitud de la caja de relleno, resolución de la impresión, porcentaje de relleno de la impresión, etc.

Se inició con un cilindro de 50mm de longitud, luego, se procedió a uno más corto (25mm) con la finalidad de reducir el tamaño total del chasis.

Luego de obtener pruebas exitosas se procedió a incorporar el diseño de transmisión de potencia dentro del chasis de BART.

Luego de tener un mecanismo funcional de transmisión de potencia se procedió a incorporarlo al diseño del casco y probar los motores. Para utilizar los motores se diseñaron engranajes de 90° para compactar los componentes en el casco. Dichos engranajes deben de probarse imprimiéndolos para verificar su funcionamiento antes de incorporarlos al casco.

Toda pieza que deba encajar en el casco fue probada con pequeñas impresiones, por ejemplo un cojinete debe de probarse con cilindros de prueba, esto con el fin de no gastar material imprimiendo cascos completos que deban descartarse por un error de tolerancias.

Se probaron las patas del robot en el nuevo diseño del casco para verificar que tuvieran el espacio necesario para moverse. Todo esto se realizó previo a imprimir el primer casco completo.

Luego, se definieron los componentes a utilizar en la electrónica para hacer espacio en el

casco previo a imprimirlo.

También tuvo que estar lista cualquier PCB que se fuera a utilizar en el caso, al igual que antenas o puertos que deban de utilizarse.

Finalmente, se realizaron pruebas en agua para verificar posibles filtraciones entre las dos partes del casco.

8.1. Diseño

En la primera fase el modelado fue realizado con softwares CAD para el diseño de objetos sólidos, esto permitió que los objetos pudieran ser analizados en simulaciones de una manera sencilla. Para poder fabricarlos era necesario convertir estos modelos a un formato de malla, en específico .stl, para que pudieran ser interpretados por el software *Slicer*. Todos los software CAD modernos permiten exportar de su tipo de archivo nativo a STL.

El archivo STL representa un modelo 3D aproximando las superficies exteriores utilizando múltiples triángulos. Estos triángulos crean una malla tridimensional de puntos, bordes y caras. Un STL es imprimible en 3D si cada borde está conectado a exactamente dos caras, de lo contrario esto resultaría en un objeto no euclidiano. De esta forma el modelo 3D es representado con precisión y sin ambigüedad. [12]

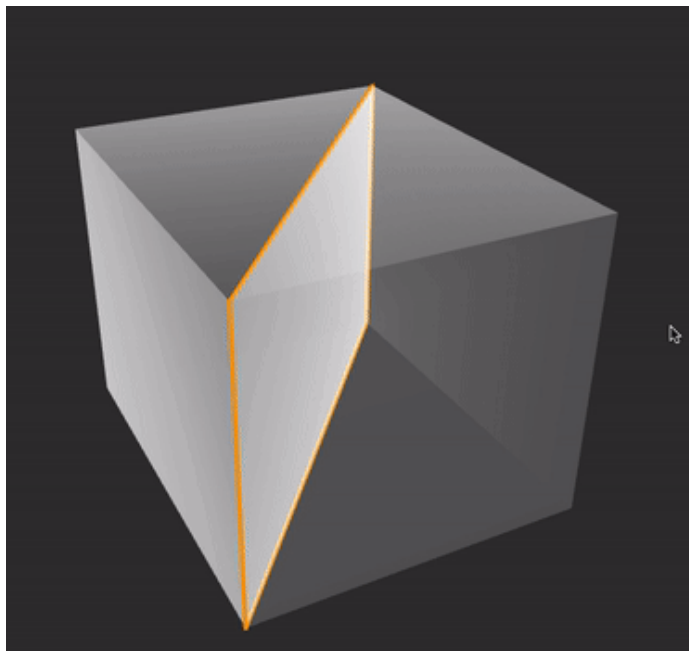


Figura 20: Objeto no euclidiano[12]

Esto lleva a que al momento de exportar de sólidos a malla (STL) puede resultar en caras perdidas, poca resolución o a inexactitudes geométricas. En específico algunos de los problemas que pueden encontrarse son:

Bordes limítrofes: son aquellos bordes conectados a una sola cara, esencialmente lleva a un modelo con agujeros. Muchos software *Slicer* son capaces de procesar estos modelos, pero es difícil de predecir qué modelo será interpretado de manera correcta y cual no.



Figura 21: Bordes limítrofes[12]

Caras entrelazadas: este error se da cuando dos superficies colisionan entre si. Usualmente cuando múltiples cuerpos ocupan el mismo espacio. Esto lleva a fallas en el proceso de “slice” del software, ya que no puede reconocer qué es adentro y qué es afuera.

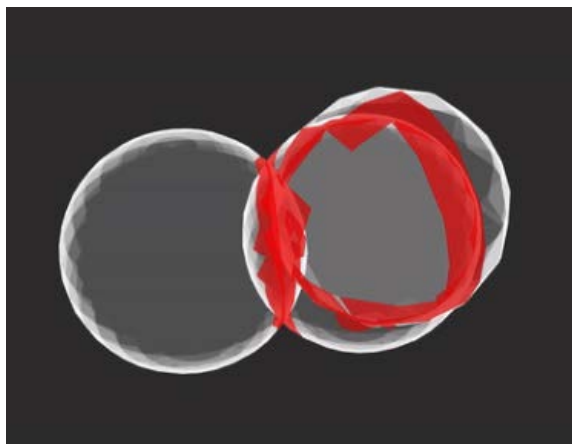


Figura 22: Caras entrelazadas[12]

Mallas demasiado refinadas: una malla puede estar sobre-refinada si el número total de triángulos en el modelo STL es mayor al requerido. Esto no llevará a ningún error al momento de imprimir en 3D, pero hará que el archivo STL sea demasiado grande. Esto es también innecesario, ya que estos detalles minúsculos exceden la capacidad de la mayoría de impresoras (hablando de su máxima precisión).

Estos problemas pueden ser solucionados con un software de diseño en mallas, sin embar-

go esto toma tiempo y es un paso en el flujo de trabajo que puede ser evitado diseñando desde el inicio en mallas. Esto permite trabajar directamente sobre el modelo que interpretará el *Slicer*.

Otro factor a mencionar es que el modelado de sólidos involucra el trabajar con formas pre-definidas, como cubos, cilindros, esferas y otros poliedros, para agregar o remover material. Mientras que el modelado de mallas trabaja con miles de superficies triangulares, lo que permite realizar diseños orgánicos y bio-inspirados. Además el tener un diseño de malla permite que el modelo sea matemáticamente sencillo de representar, que es lo que hacen los software de *Slicer*.

Para esta investigación se decidió utilizar el software de código abierto Blender[21] en su versión 2.8.x. Blender es un modelador de mallas, lo cual permite diseñar y modificar estos archivos tal cual serán interpretados por las impresoras. Otro factor por el cual se empleó es debido a la experiencia de más de tres años en el área profesional del autor con el software.

Para empezar a diseñar en Blender se tuvieron los siguientes puntos clave, sin orden predeterminado:

- Establecer la forma del objeto.
- El objeto tiene que satisfacer las necesidades.
- Los objetos tienen que satisfacer estas necesidades por medio de una función.

El diseño en Blender consiste principalmente en modelar vértices, bordes, y caras, formando así mallas tridimensionales. Al imprimir en 3D es importante tomar en cuenta las propiedades del material con el cual se va a fabricar. Al imprimir en PLA las tolerancias son de $\pm 0.4\text{mm}$ y en resina son de $\pm 7\%$ del volumen. Esto es importante para el encaje de piezas mecánicas y el ensamble entre varias piezas. Blender asigna automáticamente unidades a los objetos diseñados y estas son, convenientemente, equivalentes a 1mm en cualquier software *Slicer* que interprete el objeto.

Las caras de un diseño en Blender tienen una normal, dicha normal debe apuntar hacia el exterior para que el objeto sea considerado no euclidiano, un criterio necesario para que no ocurran fallos en la impresión 3D como agujeros donde no deben de ir, o partes cerradas donde no deben de estar.

8.2. Slicer

Luego de tener un modelo en .stl se procedió a utilizar un programa de *Slicer*, estos programas se encargan de convertir el archivo .stl a un formato entendible por las impresoras, en el caso de la impresora FDM CATZ este archivo es un .gcode, el cual tiene todas las instrucciones para la impresión. En el caso de la impresora Elegoo MARS en SLA este archivo es un .cbdDLP el cual incluye las imágenes de las capas.

8.2.1. Configuraciones en FDM

- Capas: 200 micras
- Material: PLA 200C
- Nozzle: 0.4mm
- Velocidad de impresión: 40mm/s

8.2.2. Configuraciones en SLA

- Capas: 50 micras
- Material: resina fotocurable
- Velocidad de impresión: 22mm/min (en eje Z)

8.3. Piezas impresas

Las piezas impresas deben ser categorizadas en una tabla por material (PLA o resina), tecnología, resolución en micrones, tratamiento posterior, peso en gramos, costo en quetzales. Las marcas y colores del PLA y la resina pueden estar sujetos a cambios por razones de disponibilidad, pero debe de mantenerse el material en PLA y resina estándar o ABS-like.

Pieza	Material	Tratamiento	Resolución	Relleno	Costo
1	PLA	na	200	100 %	0.50Q
1	PLA	2 capas de barniz	200	100 %	0.50Q
2	PLA	1 capa de barniz	200	20 %	0.50Q
3	resina	na	50	100 %	0.50Q

Cuadro 1: Ejemplo de organización de datos.

8.4. Pruebas de mecanismo a prueba de filtraciones

Las pruebas constaron de una recámara sellada con su mecanismo de transmisión de potencia diseñado, el cual se sumergió 10 cm bajo agua durante 8 horas. Luego la recámara se abre y de existir filtración se mide con una jeringa la cantidad de mililitros de agua. Luego se procedió a realizar lo mismo con las pruebas exitosas pero durante 1 minuto bajo agua mientras el mecanismo de transmisión de potencia estaba funcionando.

9.1. Mecanismo a prueba de filtraciones

9.1.1. Fases previas

El la fase 1 de BART se decidió seleccionar juntas tóricas O-rings, para aislar el motor del agua por su costo reducido y variedad de tamaños disponibles. Dicho diseño incluía una parte interna que funcionaba como eje, en el cual se colocaba la junta tórica, la cual rozaba con una cápsula o compartimiento externo para no dejar pasar el agua, dichas partes pueden verse en la Figura 23. Sin embargo estas juntas tóricas generaron una fricción demasiado elevada, donde era necesaria una gran parte del torque del motor solo para vencer esta fricción, esto es debido a que las juntas no están diseñadas para un sello en movimiento rotatorio.

Otro inconveniente de este diseño fue que el PLA impreso en FDM por si solo no es impermeable. La tecnología de impresión funciona agregando filamento derretido capa por capa, dichas capas se adhieren unas a otras, sin embargo dicha unión no es perfecta y se generan espacios por donde el agua puede filtrarse dentro de las cápsulas y dentro del casco.



Figura 23: Diseño a prueba de filtración - Fase 1 BART

En la fase 2 de BART se tomó el mismo enfoque de utilizar juntas tóricas como sello dentro de un cilindro. En esta fase se analizaron a más detalle las tolerancias especificadas de los fabricantes para reducir la fricción que las juntas generaban.

En esta fase no se utilizaron los engranajes a 90 grados sino que el eje del motor iba directamente conectado al mecanismo de transmisión y los motores eran colocados de forma vertical, también se utilizaron motores más potentes con relación 100:1 para lograr contrarrestar los efectos de fricción generados por las juntas tóricas.

Los motores en posición vertical generaron un casco de mayores dimensiones y que fueran vulnerables a la exposición de agua en caso de una filtración.



(a) Manufactura de cilindros con alojamientos para O-Rings



(b) Manufactura de las piezas para pruebas de los O-Rings

Figura 24: Diseño a prueba de filtración - Fase 2 BART

En esta fase se tuvo el efecto con el PLA impreso en FDM, el cual no es impermeable, ocasionando que ocurran filtraciones eventualmente. En esta fase también se decidió no utilizar un modelo hidrodinámico sino simétrico rectangular para simplificar análisis de la PLAtaforma robótica.

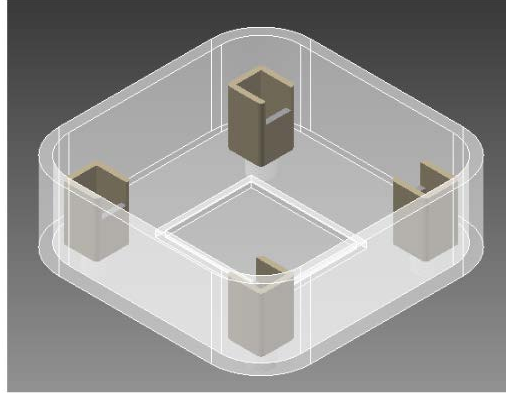


Figura 25: Motores verticales y casco rectangular - fase 2 BART.

9.1.2. Diseño del mecanismo a prueba de filtración

Tomando en cuenta los problemas de las fases anteriores, se propuso un mecanismo a prueba de filtraciones basado en la tecnología de caja de relleno, previamente mencionada en el marco teórico. Esto mejora por mucho el torque necesario del motor para mover el eje, y la grasa provee un sello al agua. Para solucionar el problema de la permeabilidad del PLA impreso en FDM se utilizó un recubrimiento de barniz sobre el material, también se usó de resina como material alternativo.

La idea fue la de utilizar una caja de relleno para aislar el interior del casco y los propulsores, un eje de transmisión es colocado dentro de la caja de relleno la cual estuviera contenida entre dos cojinetes. Esta caja de relleno mantiene una ligera presión la cual evita que líquido se filtre por el mismo, siempre y cuando la presión de este líquido no sea mayor a la que existe en la caja de relleno.

Este mecanismo debía ser capaz de mantenerse sobre la superficie del agua y, considerando el peor de los casos, bajo el agua a baja presión. Debía funcionar continuamente sin permitir ninguna filtración, la cual impediría la funcionalidad del robot y podría ocasionar daños a la electrónica dentro del casco.

Para no gastar recursos y material de forma innecesaria, se diseñaron piezas de prueba, para poder probar únicamente este mecanismo antes de utilizar los recursos en un prototipo.

Se diseñó una recámara con tapa enroscable y la caja de relleno como un cilindro, la recámara permitió verificar el estado antes y después de ser expuesta al líquido, entre la pieza de prueba y la en tapa se colocó un empaqué el cual sellaría estas partes evitando filtración.

En la Figura 24 se observar una representación de la primera versión de estas piezas de

prueba, consta de dos partes, el cuerpo y la tapa, con espacio interno y externo para los cojinetes donde va la varilla de acero inoxidable, en un medio hidrofóbico que fue la grasa sintética.



Figura 26: Representación del diseño de pruebas

9.1.3. Fabricación de las piezas de prueba

Dicha pieza es impresa en PLA por tecnología FDM y resina en SLA, las piezas de FDM se pusieron a prueba bajo el agua sin y con tratamiento. El tratamiento consta de capas de barniz, las cuales utilizamos como un recubrimiento resistente al agua. Los cojinetes usados fueron 605zz (5mm diámetro interno, 14mm diámetro externo, 5mm Altura), en la caja de relleno se utilizó grasa sintética.

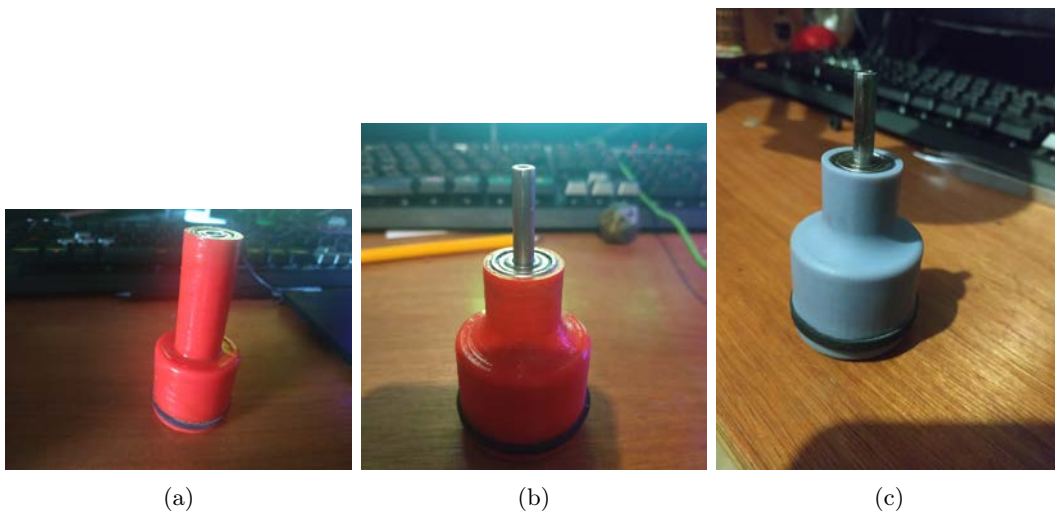


Figura 27: Prueba del mecanismo a prueba de filtración.

La primera pieza impresa, Figura 27a, en PLA fue impresa con tecnología FDM a una temperatura de 210C a una velocidad de 40mm/s, con un relleno del 100% con una boquilla

de 0.4mm, y capas de 200 micrones. La segunda pieza de prueba, Figura 27b, se imprimió con las mismas características exceptuando el relleno, el cual fue con patrón de cuadrícula y de un 20%. La tercera pieza fue impresa en tecnología SLA en resina, Figura 27c, con capas a 50 micrones (resolución en Z), con tiempo de curado por capa de 8 segundos, y luego post-curado bajo luz UV de 405nm en una base rotatoria, por 10 minutos.

9.1.4. Implementación de la prueba

Se sumergieron las piezas ensambladas bajo de agua en un recipiente de $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 15\text{cm}$ con una pieza de papel dentro de la recámara, para evitar que flote se utilizó un objeto pesado. La pieza permaneció 8 horas bajo del agua.



Figura 28: Pieza de prueba sumergida bajo agua.

Luego que se retiró la pieza de prueba, se procedió a secar el exterior rápidamente y abrir la recámara, en los casos donde se encontró filtración se utilizó una jeringa para medir cuantos mL de agua se filtraron dentro de la recámara. Se realizó la prueba cuatro veces. Los resultados se observan en el Cuadro 2.

Pieza	Material	Tratamiento	Resolución	Relleno	Costo	Filtración
1	PLA	na	200	100 %	Q10.24	1.6mL
1	PLA	2 capas de barniz	200	100 %	Q10.24	0mL
2	PLA	1 capa de barniz	200	20 %	Q7.67	0mL
3	resina	na	50	100 %	Q12.92	0mL

Cuadro 2: Resultados de pruebas.

El caso de la primera prueba impresa en PLA en FDM presentó filtración de 1.6mL, la cual puede ser a causa de imperfecciones por la tecnología de impresión o por un fallo en el diseño de la caja de relleno. Por este motivo se procedió a aplicar un tratamiento impermeabilizante al plástico para descartar que fuese la caja de relleno el causante de la filtración.

Se aplicaron dos capas de barniz para madera con una brocha manual sobre el plástico, y se procedió a repetir la prueba. Repitiendo el proceso de la prueba no se encontró líquido dentro de la recámara.



Figura 29: Resultado de pieza 1 antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar tratamiento

Con la pieza 2 se decidió reducir la altura del cilindro, utilizar menos material (20% de relleno en vez de ser una pieza sólida) y solo una capa de barniz. Los resultados fueron exitosos nuevamente al no encontrar filtraciones en la recámara.



Figura 30: Resultado de pieza 2

La última prueba realizada fue con mismo modelo 3D que la pieza 2, pero esta vez en resina impresa en SLA. Los resultados fueron exitosos sin necesidad de aplicar ningún tipo de tratamiento a la resina, sin embargo la pieza fue más pesada.



Figura 31: Resultado de pieza 3.

9.1.5. Recapitulación

La única pieza que presentó filtraciones fue pieza 1, impresa en PLA al 100 % de relleno sin tratamiento alguno, lo que llevó a concluir que la impresión en FDM de PLA solo es posible en este caso si se aplica al menos una capa de barniz como tratamiento, comprobado por la prueba en la pieza 2.

La pieza 3, impresa en resina, mostró un resultado satisfactorio sin necesidad de aplicarle ningún tratamiento, sin embargo hay que considerar que el costo es mayor al del PLA y que se tienen limitantes en el volumen de impresión posible, estos factores son analizados en capítulos posteriores.

Tanto en resina como en PLA con tratamiento posterior, se obtuvo un mecanismo de transmisión de potencia que permitió operar sin generar filtraciones, este mecanismo fue empleado a una menor escala en la fabricación del casco.

9.2. Mecanismo de transmisión de potencia

En la primera fase el mecanismo de transmisión de potencia se hizo uso de engranajes a 90 grados, el diámetro fue de 16.5 mm, el radio de los dientes de 2.25 mm, y el espesor del engrane y sus dientes fue de 5mm, sin embargo el funcionamiento de los mismos no fue ideal, ya que solo constaban de 4 dientes cada uno y fueron fabricados en FDM en PLA, la reducida cantidad de dientes y la irregularidad de la superficie impresa no permitieron un movimiento fluido.

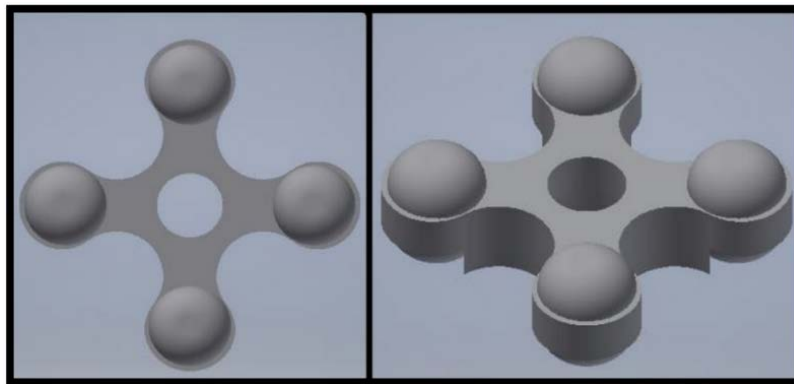


Figura 32: Engranajes fase 1.

La propuesta en la presente fase fue la de diseñar engranajes cónicos helicoidales co-primos, la forma cónica es la que permite colocarlos a noventa grados ya que cada cono es de cuarenta y cinco grados, la forma helicoidal permite un funcionamiento más gradual y son más duraderos y son ideales para altos torques ya que se tienen más dientes en contacto entre los engranajes.

Se utilizó un número de dientes co-primos, 19 dientes para el engranaje pequeño y 30 para el engranaje grande, lo que permitió que en cada revolución de los engranajes nunca

toquen los mismos dientes dos veces consecutivas, evitando así un desgaste constante entre los mismos dientes.

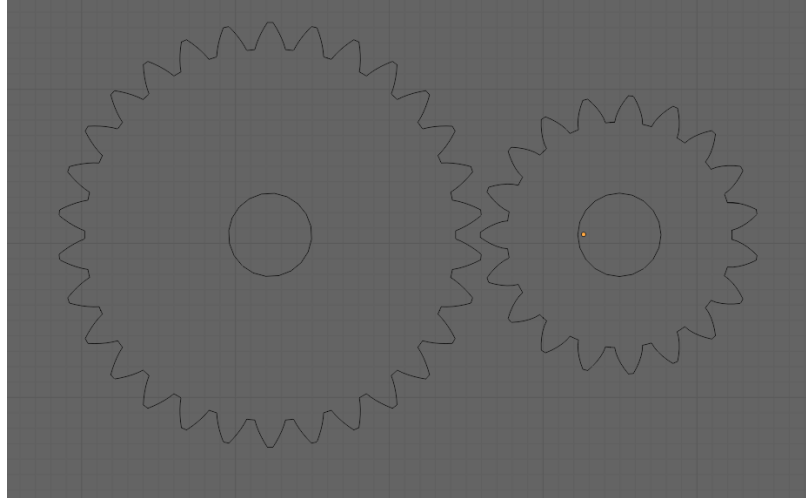


Figura 33: Diseño 2D engranajes

Se empezó diseñando la relación y tamaños en dos dimensiones, teniendo la relación y la forma. Se empleó trigonometría y el valor definido de $b=3\text{mm}$ para calcular la altura y radio del cono. Con esto se obtuvo un diseño 3D dando altura a la figura 2D.

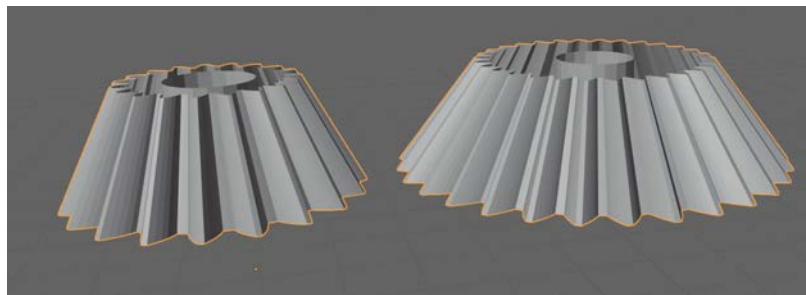


Figura 34: Diseño 3D engranajes

Luego se empleó el modificador *Twist* a la figura para darle la forma helicoidal, con los parámetros encontrados previamente. Se repitieron estos pasos para el engranaje grande, y se procedió a la fabricación.

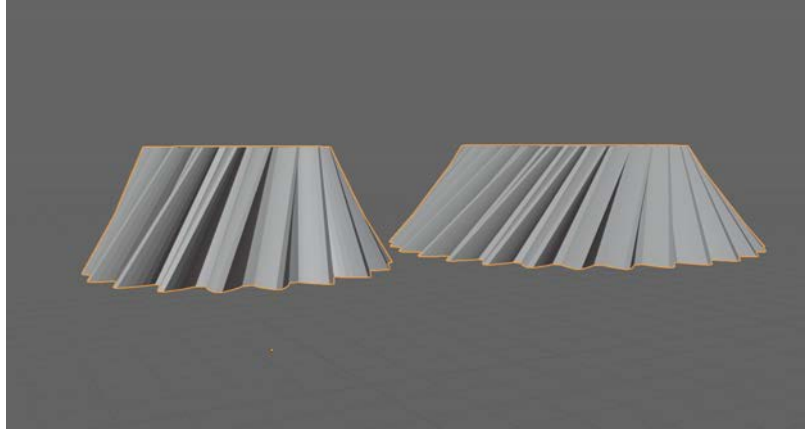


Figura 35: Diseño 3D engranajes forma helicoidal.

9.2.1. Fabricación de los engranajes

Debido al detalle y tamaño pequeño de los engranajes se utilizó la impresión 3D en resina. En FDM esto sería una tarea complicada debido a la falta de detalle en objetos pequeños con un Nozzle de 0.4mm, se podrían hacer pruebas si se cambiara el Nozzle a uno de menor tamaño, por ejemplo 0.2mm, pero al tener la alternativa de poder imprimir en SLA esto no fue probado.

En la primera versión de los engranajes se observaron ciertas imperfecciones debido al material de soporte necesario para imprimirlos, esto generó una ligera inconsistencia entre los dientes de los engranes, pero se espera que con uso continuo el desgaste pueda equilibrarlos.

Se utilizó grasa sintética en los engranajes como lubricación para evitar una fricción entre los dientes que pudiera romperlos.



Figura 36: Primera versión de engranajes.

9.2.2. Diseño del banco de pruebas

Fue necesario contar con una PLAtaforma donde pudieran colocarse los motores y el mecanismo de transmisión de potencia para poder probar los engranajes fabricados, para esto primero se utilizó un modelo de diseño abierto [22] para sujetar los motores, el cual fue modificado para la aplicación, la modificación realizada permitió sujetar dos motores por pieza, y con la distancia necesaria para alinearse con los engranajes.

El banco de prueba se diseñó como una superficie PLAna con espacio para los cojinetes y los motores en el centro.

También se diseñó una segunda iteración con la caja de relleno incluida dándole mayor estabilidad el eje de rotación.

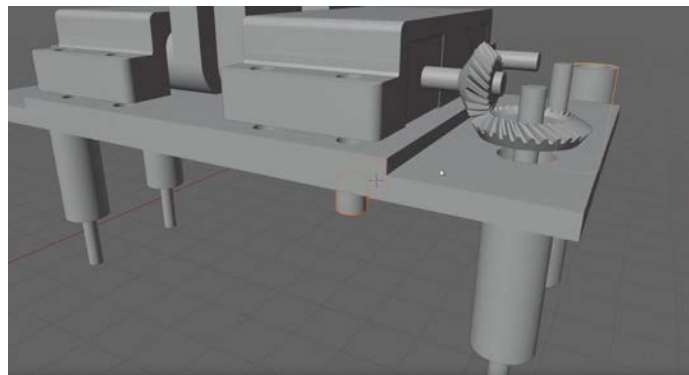


Figura 37: Diseño de la segunda iteración del banco de pruebas.

9.2.3. Fabricación del banco de prueba

Se utilizó PLA en impresión FDM para ambos bancos de prueba, no se aplicó ningún tratamiento ya que no se utilizaran estos bancos de prueba en el agua, el fin de la prueba fue el de observar la posición y funcionamiento de los engranajes.

Pieza	Material	Tratamiento	Resolución	Relleno	Costo	Cantidad
motor_holder	PLA	na	200	20 %	Q4.12	4
bench_1	PLA	na	200	20 %	Q7.36	1
bench_2	PLA	na	200	20 %	Q9.07	1
small_gear	resina	na	20	100 %	Q6.32	7
big_gear	resina	na	20	100 %	Q6.86	7

Cuadro 3: Piezas banco de prueba.

En el primer banco de prueba el retenedor de los motores permitió observar que los engranajes eran funcionales. Las distancias entre los engranajes deben ser ajustadas. Debido a las imperfecciones en la impresión y a la falta de la caja de relleno, se genera un tambaleo o torsión en el banco de prueba, por lo que en la segunda iteración debieron de ajustarse las posiciones de los motores y engranajes e incluir la caja de relleno.

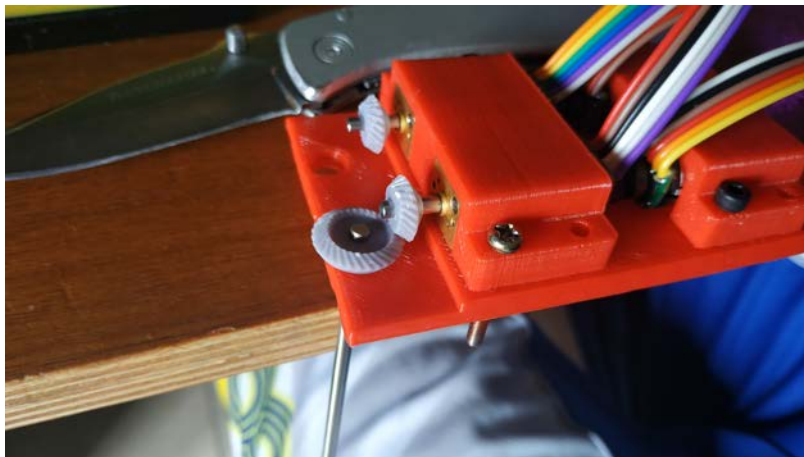


Figura 38: Primer banco de prueba para engranajes y motor.

En el siguiente banco de pruebas se buscó utilizar el mecanismo de transmisión de potencia visto en capítulos anteriores con el uso de una caja de relleno y cojinetes, con los cuales se ajustaron las posiciones de los engranajes lo cual permitió que no se deslizaran los engranajes en el eje. Cabe notar que esta prueba fue para observar el funcionamiento correcto de los engranajes y que cuando se diseñara el casco fuera necesario volver a revisar estos ajustes para una correcta alineación de los mismos.

En la segunda iteración se pudo observar un funcionamiento más adecuado sin tanto tambaleo como en la primera iteración y un movimiento continuo en los engranajes.



Figura 39: Segundo banco de prueba para engranajes y motor.

9.2.4. Recapitulación

Los engranajes impresos en resina fueron una opción funcional y se adaptaron a los usos requeridos, siendo posible modificarlos para diferentes formas de casco si es necesario. Sin embargo la duración de los mismos queda por ser verificada durante futuras pruebas.

El retenedor de los motores funcionó de manera correcta y por lo que fue utilizado para el diseño del casco.

Validación de diseño hidrodinámico

En la fase 1 del proyecto se analizaron distintas formas en Fluent Ansys[23], en donde se analizaron distintas formas de casco, obteniendo varios coeficientes de arrastre. Este análisis concluyó que el diseño rectangular o de frente fue el que genera la mayor cantidad de arrastre mientras que los frentes semicirculares generaron menor arrastre.

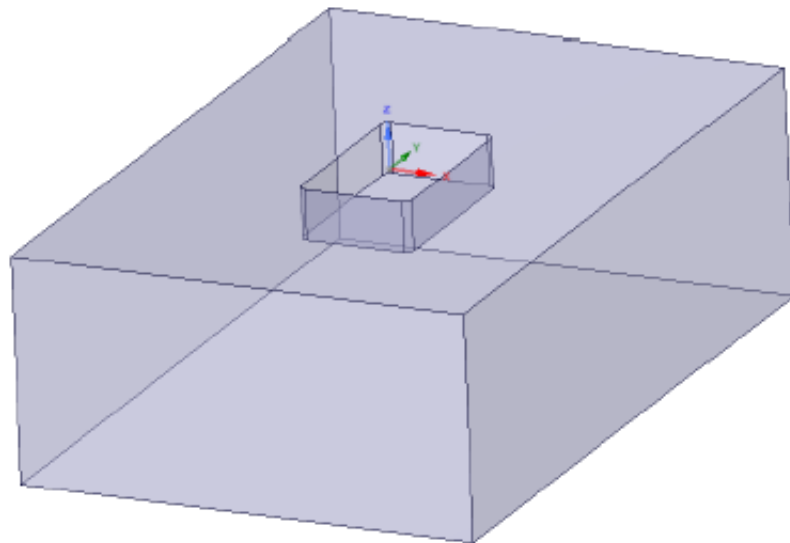


Figura 40: Cuerpo simulado en Fluent para obtener coeficientes de arrastre en fase 1.

Para la presente fase se quiso agregar el modelo del casco con las patas incluidas y validar con esto el diseño. Se volvió a utilizar el programa de simulación Fluent de Ansys, en el cual puede observarse la presión en los objetos así como el coeficiente de arrastre de los mismos.

10.1. Análisis de presión

Se utilizó una simulación de flujo laminar debido al tamaño del robot, y magnitud de la turbulencia generada al mover sus patas, es insignificante en comparación al tamaño del cuerpo de agua a considerar. Esto considerando que el cuerpo de agua constituye una situación lo más cercana a laboratorio, como una piscina o un estanque sin flujo de agua. Realizamos una comparación entre el modelo rectangular utilizado en la fase anterior, con el diseño elipsoidal utilizado en esta fase. Se llevó a cabo una simulación sobre ambas figuras, con un flujo laminar a una velocidad alta de 10m/s, esto para considerar un caso extremo.

En la Figura 41 se observa un incremento en la presión y área en la sección izquierda del rectángulo, mientras que en la elipse el área de presión es menor y a menor intensidad.

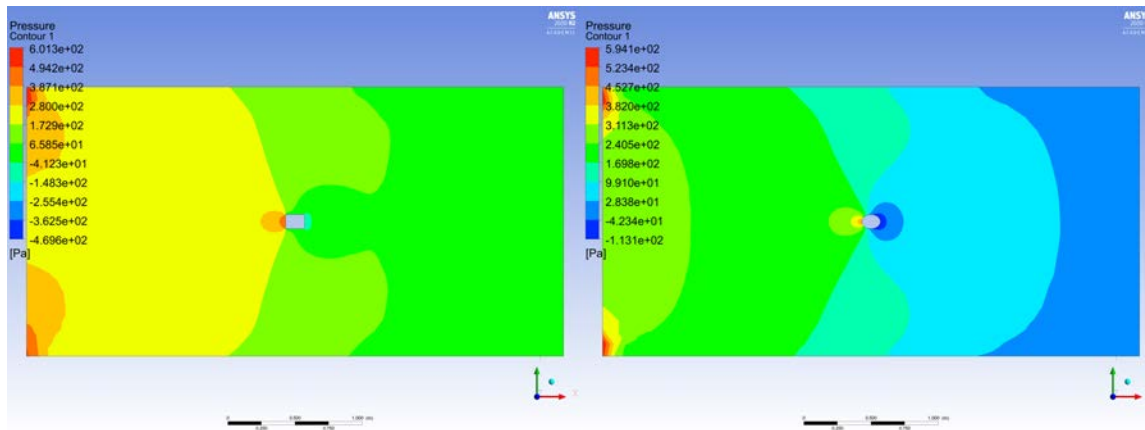


Figura 41: Simulación de presión de un flujo laminar a 10m/s.

10.2. Análisis de velocidad

La simulación fue realizada con las patas extendidas, y con las patas flexionadas. El flujo fue definido como laminar para simplificar el modelo, y fue modelado como un flujo de agua a velocidad de 10m/s.

Pudo observarse una gran disminución en la velocidad en las áreas azules, estas áreas fueron las de mayor resistencia al movimiento. Sin embargo, en el modelo se logró observar también como este flujo rodea la forma de elipse para poder circular.

En las patas se puede observar como hay una disminución grande de velocidad cuando están extendidas, y cuando están retraídas está disminución es mucho menor.

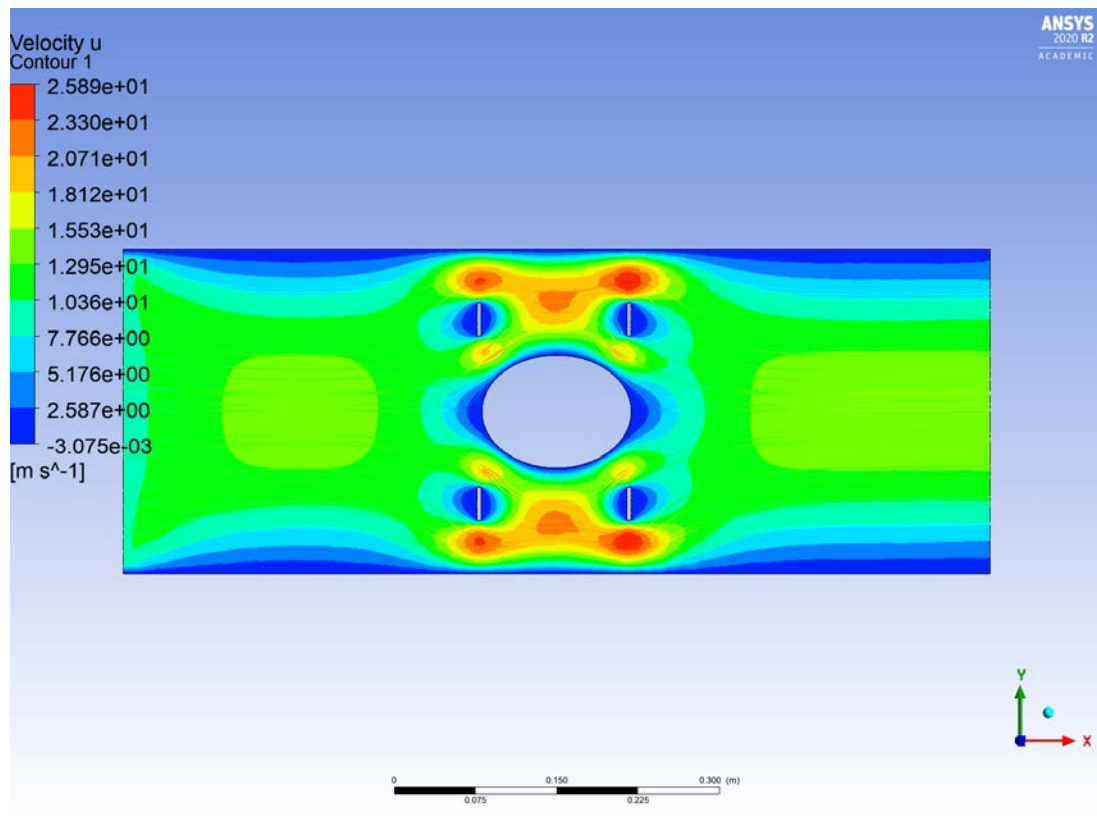


Figura 42: Simulación de patas extendidas en flujo laminar de 10m/s.

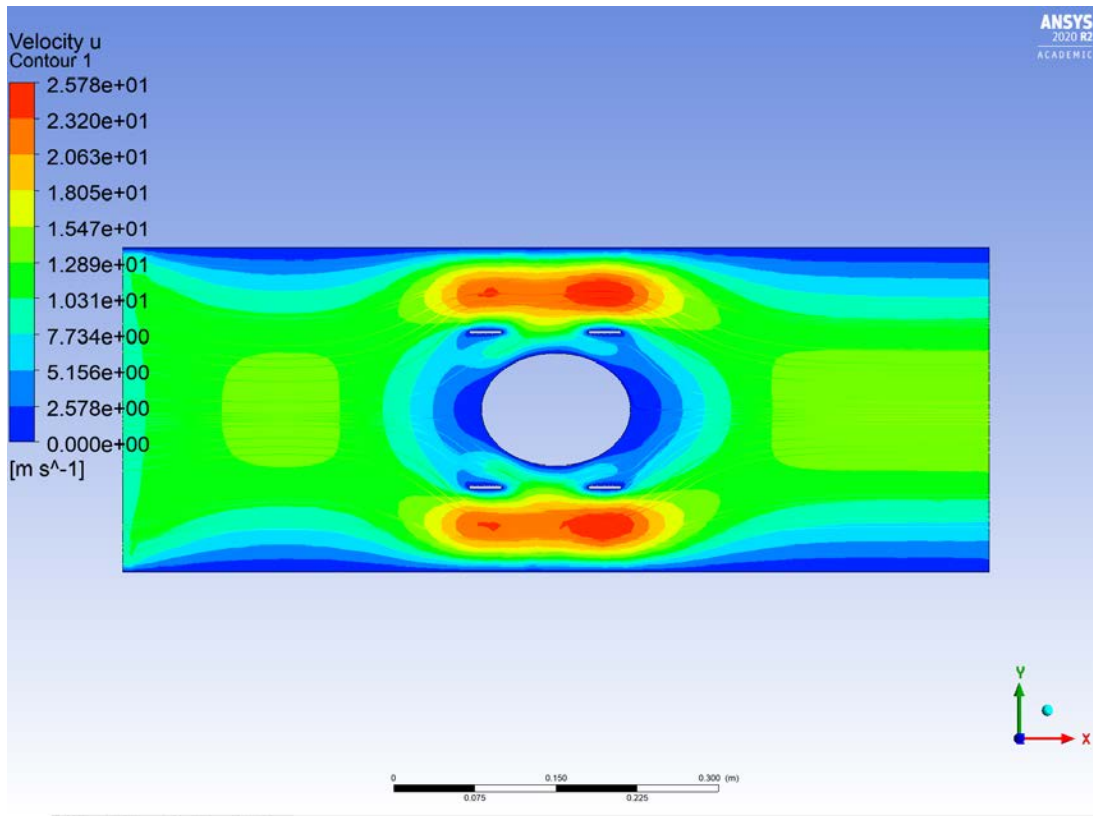


Figura 43: Simulación de patas flexionadas en flujo laminar de 10m/s.

10.3. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre otorgó una referencia de cuánta resistencia tuvieron los diseños de cascos en el medio fluido. Cabe destacar que la simulación se hizo sobre una malla que no es perfecta, y tampoco se deseó que lo sea, ya que el modelo impreso se basa en un modelo con una malla similar. Se obtuvo el coeficiente de arrastre para las patas extendidas, y flexionadas.

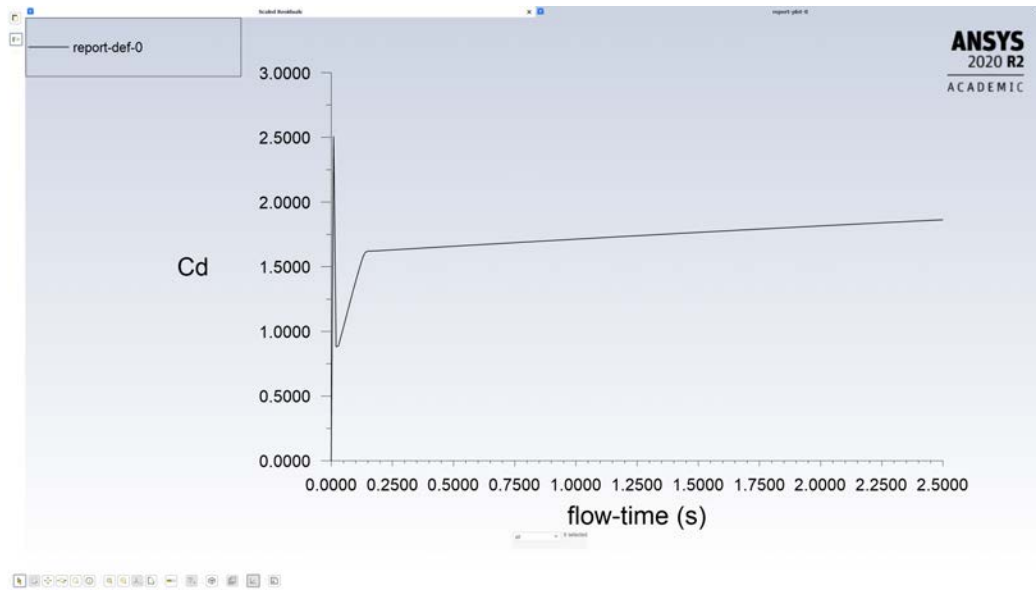


Figura 44: Coeficiente de arrastre, patas extendidas en flujo laminar de 10m/s.

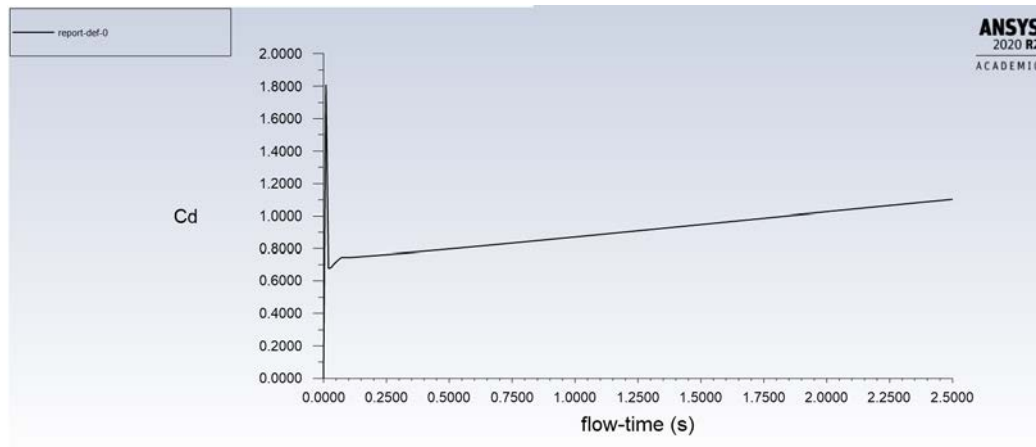


Figura 45: Coeficiente de arrastre, patas flexionadas en flujo laminar de 10m/s.

Puede observarse que para las patas extendidas, que es donde se desea que tenga mayor arrastre para impulsar el casco, se tiene un coeficiente de arrastre entre 1.5 y 1.75. Esto es ideal ya que se buscó que la fuerza de arrastre fuese la mayor al momento de impulsar las patas.

Con las patas flexionadas se obtiene un arrastre de entre 0.7 y 0.9, de igual forma es

efectivo ya se buscó que luego de impulsarse, las fuerzas de arrastre para colocarse en la posición de patas extendidas fuese la menor posible.

10.4. Recapitulación

La forma elíptica generó una menor presión en la dirección de movimiento del flujo a comparación de la forma rectangular utilizada en la fase anterior.

El cambio del coeficiente de arrastre en la simulación al estirar y flexionar las patas comprobó que su funcionamiento es el adecuado.

Diseño y fabricación del casco

En la primera fase se fabricó un casco elíptico en dos dimensiones con material PLA impreso en tecnología FDM, la forma era en parte hidrodinámica pero no se le dio ningún tratamiento al PLA, lo cual ocasionó que el agua se filtrara no solo por el mecanismo de transmisión de potencia sino por las paredes del casco, los sellos no encajaron de forma adecuada debido a que no se tomó en cuenta el margen de error de la impresión FDM. Además, el uso de piezas modulares expuestas al medio acuático generó más puntos vulnerables a filtraciones.



Figura 46: Casco impreso en FDM con material PLA de la fase 1.

En la segunda fase se arreglaron algunos de estos problemas, ya que se decidió por un diseño más integrado para el casco, reduciendo los puntos de filtración vulnerables y se tomó más cuidado con las tolerancias de la impresión. Sin embargo, se desechó el diseño hidrodinámico por mayor facilidad de análisis de control, el mecanismo a prueba de filtraciones basado en O-rings fue básicamente el mismo con mejor implementación de las tolerancias, lo cual generó demasiada fricción. La propuesta a este problema en esta fase fue usar un motor con mayor torque.

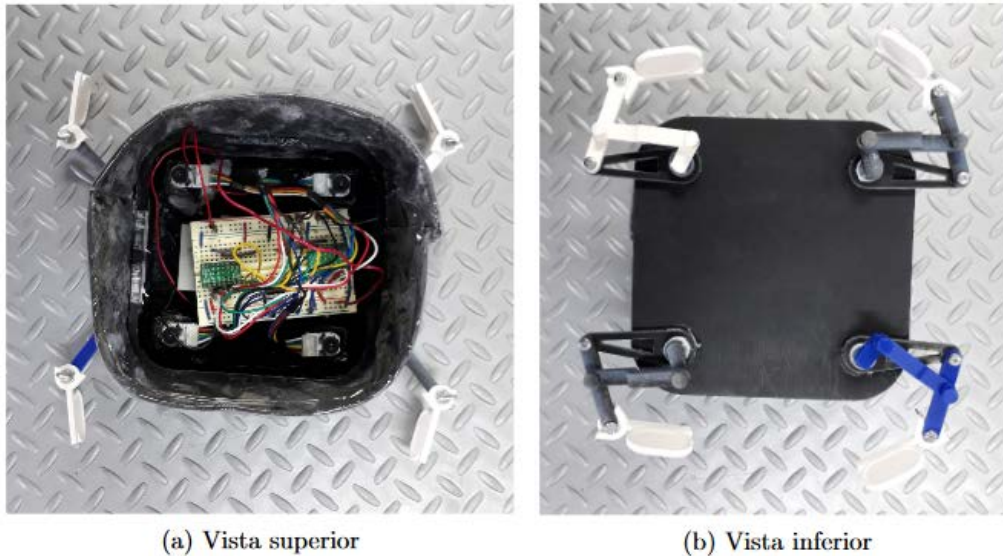


Figura 47: Casco rectangular utilizado en la fase 2.

El casco fue pensado como un diseño de elipsoide para tener la menor resistencia al agua en cualquier dirección, ya que previamente se habló sobre el comportamiento del movimiento del robot, el cual puede ser omnidireccional en un PLANO, se buscó que el diseño incluyera las partes mecánicas como electrónicas. El proceso constó de diseñarlo, fabricar una versión, ajustar por errores, y repetir. Por lo que hubo varias iteraciones del casco.

Todas las iteraciones fueron impresas en FDM con PLA, ya que se realizaron varias pruebas esta fue la opción más rápida y de menor costo. Cuando se obtuvo la versión candidata a final esta fue ligeramente adaptada para su producción en resina, estas adaptaciones son necesarias debido a que las tolerancias de la impresión FDM y SLA son totalmente distintas, si un cojinete caza de manera correcta en FDM es muy posible que quede flojo en la impresión en SLA.

11.1. Primera iteración del casco

La primera iteración constó de un elipsoide con cuatro cilindros, los cuales contenían el diseño de transmisión de potencia previamente realizado, en cada cilindro es posible colocar la pata en distintos ángulos, lo cual pudo emplearse para encontrar la posición más óptima de los remos. Se buscó colocar los motores en posición horizontal y probar los engranajes

helicoidales previamente diseñados.

Se deseó probar el diseño de las patas de fases anteriores con este nuevo diseño, y definir que modificaciones deben realizarse para que se adecuen de mejor manera al nuevo mecanismo de potencia.

11.1.1. Diseño

En esta primera iteración, a excepción de los cuatro motores, no se tomaron en cuenta los dispositivos electrónicos. Esto debido a que durante el proceso aún no había quedado definida la versión final de la PCB. Por lo tanto en esta versión se desea observar qué ajustes había que realizar debido a las tolerancias de la impresión FDM.

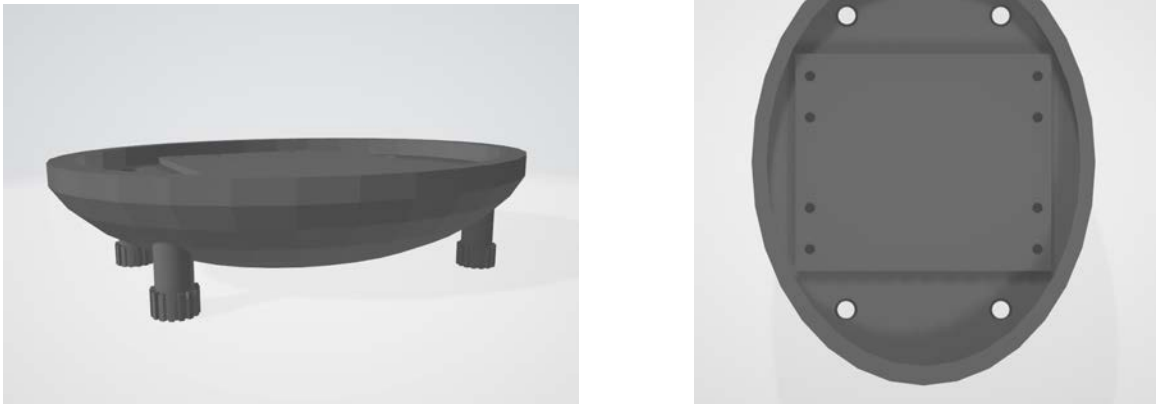


Figura 48: Casco BART iteración 1.

Esta idea de poder modificar el ángulo al que se pueden colocar las patas fue implementada en la fase anterior del proyecto, la cual utilizaba un mecanismo de rosca para poder alterar el ángulo. Sin embargo debido a la naturaleza de movimiento angular de la pata, este no lograba mantener su posición y el propio movimiento enroscaba o aflojaba la pata.

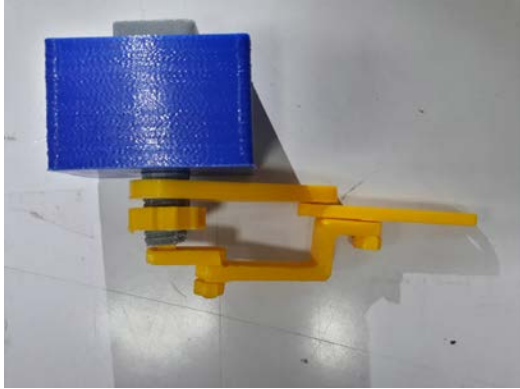


Figura 49: Diseño de la pata en la fase 2.

En esta versión se buscó la misma idea pero implementada de una forma que no permitiese que dicho ángulo cambiase. Para el ensamble se utilizó una forma de engranaje en los cilindros que salen del caso, y un negativo a un tamaño de 110% en la pata, lo cual puede observarse en la Figura 50. La misma fricción entre las piezas de PLA mantiene las piezas juntas.

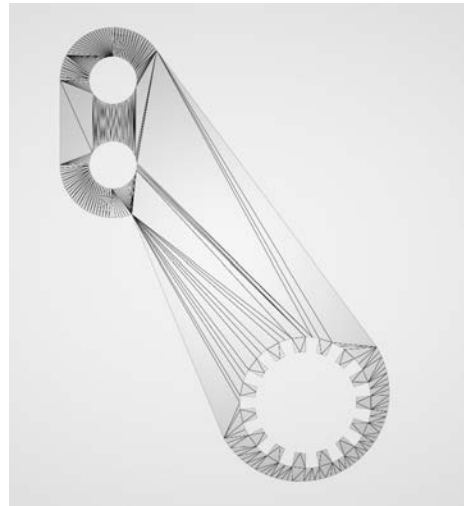
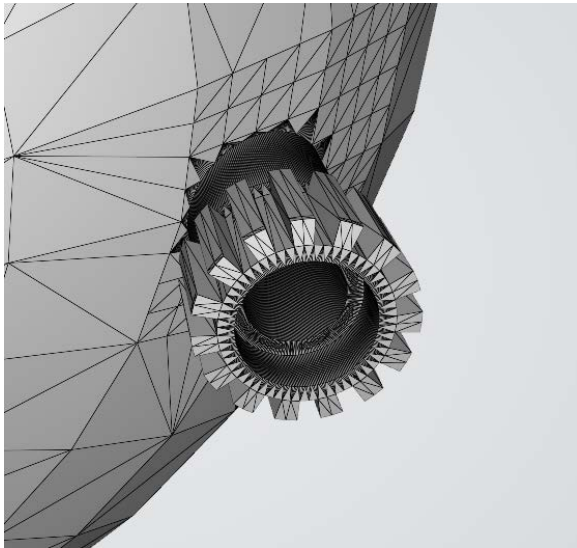


Figura 50: Ensamble de patas BART iteración 1.

11.1.2. Fabricación

La impresión de las partes fue en PLA en FDM, constó de 12 piezas, detalladas en el Cuadro 4.

Pieza	Material	Resolución	Relleno	Costo	Cantidad
casco	PLA	200	20 %	Q23.12	1
motor_holder_long	PLA	200	20 %	Q5.30	2
Right_ARM	PLA	200	20 %	Q1.01	2
Left_ARM	PLA	200	20 %	Q0.99	2
kit_pata	PLA	200	20 %	Q0.72	5

Cuadro 4: Piezas casco iteración 1.

Luego de la impresión se procedió a ensamblar el casco con sus motores, y un mecanismo de transmisión de potencia y una pata ensamblada. Para el eje del mecanismo de potencia se utilizó una barra de acero inoxidable de 3mm de diámetro, dicha barra se cortó a 22mm y en los extremos limados en orientación perpendicular 5mm en un extremo y 8mm en otro extremo.

Estas partes PLANas debían de encajar con los engranajes y con la manivela de las patas para que el movimiento rotatorio no deslizara la barra en estas piezas.

No se encontró dificultad al imprimir las piezas de la primera iteración del casco que requirieran una modificación en el modelo. En las patas a la derecha del casco pudo notarse que no están paralelas a las de la izquierda (Figura 51), esto se debe al engranaje que se utilizó para modificar el ángulo de la pata.

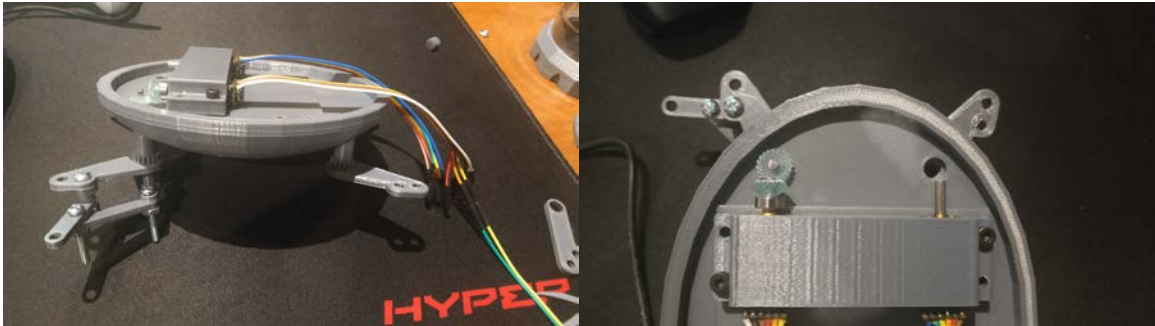


Figura 51: Patas ensambladas en la iteración 1 del casco.

Los cojinetes entraron con suficiente presión para mantenerse en su lugar sin necesidad de ningún pegamento o estructura adicional.

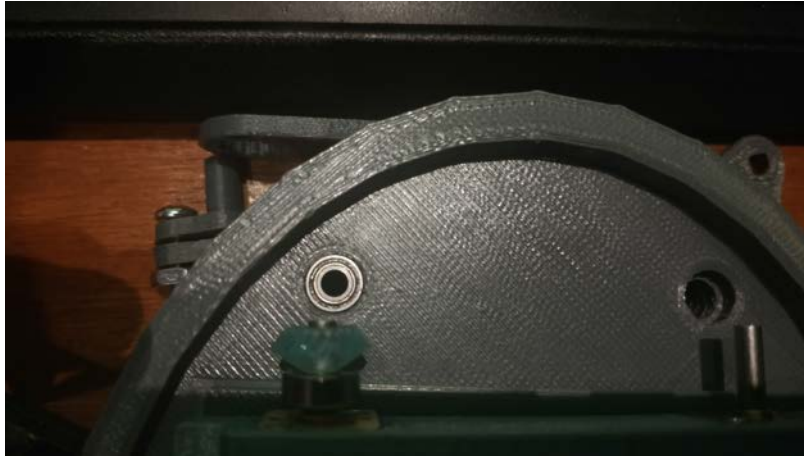


Figura 52: Tolerancia cojinete

La barra lisa fue limada a mano, sujeta en una prensa de banco y probando cada cierto tiempo su ensamble con los engranajes, la parte limada más corta corresponde al engranaje, y la más larga al acople con la pata.



Figura 53: Eje rotacional fabricado.

El engranaje que se ubica en horizontalmente en el casco quedó muy cerca de la orilla del mismo, como puede observarse en la Figura 54b, lo cual podría ocasionar una zona de convergencia donde cables, basura, etc. podría quedar atrapada e interrumpir el movimiento del engranaje. También fue un riesgo para el operario a momentos de hacer pruebas.

Como puede observarse en la Figura 54a, los engranajes aún no se encuentran bien alineados, lo que ocasionó un funcionamiento no deseado, como un torque innecesario para el motor y un desgaste en los engranajes.



(a) Engranajes desalineados.

(b) Engranaje cerca del borde del casco.

Figura 54: Problemas con los engranajes.

Al colocar los motores pudo observarse que no queda espacio restante para los componentes electrónicos, por lo que en la segunda iteración del casco debió de encontrarse un espacio para la batería.

11.1.3. Recapitulación

La forma general del casco permaneció igual, sin embargo debe de hacerse más espacio libre entre el engranaje y el casco para eliminar la zona de convergencia. Debe ajustarse la ubicación de los motores para que los engranajes cacen de manera correcta y así eliminar el funcionamiento no deseado, y debe de hacerse lugar para un porta batería.

Debe modificarse el ángulo de la junta entre la pata derecha y el casco para que ambos lados de las patas sean simétricos.

El ensamble de los cojinetes dentro del mecanismo de transmisión de potencia resultó satisfactorio y no se observó ninguna razón por la cual fuese necesario modificar esa parte del diseño.

11.2. Segunda iteración del casco

La segunda iteración se dio para arreglar los problemas mencionados en la sección anterior, así como agregar las funcionalidades necesarias para hacer la primera prueba en el agua. Se tuvo que agregar un compartimiento en el casco para colocar la batería, por tamaño y peso se debía colocar una única batería 18650 de alta capacidad.

Se rediseñaron las articulaciones de la pata para que llevaran cojinetes. En fases anteriores el mecanismo de 4 barras de las patas dependía de la fricción entre las piezas impresas en PLA, lo cual generaba una fricción sobre los tornillos que mantenían estas articulaciones unidas. Dicha fricción en el tornillo ocasionaba que pudieran aflojarse haciéndolo inestable y desalineando los ejes de rotación.

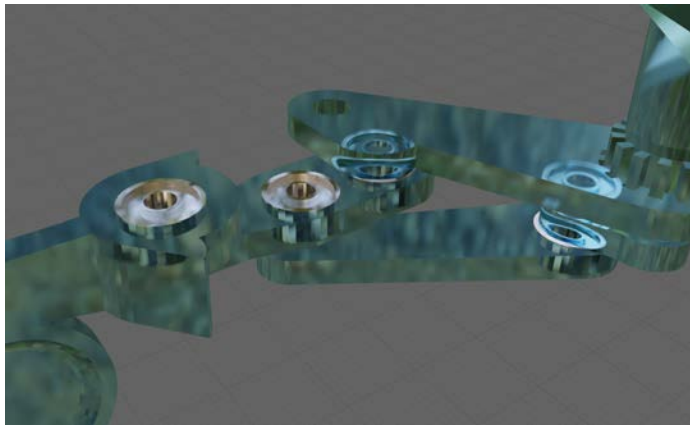


Figura 55: Cojinetes en las articulaciones de las patas.

Los cojinetes utilizados son de acero inoxidable 8mm OD, 3mm ID y 3mm Altura. Dichos cojinetes fueron colocados en los puntos de contacto de las varias piezas del mecanismo de 4 barras, lo cual redujo la fricción considerablemente.

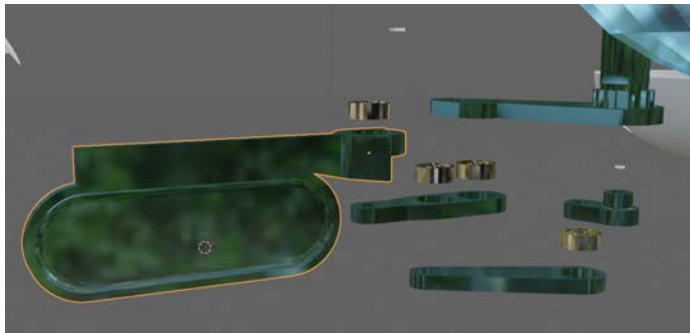


Figura 56: Ensamble de la pata.

Entre el cojinete y la pieza impresa tenía que ir una roldana que toque la parte de radio menor del cojinete, pero no la parte exterior. En este caso no se consiguieron de este tamaño, por lo que se tomaron varias roldanas en un tornillo, sujetas firmemente y luego colocadas

sobre un barreno, para limarlas y reducirlas al tamaño deseado. Esta no es una práctica recomendada, lo correcto sería utilizar roldanas del tamaño correcto o utilizar un torno y herramientas de sujeción adecuadas para la tarea.

Esta segunda iteración llevó el tratamiento de barniz que resultó eficaz cuando se realizaron pruebas en el mecanismo de transmisión, también se consideró el uso de distintos tratamientos como utilizar resina fotocurable como recubrimiento.

Se buscó hacer esta segunda iteración más modular, para darle atención a cada parte por separado y permitir modificar partes pequeñas del robot sin necesidad de volver a fabricar el casco completo.

11.2.1. Diseño de la segunda iteración

Se inició solucionando el problema de los engranajes. En el engranaje grande se agregó 1mm de altura en el centro donde interactúa con el cojinete, esto para evitar el rozamiento sobre otras partes del casco. Al engranaje pequeño se le agregó 5mm al eje que casa en el motor para que mantenga su posición exacta con el engranaje grande.

Estos ajustes debían permitir un movimiento más fluido y seguro para el mecanismo de potencia.

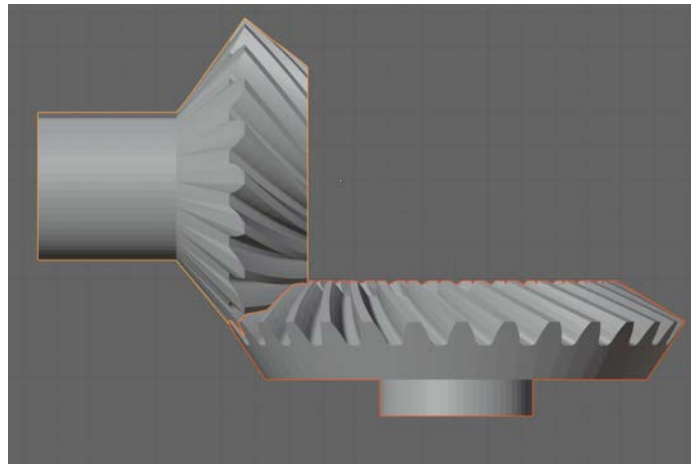


Figura 57: Modificación a engranajes.

También se redujo el ancho del borde sobre la parte superior del casco para dar lugar al movimiento de los engranajes y eliminar la zona de convergencia. Se separó la pieza base sobre la que se colocan los motores para poder modificar su altura de una manera sencilla.

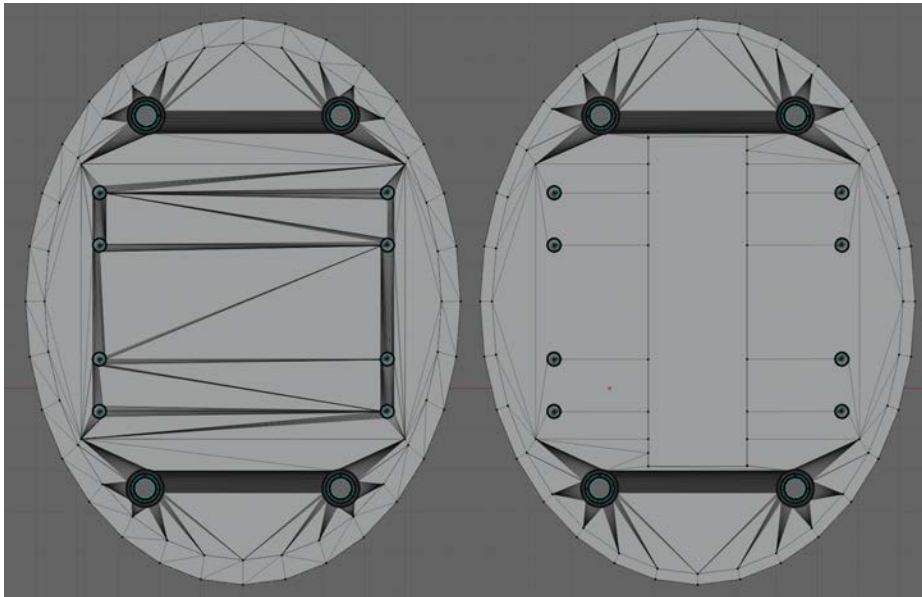


Figura 58: Ajustes al casco, iteración 1 izquierda, iteración 2 derecha

Se agregó un compartimiento cubico de $21.88mm \times 80mm \times 24mm$ para colocar una única batería 18650 de alta capacidad con su porta-batería debajo de los motores. Se dejó espacio para los cables del porta-batería. Debido a la proximidad de este compartimiento con las paredes del casco, esta zona debe ser tratada internamente por la vulnerabilidad que tiene y por el riesgo que generan las baterías de Li-po.

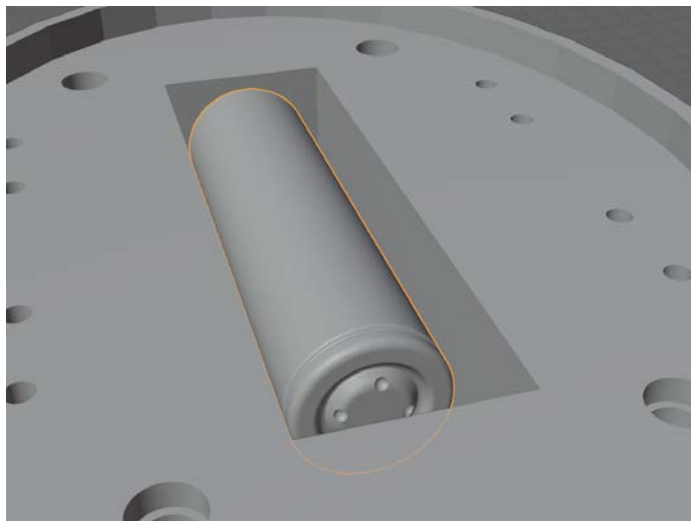


Figura 59: Compartimiento batería.

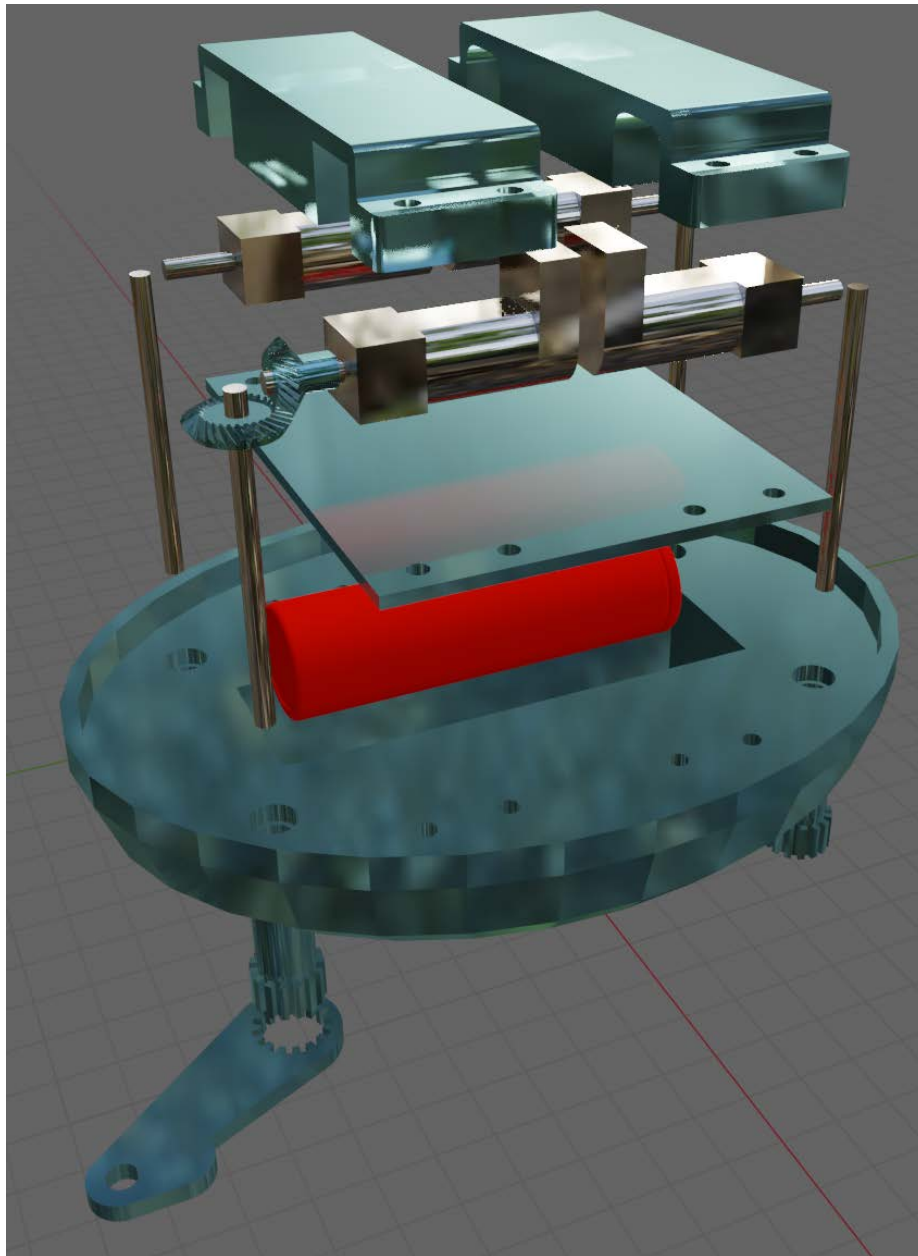


Figura 60: Diseño modular.

11.2.2. Fabricación de la segunda iteración



Para la segunda iteración la impresión del casco tomó 9 horas con 49 minutos. Esta vez se utilizaron 4 perímetros en vez del estándar de 2.

Pieza	Material	Resolución	Relleno	Costo	Cantidad
casco_v2	PLA	200	20 %	Q29.25	1
motor_base	PLA	200	20 %	Q3.36	1
kit_pata_v2	PLA	200	20 %	Q0.68	5

Cuadro 5: Piezas utilizadas para la segunda iteración del casco.

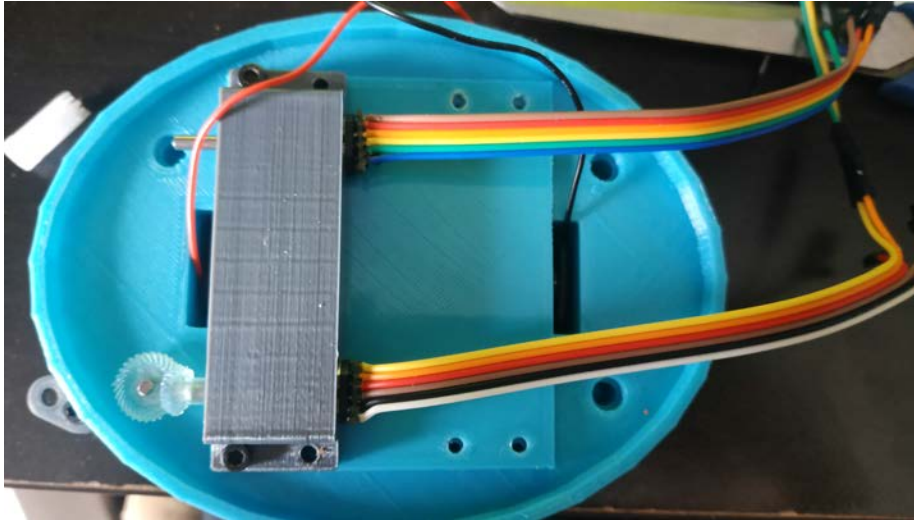


Figura 61: Casco iteración 2.

Las piezas fabricadas en la primera iteración, como los engranajes y las patas, no presentaron ningún problema al ensamblarse con el casco en su segunda iteración. El porta batería encajó de manera correcta y con espacio necesario para los cables. El diseño modular no perjudicó el funcionamiento del mecanismo de potencia.

Los tornillos que sujetan las piezas que aseguran los motores se enroscan en el PLA, por lo que estos agujeros son propensos a perder su rosca. Por lo tanto se utilizaron tuercas insertadas con calor, son insertadas sobre el plástico con un cautín, haciendo maleable el plástico, el cual luego regresó a su forma sólida sujetándose al plástico firmemente. Para esto fue necesario hacer los agujeros de 3mm sobre el plástico a 4mm, dado que se emplearon 4 perímetros en la impresión, a 0.4mm de grosor de cada perímetro, por lo que se tuvo 3.2mm extras de diámetro, por lo que fue posible utilizar una broca de 4 mm y luego insertar las tuercas con el cautín.



Figura 62: Tuercas insertadas con calor.

El diseño con cojinetes funcionó de manera adecuada, con un movimiento más suave y con menor torque en los motores y con mayor estabilidad en el movimiento.



Figura 63: Movimiento de la pata.

11.2.3. Recapitulación

Los cojinetes en las patas permitieron un movimiento con mejor fricción.

Las tuercas insertadas con calor dieron una mayor fiabilidad al sistema y evitaron que se aflojaran las piezas.

El uso de PLA impreso en FDM con recubrimiento de barniz y la propuesta de la caja de relleno resultó satisfactoria sin encontrar filtraciones en las pruebas realizadas, donde se sumergieron por más de 8 horas. Con lo cual cumplimos con el objetivo general planteado.

Se fabricó un mecanismo capaz de transmitir la potencia de los motores al eje interno de la caja de relleno. Se utilizó tecnología FDM para la caja de relleno y SLA para fabricar los engranes. Esto lo hace fácil de reproducir en impresión 3d.

Se definió que lo ideal es utilizar PLA en impresión FDM para el casco debido al volumen de impresión necesario, y utilizar un tratamiento de barniz para evitar filtraciones por el material. La resina fue utilizada en impresión SLA para los engranes debido al detalle y escala de las piezas.

La resina resultó ser un material a prueba de filtraciones sin necesidad de un tratamiento posterior, sin embargo, su elevado costo y limitante de tamaño debido a la impresora utilizada no permitió la fabricación de un casco completo.

Se comprobó gracias a las simulaciones realizadas que la forma elipsoidal del casco permite un menor coeficiente de arrastre, así como que el mecanismo de movimiento de las patas permite un impulso con un coeficiente de arrastre elevado y al momento de flexión un coeficiente de arrastre menor.

Se sugiere la impresión del casco completamente en resina, esto no fue posible en esta fase debido al volumen limitado de fabricación de la impresora de resina utilizada en este proyecto. Con el avance rápido de esta tecnología se predice que en uno o dos años será posible obtener impresoras SLA con un mayor volumen de impresión.

Uno de los siguientes avances en la plataforma BART debería ser el poder sumergirse dentro del agua, deberán estudiarse las tecnologías necesarias para esto y si pueden ser escaladas al casco actual.

Se sugiere estudiar la reacción de los materiales a estar expuestos a largo plazo en el agua y bajo el sol. Qué colores del material podrían evitar la degradación debido a la exposición UV y si distintos tipos de agua, como agua salada en el mar, o contaminada podrían tener un efecto adverso sobre los materiales propuestos.

-
- [1] J. E. Cruz Ubeda y col., “Megaproyecto "BART": diseño e implementación de un robot acuático bio-inspirado de nado superficial”, 2017, unpublished.
 - [2] Y. N. Meléndez Ovando, “BART (Bio-Inspired Aquatic Robot): Prototipo de un robot acuático bio-inspirado para nadar omnidireccionalmente”, 2018, unpublished.
 - [3] D. Casey. (2020). Servicing Your Stuffing Box, dirección: <https://www.boatus.com/boattech/casey/stuffing-box.asp> (visitado 24-05-2020).
 - [4] H. G. Williams, “Stuffing Box”, pat. estadounidense 517 509.
 - [5] U. D. of Agriculture, *Simple Plumbing Repairs in the home*, 1948.
 - [6] L. Wallach y N. Kloski, *Make: Getting Started with 3D Printing*, ép. Make. Maker Media, Inc., 2016, ISBN: 9781680450200.
 - [7] F. Shore Albert, “Apparatus for Measuring the Hardness of Materials”, pat. estadounidense 1 770 045.
 - [8] M. B. S. Limited. (2020). Shore a Hardness, dirección: <https://www.barnwell.co.uk/shore-a-hardness/> (visitado 24-05-2020).
 - [9] N. D. T. Org. (2014). Tensile Properties, dirección: <https://web.archive.org/web/20140216090902/http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Tensile.htm> (visitado 24-05-2020).
 - [10] G. Ponce. (2019). What is CAD Design - Simply Explained, dirección: <https://all3dp.com/2/what-is-cad-design-simply-explained/> (visitado 09-09-2020).
 - [11] H. Fågnell. (2018). Solid, Surface and mesh 3D Design Formats Explained, dirección: <https://3dprinterchat.com/solid-surface-and-mesh/> (visitado 09-09-2020).
 - [12] A. B. Varotsis, “Understand and fix common STL file errors”, *3D Hubs*, dirección: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fixing-most-common-stl-file-errors/>.
 - [13] L. Carolo. (2020). What is a 3D slicer? - Simply Explained, dirección: <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/> (visitado 09-09-2020).

- [14] W. B. Wright. (2018). IV: Slicing, dirección: <https://medium.com/3d-printing-in-o-p/iv-slicing-72a9515f44bc> (visitado 09-09-2020).
- [15] D. Chakravorty. (2019). STL File Format (3D printing) - Simply Explained, dirección: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/> (visitado 09-09-2020).
- [16] I. H. Shames, *La mecánica de los fluidos*. McGraw-Hill, 1962, ISBN: 0070563896.
- [17] R. A. Young Hugh D. - Freedman, *Física Universitaria Volumen 1*. Pearson, 2009, ISBN: 9786074422887.
- [18] E. J. Tlazalo, “Calculo y Diseño de Engranés Helicoidales”, *Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana*, feb. de 2011.
- [19] Lulzbot. (2020). TAZ 6, dirección: <http://download.lulzbot.com/TAZ/6.02/> (visitado 30-08-2020).
- [20] E. Inc. (2020). Elegoo 3D Rapid Resin LCD UV-Curing Resin 405nm ABS Photopolymer Resin for LCD 3D printing, dirección: <https://www.elegoo.com/product/elegoo-3d-rapid-resin-lcd-uv-curing-resin-405nm-standard-photopolymer-resin-for-lcd-3d-printing-1000gram-clear-green/> (visitado 24-05-2020).
- [21] Blender Foundation, *Blender*, ver. 2.8, 19 de mayo de 2020. dirección: <https://www.blender.org/>.
- [22] GadgetGuru314. (2020). Motor Holder, dirección: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/> (visitado 30-07-2020).
- [23] Ansys Inc., *Ansys*, ver. 2020 R2, 19 de mayo de 2020. dirección: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno, es un plástico muy resistente al impacto y muy utilizado en automoción o impresión 3D. 26, 28, 33

AutoCAD: Software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D. Actualmente desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. 18

CAD: Diseño asistido por computadora, es el uso de ordenadores para ayudar en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño. 18, 20, 30

CATIA: Es un programa de diseño fabricación e ingeniería asistida por computadora. 18

DLP: Es un proceso de impresión SLA por medio de un proyector DLP *Digital light processing*. 16, 28, 32

FDM: Modelado por deposición fundida, es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y producción a pequeña escala. 25, 32, 33, 35, 37, 38, 40, 42, 44, 46, 55–57, 59

LCD: Pantalla de cristal líquido, es un apantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos. 16

Li-po: Batería de polímero de iones de litio. 64

nozzle: Boquilla de diámetro específico utilizada para extruir el material fundido en el proceso de impresión 3D FDM. 26, 33, 44

O-rings: Junta de forma toroidal, habitualmente de goma, cuya función es la de asegurar la estanqueidad de fluidos. 5, 7, 35, 56

Object 30 Prime: Impresora 3D diseñada y fabricada por Stratasys. 4

OS: Sistema operativo, es el software principal o conjunto de programas de un sistema informático que gestiona los recursos del hardware. 26, 28

PETG: Es el más común de los polímeros termoplásticos, comúnmente utilizado en botellas plásticas. 26

PLA: Ácido poliláctico es un polímero con elementos similares al ácido láctico. Se utiliza ampliamente en la impresión 3D. 26, 29, 32, 33, 35, 37, 38, 40, 42, 45, 46, 55, 56, 58, 59, 62, 66

RepRap: RepRap es un proyecto iniciado en Inglaterra en el año 2005 con la iniciativa de desarrollar una impresora 3D de bajo costo. 14

SLA: Estereolitografía, es una de las tecnologías para la manufactura aditiva en la impresión 3D. Es una fabricación óptica, de foto-solidificación . 26, 27, 32, 33, 35, 37-39, 41, 44, 56

Slicer: Es un software utilizado en la mayoría de procesos de impresión 3D para la conversión de un modelo 3D a instrucciones especiales para la impresora. 20, 26, 28, 30-32

TPU: Poliuretano termoplástico, es un polímero elastomérico lineal. Se caracteriza por su alta resistencia a la abrasión, al oxígeno, al ozono y a las bajas temperaturas. 26

Ultimaker 3: Es una impresora FDM diseñada y creada por Ultimaker BV. 4

UV: Ultravioleta, Es la onda electromagnética con longitud de onda entre 10nm y 400nm. 16, 26, 27, 39, 71