



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Colector de muestras  
biológicas de estrellas de  
mar**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Jorge Francisco Ramírez Castañón

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Gustavo Adolfo Medina Tanco



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022**

# 1. Contraportada

## 1.1. Agradecimientos

Al Laboratorio de Instrumentación Espacial (LINX) del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, por permitir mi formación profesional y otorgarme el acceso al equipo de manufactura aditiva durante la realización de este proyecto.

Al programa de apoyos a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica para llevar a cabo el proyecto PAPIIT-IN207021, Tapetes microbianos y microbioma de Asterinides spp., a través de su dinámica y función en la cueva El Aerolito, Cozumel, Quintana Roo., México.

Al Dr. Gustavo Medina Tanco por la confianza otorgada para trabajar en representación de LINX, además de las asesorías, ideas y apoyo económico brindado al proyecto.

A los biólogos, Dra. Nathalie Roberte Chantal Cabirol, Dr. Francisco Alonso Solís Marín por la confianza, comentarios, observaciones y apoyo otorgado tanto para el proyecto de investigación así como para la realización de este trabajo escrito.

A los buzos Fernando Calderón Gutiérrez y Sarah Rubelowsky por su apoyo en la recolecta de campo, el registro fotográfico realizado, el uso de los dispositivos presentados en este trabajo y por compartir su experiencia con ellos.

A mi familia por su apoyo y paciencia durante todo el proceso que conllevó este trabajo.

A mi mejor amiga Diana Paulina Márquez López por su apoyo, revisiones y consejos que me otorgó a través de muchas llamadas telefónicas y videoconferencias para la realización de este trabajo.

# Índice

<b>1. Contraportada</b>	<b>2</b>
1.1. Agradecimientos . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Estudio de nuevas estrellas de mar <i>Asterinides cf. pompom</i> . . .	5
2.1.1. Características . . . . .	5
2.1.2. Localización geográfica . . . . .	5
2.1.3. Interés científico . . . . .	7
2.1.4. Hábitat . . . . .	8
2.1.5. Problemas asociados a la recolecta de muestras . . . . .	10
2.2. Mediciones a tomar . . . . .	10
2.3. Objetivo . . . . .	11
2.3.1. Objetivo general . . . . .	11
2.3.2. Objetivos específicos . . . . .	11
2.4. Justificación . . . . .	11
2.5. Hipótesis . . . . .	11
<b>3. Planteamiento del diseño</b>	<b>12</b>
3.1. Suposiciones básicas . . . . .	12
3.2. Requerimientos y limitaciones . . . . .	13
3.3. Disponibilidad de materiales y métodos de manufactura . . . . .	14
<b>4. Diseño y desarrollo</b>	<b>17</b>
4.1. Interpretación de las necesidades . . . . .	17
4.2. Generación de conceptos . . . . .	17
4.3. Diseño final en CAD . . . . .	35
4.4. Selección del método de manufactura . . . . .	36
4.4.1. Tiempos y costos de manufactura . . . . .	36
4.5. Manufactura y ensamble del contenedor . . . . .	37
<b>5. Pruebas de funcionamiento</b>	<b>40</b>
5.1. Pruebas en laboratorio . . . . .	40
5.2. Pruebas de campo . . . . .	41
5.3. Observaciones y áreas de oportunidad . . . . .	42
<b>6. Rediseño con base en la retroalimentación de campo</b>	<b>43</b>
6.1. Proceso de rediseño . . . . .	43
6.2. Modificaciones en los parámetros de impresión . . . . .	43
6.3. Experimentación con los parámetros de impresión . . . . .	44
6.3.1. Introducción . . . . .	44
6.3.2. Objetivo . . . . .	44
6.3.3. Materiales y equipamiento necesario . . . . .	44
6.3.4. Requerimientos previos . . . . .	44
6.3.5. Desarrollo . . . . .	44

6.3.6. Resultados . . . . .	45
6.3.7. Conclusiones . . . . .	46
<b>7. Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>49</b>



## 2. Antecedentes

### 2.1. Estudio de nuevas estrellas de mar *Asterinides* cf. *pompom*

#### 2.1.1. Características

Las estrellas de mar *Asterinides* cf. *pompom* son endémicas al sistema de cuevas submarinas ubicadas en el cenote *El Aerolito*, al oeste de la isla mexicana de Cozumel. Dentro de este sistema de cuevas no existen depredadores naturales que amenacen a estos especímenes, por lo que se han encontrado especies de equinodermos que han alcanzado grandes tamaños. Sin embargo, las estrellas de mar *Asterinides* cf. *pompom* han mantenido un tamaño reducido en comparación a estas otras especies vecinas. Estos organismos tienen una forma pentagonal, la cual tiene un diámetro que varía entre  $\varnothing = 10$  y  $\varnothing = 25[mm]$ , mientras que su altura oscila entre  $h = 3$  y  $h = 10[mm]$ .

Dado que este organismo habita en lo recóndito de dicho sistema cavernoso, la luz solar es inexistente, lo cual ocasionó que perdiera la pigmentación que originalmente tenían sus antepasados, resultando en una estrella de mar albina. Además todas sus superficies visibles están cubiertas de espinas [1], tal como se muestra en la figura 1.

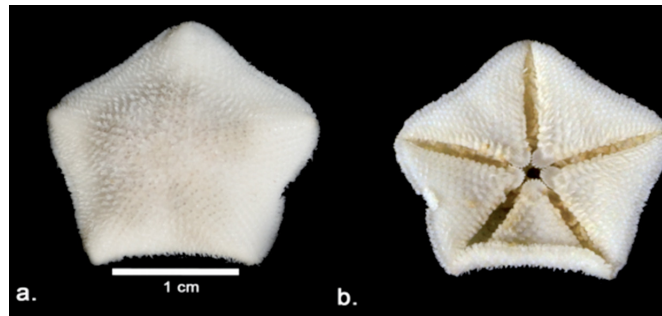


Figura 1: Fotografía de un ejemplar de *Asterinides* cf. *pompom* con escala como referencia.

#### 2.1.2. Localización geográfica

Ubicado en la isla mexicana de Cozumel, a poco menos de 6 km al suroeste de la ciudad de “San Miguel de Cozumel”, se encuentra ubicado un cenote conocido como *El Aerolito*. Este cuerpo de agua se encuentra en las coordenadas  $20^{\circ}27'58''N$ ,  $86^{\circ}58'41''O$ , a unos escasos metros de una carretera vehicular, como se muestra en la figura 2.



Figura 2: Fotografía satelital obtenida con Google Earth de la isla de Cozumel. Al sur de la ciudad de San Miguel de Cozumel se muestra la ubicación del cenote *El Aerolito* mostrado con un marcador amarillo.

Por otro lado, el cenote de *El Aerolito* se encuentra conectado a un sistema de cuevas submarinas que se extiende 18km bajo tierra [2]. La zona en donde habitan las estrellas de mar *Asterinides* cf. *pompom* se encuentra dividido en dos zonas de muestreo, las cuales se conocen como “Side D” y “Wonderland”. El sistema de cuevas se puede visualizar mejor en la figura 3. El tiempo promedio que le toma a un buzo entrar al cenote, llegar a alguno de los sitios de muestreo y regresar es de hora y media.

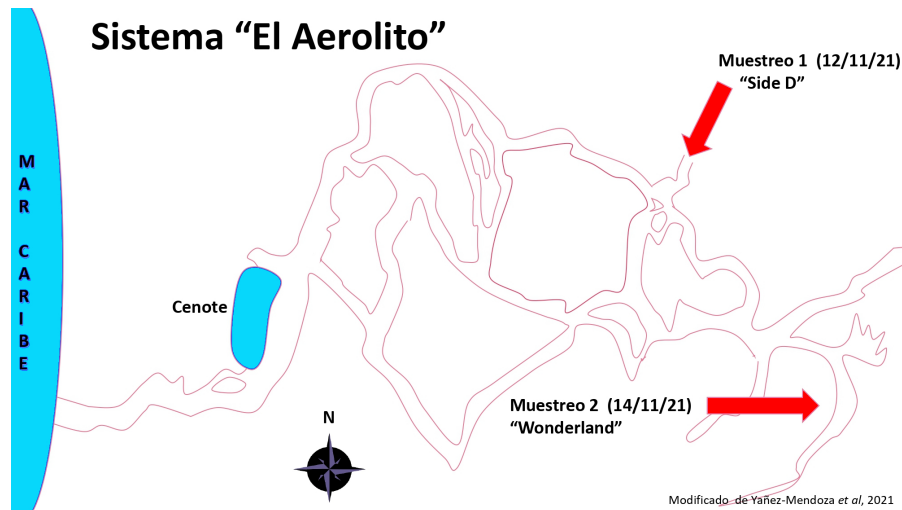


Figura 3: Ilustración del sistema de cuevas submarinas que se encuentran en los alrededores de *El Aerolito*. Con las flechas rojas se muestran los sitios de muestreo en donde se tomaron las muestras biológicas de las estrellas de mar *Asterinides cf. pompom*.

### 2.1.3. Interés científico

En 2004 el buzo espeleólogo Germán Yáñez dio aviso al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM sobre el hallazgo de múltiples organismos dentro del sistema de cavernas del cenote *El Aerolito*. Dentro de estos especímenes se encontraban alrededor de 23 especies distintas de equinodermos, muchos de ellos únicos en el mundo [1]. El hecho de encontrar organismos viviendo dentro de una cueva llamó la atención de los biólogos, ya que estos animales simétricos y con espinas en la piel solo viven en el mar y no en este tipo de ecosistemas. La vida cavernícola implica condiciones extremas tales como la ausencia de luz, una baja cantidad de oxígeno en el agua y temperaturas bajas. Por todas las condiciones previamente estipuladas es que existe una escasez de alimento en este tipo de ambientes [3].

Por esto último es que el propósito principal de la expedición consistió corroborar la teoría que estipula que la principal fuente de alimentación de las especies que habitan estos lugares se basa en una capa de bacterias que permea las paredes de las cuevas [4]. Por otro lado, el propósito complementario de esta expedición consistió en determinar la especie de las estrellas de mar de interés por medio de pruebas de ADN. Esto último es debido a que las estrellas de mar de interés fueron denominadas como *Asterinides cf. pompom*, en donde *cf.* significa que se parece a la especie *A. pompom*, pero que puede o no ser de dicha especie.

Existen pocos estudios sobre la adaptación a la vida cavernícola [4]. El troglomorfo es una adaptación que llevan a cabo los seres vivos que habitan en

estos ambientes, pero es una adaptación estudiada principalmente en artrópodos y vertebrados de cuevas acuáticas y terrestres, mas nunca en equinodermos exclusivos de cuevas [3]. Todo esto ha convertido al cenote *El Aerolito* en un laboratorio natural en donde los biólogos pueden observar como es que más de 100 invertebrados marinos que entraron hace cientos o miles de años han evolucionado, adaptado y separado reproductivamente de sus antepasados que habitan en el mar [1].

*El Aerolito* cuenta con cerca de 1.8km de canales y reservorios subacuáticos, los cuales ayudan a aislar las cuevas del medio ambiente que lo rodea, pero a pesar de esta ventaja, las especies que habitan dentro de este ecosistema se encuentran amenazadas. Esto se debe a problemas de contaminación relacionadas con la basura, el diésel de las embarcaciones, así como el buceo espeleológico sin control [1] causado por complejos turísticos que se han desarrollado en las zonas aledañas a este sitio. Otra amenaza presente para este ecosistema proviene de los fertilizantes que se utilizan en los campos de golf de dichos complejos turísticos, los cuales permean hasta la cueva marina, y a largo plazo podrían modificar el hábitat de estas especies endémicas [3]. Esto crea un sentido de urgencia en el estudio tanto de estas estrellas así como de los organismos que habitan en este sitio, ya que la idea es estudiar su ecosistema y su estilo de vida con tal de crear un plan de acciones que permita salvarlas de una posible extinción.

#### 2.1.4. Hábitat

Las estrellas de mar que se estudiaron fueron encontradas en un sistema de cuevas submarinas, las cuales se pueden acceder por medio del cenote *El Aerolito*. Los cenotes se pueden definir como depósitos de agua manantial ubicados en depresiones geológicas. Debido a las características geográficas de Yucatán, el suelo esta formado por roca caliza, lo que con ayuda del tiempo así como de grandes precipitaciones que recibe la zona ha ocasionado que dicha roca se deslave, generando así un sistema de cavernas subterráneas interconectadas entre sí ya sea por túneles o por ríos subterráneos [5].

Su hábitat se considera como un ambiente extremófilo. Esto gracias a que estas estrellas de mar habitan a 17.5m de profundidad, en donde la luz solar es inexistente y la presión del agua es equivalente a 2atm. Esto último se debe a que se trata de una cueva anquihalina, llamada así por tener agua marina en la parte inferior y salobre en la superior [1], en donde la división entre estas dos capas se encuentra a 7m de profundidad. Otros parámetros del sitio de muestreo se mantienen relativamente constantes durante el resto del año, tales como la temperatura que oscila alrededor de los 29°C y el pH que promedia en 7.8. Toda esta información se puede observar de manera gráfica en la figura 4. De igual manera se puede apreciar un buzo estudiando las estrellas de mar en su hábitat en la figura 5.

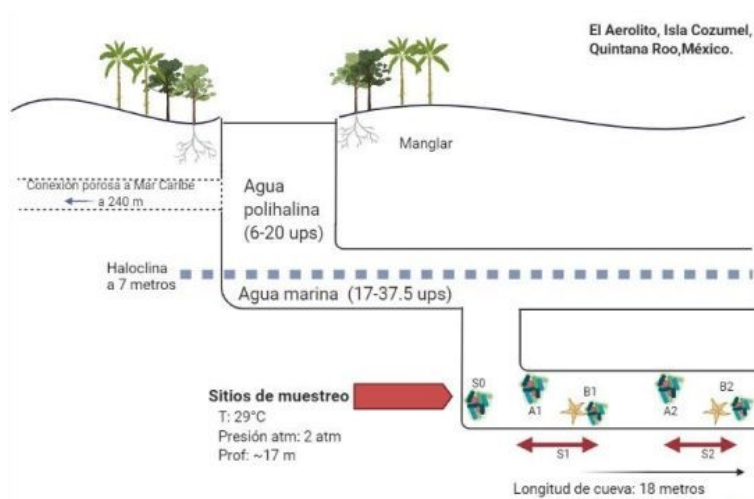


Figura 4: Diagrama que muestra una vista transversal simplificada del sistema de cuevas ubicado en *El Aerolito*.

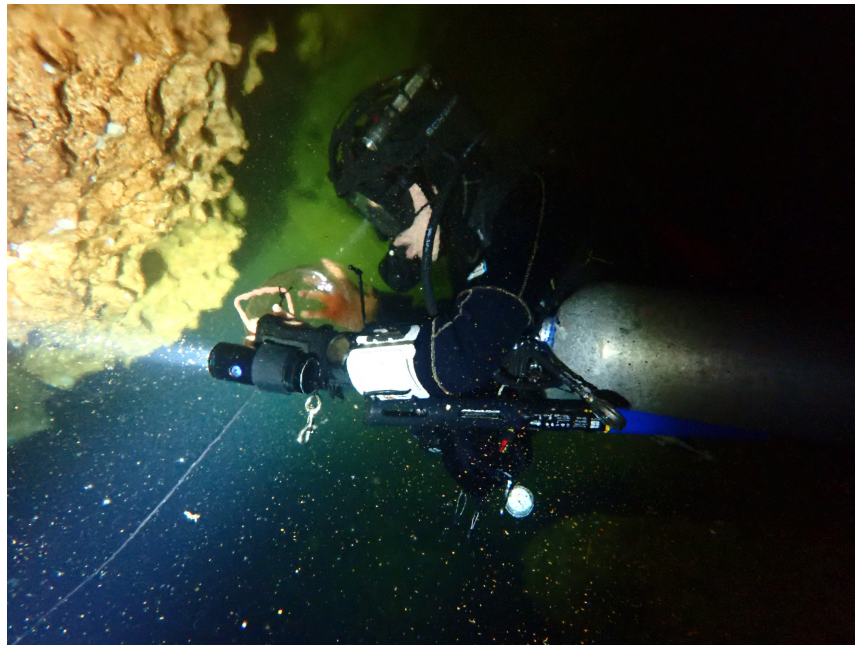


Figura 5: Fotografía de un buzo recolectando muestras del agua frente a una pared rocosa en donde habitan diferentes ejemplares de la estrella de mar *Assterinides* cf. *pompom*, dentro del sistema de cuevas de *El Aerolito*.

### 2.1.5. Problemas asociados a la recolección de muestras

El primer problema que surgió al intentar recolectar muestras biológicas de las estrellas de mar *Asterinides cf. pompom* proviene del hecho de que se desconoce la fragilidad del ecosistema en donde habitan. Con base en las observaciones de los biólogos, la población de estas estrellas de mar es bastante reducida, ya que oscila entre tan solo 256 y 352 estrellas de mar. Todo esto implicó en tomar la decisión de que los especímenes no se pueden retirar y sacrificar en un laboratorio, así como tradicionalmente se hace al estudiar seres vivos.

Los problemas consecuentes a esta decisión empiezan con que al momento de realizar esta expedición, no existían contenedores y/o herramientas comerciales hechas con el propósito de recolectar muestras biológicas de equinodermos. La idea en la creación de estos dispositivos consistió en proteger, reducir la manipulación del espécimen y consecuentemente evitar que el ejemplar tuviera que ser sacrificado.

Por último pero no menos importante, surgió el problema de la ubicación de las estrellas de mar. Al tratarse de un sistema de cavernas submarinas bastante amplio, se necesitó de un equipo de 3 buzos calificados que tuvieron que sumergirse un total de hora y media con equipo especializado a través de túneles estrechos, inundados con agua fría y alumbrados únicamente con las lámparas frontales y linternas que pudieran traer consigo mismos.

## 2.2. Mediciones a tomar

El objetivo principal de la expedición constó en corroborar la teoría mencionada en la sección 2.1.3, la cual dice que la principal fuente de alimentación de los equinodermos que habitan el sistema de cavernas submarinas del cenote *El Aerolito* esta basada en una capa de bacterias que se encuentra en las paredes de las mismas. Con la finalidad de poner a prueba esta teoría, se necesitó identificar la alimentación de las estrellas de mar con base en la secuenciación del contenido estomacal. Para esto se aprovechó uno de los sistemas de defensa naturales con los que cuenta la estrella de mar, el cual consiste en que al momento de percibir algún peligro, se endurece, retrae sus órganos y regurgita el contenido de su estómago.

Otra medición que se solicitó agregar al proyecto a mitad de la fase de desarrollo consistió en obtener un fragmento de uno de los brazos regenerables de las estrellas de mar a estudiar. Este fragmento se cortó con unas tijeras y se almacenó en el dispositivo en un contenedor aislado a la muestra de regurgito. La finalidad de este último objetivo consistió en estudiar el ADN del espécimen con tal de identificar si se trata de una especie nueva o si se trata de alguna especie ya existente.

## 2.3. Objetivo

### 2.3.1. Objetivo general

Diseñar, desarrollar, manufacturar y validar en laboratorio y campo un contenedor que sea adecuado para la obtención de muestras biológicas de estrellas de mar *Asterinides cf. pompom* bajo el agua. Dicho sistema no existe en forma comercial para esta función, y es imprescindible para el estudio de esta especie marina única que forma parte fundamental de la biodiversidad mexicana.

### 2.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y manufacturar una estructura rígida que permita obtener muestras biológicas de estrellas de mar.
- Mantener un diseño amigable e intuitivo para los buzos que a la vez permita mantener la integridad física del espécimen a estudiar.
- Probar los contenedores en campo con el espécimen de interés.

## 2.4. Justificación

El objetivo general de este estudio consiste en catalogar y describir a las especies de mar que habitan dentro del sistema de cuevas submarinas ubicadas en la isla mexicana de Cozumel, en el cenote conocido como *El Aerolito*, con la finalidad de proteger y conservar estas especies únicas en el mundo, las cuales se encuentran amenazadas por el turismo creciente en las zonas aledañas.

La creación de estos contenedores de mar enfocados en el estudio de las estrellas de mar *Asterinides cf. pompom* surgió ante la ausencia de dispositivos comerciales iguales o similares en el mundo que permitan obtener las muestras biológicas descritas en la sección 2.2, en un ambiente complicado como el descrito en la sección 2.1.4 sin retirar y/o sacrificar al espécimen a estudiar.

## 2.5. Hipótesis

Si se desarrolla un contenedor con los requerimientos necesarios para la toma de muestras biológicas de la especie (insertar especie), entonces se optimizará la recolección de datos de dichos ejemplares con la finalidad de estudiar y proteger a esta especie nueva y amenazada.

## 3. Planteamiento del diseño

### 3.1. Suposiciones básicas

El objetivo de la expedición realizada por los biólogos en el cenote del Aerolito ubicado en la isla de Cozumel, consistió en la obtención de muestras biológicas que permitieron estudiar la alimentación y la historia evolutiva de estos especímenes. Para lograr estos dos puntos sin sacrificar o lastimar a las estrellas marinas, se obtuvieron muestras biológicas no invasivas, las cuales consistieron tanto en la regurgitación inducida (cuyo objetivo es el de estudiar los contenidos gástricos), así como en una muestra de ADN que se obtuvo a través del corte de un pedazo regenerable de uno de los brazos de las estrellas de mar. Dado que se desconoce la alimentación de estos especímenes, se supuso que la muestra de regurgito se iba a tratar de una suspensión, es decir una mezcla heterogénea compuesta por sólidos finos dispersos en un líquido [6]. Por otro lado la muestra de ADN consta de una muestra biológica sólida de tejido, por lo que se supuso que ambas muestras eran propensas a asentarse debido a la gravedad en caso de que no se presentaran turbulencias en el ambiente. Otro aspecto importante que se consideró para el desarrollo del producto fueron las dimensiones de estos especímenes. Con base en los primeros estudios realizados por los biólogos, las estrellas de mar tienen un diámetro entre 10 y 25 [mm], mientras que su altura varía entre 3 y 10 [mm] con base en el primer parámetro.

Así como se estableció en la justificación descrita en la sección 2.4, estos contenedores fueron necesarios debido a que las estrellas de mar no podían ser retiradas para ser estudiadas por temor a romper el balance que existe en su ecosistema. Por lo mismo se entiende que su manipulación debe de ser mínima y segura, para evitar causar estrés excesivo así como algún daño físico. Todos estos aspectos representaron requisitos adicionales y vitales sobre el cual se tuvo que desarrollar el diseño. Estos requisitos demandaron un diseño seguro y amigable para las estrellas de mar, el cual a su vez tenía que ser sencillo y fácil de manejar por el usuario. Cabe recalcar que el usuario era un biólogo dentro de un traje de buceo completo, el cual tenía que nadar en un ambiente privado de luz natural, alumbrado únicamente por sus linternas frontales. Por todo esto es que un diseño sencillo, amigable e intuitivo fue primordial para el éxito de la excursión.

Otro punto importante a considerar es que el dispositivo tuvo que recolectar y conservar las muestras biológicas dentro de sí mismo evitando derramamientos y contaminación adicional después de ser utilizado. Por ende se supuso que el contenedor tenía que contar con algún tipo de sello que permitiera conservar y aislar las muestras del medio ambiente una vez que se terminara de recolectarlas.

Por último hay que tomar en cuenta las características físicas de la cueva. Con base en la fotografía de la figura 5, así como en el mapa del sistema de cuevas que se muestra en la figura 3, se puede suponer que el contenedor tenía que ser resistente tanto a impactos con las paredes de roca, así como la abrasión que pudieran sufrir al navegar los buzos el sistema de cuevas submarinas.



### 3.2. Requerimientos y limitaciones

Con base en las suposiciones básicas previamente descritas en 3.1, se pudo concluir que el diseño giró en torno a un diseño amigable, ergonómico e intuitivo en todo momento. Esto con la idea de fortalecer otros requisitos del diseño, los cuales dictan que el contenedor debe de evitar dañar el espécimen de estrella de mar que se este estudiando en su momento. Si el diseño es sencillo de utilizar, el buzo se va a poder concentrar más en el bienestar de la especie en vez de enfocarse en el funcionamiento del dispositivo. Se tiene que tener en cuenta que los buzos van a estar limitados al encontrarse en las zonas de recolección, ya que la maniobrabilidad va a ser reducida y la visibilidad va a ser limitada tan solo a sus linternas de cabeza.

Otra suposición básica involucra la diferencia de presiones que se experimenta entre las zonas de recolección de muestras y la superficie del agua en donde emergieron los buzos. Esto es debido a que las estrellas de mar se encuentran a una profundidad de  $\sim 17.5[m]$ . Con base en los estudios realizados por los biólogos y los buzos previos a la expedición, la presión aproximada del agua en las zonas de muestreo equivale a  $\sim 2[atm]$ , tal como se mostró en el diagrama de la figura 4. Esto representó otro reto para el diseño de los contenedores, ya que todo lo que capte el contenedor a esas profundidades iba a tener una presión mayor que la que se encuentra a nivel del mar. Por ende se tuvo que considerar algún tipo de sello hermético que permitiera contener las muestras líquidas del regurgito una vez que se obtuviera.

Un requisito que estipularon los biólogos desde un inicio fue que el contenedor tenía que tener las menores dimensiones posibles. Esto debido a que los buzos se tenían que sumergir con una gran cantidad de equipo, el cual involucró tanto su equipo personal para poder realizar la expedición (2 tanques de oxígeno, varios metros de cuerdas conocidas como “líneas de vida”, dispositivos de monitoreo, su sistema de flotabilidad, etc.), así como el equipo que utilizaron para realizar el estudio de las estrellas de mar (herramientas, contenedores, bolsas, mochilas, etc). Esto nos agrega otras limitaciones, tales como evitar mecanismos complejos, reducir al máximo las piezas móviles y evitar a toda costa tener piezas sueltas que puedan caerse y perderse en el cenote.

Otro requisito estipulado desde un inicio fue el que, si bien no especificaron una cantidad específica, nos solicitaron que el costo total de cada uno de estos dispositivos fuera bajo dado que se estaba trabajando con un presupuesto fijo para poder llevar a cabo esta expedición.

Por último pero no menos importante, se consideraron las herramientas, equipo y presupuesto con el que contaba el *Laboratorio de Instrumentación Espacial (LINX) del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM*, con el cual se podían desarrollar estos dispositivos en ese momento.

### 3.3. Disponibilidad de materiales y métodos de manufactura

Una vez establecidos los requerimientos y limitaciones (3.2) basados en las suposiciones básicas (3.1), se puede empezar a contemplar los diferentes materiales y métodos de manufactura disponibles dentro del laboratorio *LINX* con tal de plantear las ventajas y desventajas que conlleva cada uno de ellos.

#### 1. Manufactura aditiva

##### 1.1 Impresión 3D con tecnología FDM

FDM significa “modelado por deposición fundida” por sus siglas en inglés. Las impresoras que utilizan esta tecnología siguen un proceso que crea objetos físicos a través de la construcción de capas sucesivas. Para esto se empuja un filamento termoplástico a través de un extrusor que funde el polímero y lo deposita en donde se necesite. [7] Cada vez que la impresora termina de imprimir una capa, eleva la boquilla del cabezal ligeramente y deposita la siguiente capa encima de la última. Las piezas tridimensionales resultantes de FDM están formadas por múltiples capas depositadas una encima de otra [8].

La calidad de las piezas que se imprimen con este método depende del grosor de las capas, ya que entre más delgadas sean, mejor calidad se obtiene. En promedio las impresoras que imprimen con filamento llegan a alcanzar un grosor entre  $0.1 - 0.3[mm]$  [8]. Esto puede ser una desventaja cuando la calidad visual de las impresiones es de gran importancia, ya que al reducir el grosor de las capas, aumenta el número total de capas necesarias para formar una pieza completa y por ende su tiempo de impresión.

Una ventaja considerable que tiene este método es que en comparación a la impresión 3D con resina, las piezas formadas con filamento tienden a ofrecer más durabilidad, aún utilizando materiales sencillos tales como el PLA [8]. Además las impresoras de filamento tienden a tener dimensiones de impresión mayores a las de resina. Por estas dos últimas razones es que para la creación de prototipos y/o piezas funcionales es preferible el uso de este método.

##### 1.2 Impresión 3D con resina

De igual manera que con las impresoras de filamento, el método por resina utiliza múltiples capas encimadas una sobre de otra para crear piezas tridimensionales. La diferencia con respecto al método de filamento radica en que, así como dice su nombre, se utiliza una resina líquida especial que se solidifica al ser expuesta a luz ultravioleta como material para la impresión. Para esto existen esencialmente dos métodos que utilizan la luz de diferente manera para curar el material. El primero se conoce como *estereolitografía* o *SLP* por sus siglas en inglés, en donde un haz de láser traza todos los contornos de la capa a crear para curar la resina. El segundo método para imprimir

con resina se conoce como *procesamiento de luz digital* o *DLP* por sus siglas en inglés.

La calidad de las piezas impresas con resina es mucho mayor que las que se imprimen con filamento. Eso debido a que el grosor de las capas no esta ligado al diámetro de una boquilla, si no al uso de un láser (*SLP*) o al uso de una imagen proyectada (*DLP*), lo que permite tener un grosor de capa de  $\sim 0.07[mm]$  [8]. A diferencia del método anterior, la impresión con resina puede ser más rápida que la impresión con filamento, ya que en vez de tener que mover un cabezal y hacer que una boquilla deposite el material manualmente en toda la capa, con este método se utiliza luz que permite formar las capas más rápidamente sin importar la cantidad de piezas que se agreguen en una sola impresión [9].

Si bien las piezas en resina tienen una mejor calidad visual, sus propiedades mecánicas tienden a quedarse cortas si se busca crear prototipos o piezas funcionales. La razón principal por esto último tiene que ver con que la resina curada tiende a ser considerablemente más frágil que su contra parte de filamento, por lo que si la pieza se enfrenta a impactos y/o esfuerzos considerables se corre el riesgo de que la pieza se fracture más fácilmente. Otra razón que juega en contra de este método es que así como la resina es reactiva a la luz ultravioleta para endurecerse, con el tiempo se va a ir debilitando mecánicamente si se expone prolongadamente al Sol [8]. Con la finalidad de combatir estos problemas, existen resinas de grado ingenieril que tienen mejores propiedades mecánicas, pero al momento de crear estos contenedores el laboratorio no contaba con ellas.

Una desventaja considerable que tienen las impresoras con resina es que a pesar de que son el método más antiguo de impresión 3D, las máquinas y el material para llevarlo a cabo no son tan accesibles en comparación a las impresoras de filamento. Un carrete de filamento barato puede rondar los \$300 dólares, mientras que un contenedor de resina barato puede rondar los \$1,000 dólares. En caso de querer utilizar las resinas funcionales con mejores propiedades mecánicas y visuales, el precio puede subir hasta los \$3,000 dólares [9].

## 2. Acrílico

Una de las primeras ventajas que surgió en mente al considerar el acrílico es que se trata de un material transparente que llega a ser utilizado en equipo médico así como en la industria de la comida por sus propiedades que le permiten resistir múltiples químicos [10].

Otra ventaja que tiene es que el material tiene una buena resistencia a los cambios de temperatura. El rango de servicio oscila entre los  $-40[^\circ C]$  y los  $80[^\circ C]$  [10], por lo que el material no tendría ningún problema en soportar los cambios de temperatura del ambiente al que se va a someter.

Si bien este material es ideal para el maquinado de precisión, trabajarlo

constituye tiempo y no otorga flexibilidad en cuando a las geometrías que se pueden lograr si es que se compara con los diseños que se utilizan con la impresora 3D. Además si lo comparamos con este último método, los precios del material son mucho más elevados y su producción más lenta y compleja.

### 3. Metal

El metal es el material más resistente de todos los demás materiales que se encontraban disponibles en su momento. Por cuestiones de precio y dificultad de manufactura, se consideró el aluminio para realizar los contenedores. A continuación se describen más las ventajas y desventajas de utilizarlo.

Dado que el propósito de estos contenedores era ser utilizados en el mar, se tenía que pensar en la oxidación al considerar el metal. El aluminio tiene una excelente resistencia a la corrosión en comparación al acero estándar, siempre y cuando no se exponga a condiciones con altos niveles de cloruros. Además el aluminio es más barato, ligero y es más fácil de conseguir y maquinar en comparación al acero [11].

La desventaja que tiene es que así como el acrílico, el maquinado puede ser tardado y complejo, y en caso de querer obtener geometrías complejas se necesita el uso de maquinaria CNC, las cuales son tardadas de programar.

### 4. Madera

Otro material que se consideró fue la madera debido a sus bajos precios y a que es sencilla de maquinar y trabajar en comparación al acrílico y a los metales.

Si bien tiene estas ventajas, la madera no es un buen material si su propósito es el ser utilizada bajo el agua. Se trata de un material poroso, poco denso en comparación con el agua y que además se hincha al estar en contacto con la misma [12]. Esto implica que la madera va a ser incapaz de contener las muestras líquidas, no va a poder sellar y a la vez es propenso a ataques mecánicos por los cambios en sus dimensiones.

## 4. Diseño y desarrollo

### 4.1. Interpretación de las necesidades

Con base en las suposiciones básicas, los requerimientos y las limitaciones descritas en el Capítulo I, podemos crear la siguiente lista resumida de necesidades:

- El contenedor tiene que ser capaz de obtener una muestra de regurgito y una muestra biológica de ADN que consiste en un fragmento de uno de sus brazos regenerables.
- El espacio dentro del contenedor final debe poder albergar una estrella de mar con un diámetro de 25[mm] y una altura de 10[mm] (tamaño máximo que pueden alcanzar).
- Se requiere un diseño amigable con las estrellas de mar que reduzca su manipulación lo mayor posible.
- El diseño debe de ser ergonómico, sencillo e intuitivo para un buzo inexperto en el manejo de los contenedores.
- Se debe de evitar el uso de mecanismos complejos así como el uso de piezas sueltas o que puedan separarse del cuerpo principal.
- El producto final debe de ser lo más compacto posible.
- Durante la expedición se va a experimentar un cambio de presiones de  $\sim 1[atm]$ , por lo que el diseño debe incluir algún tipo de sello que evite la pérdida del regurgito líquido.
- El producto debe de poder soportar impactos.
- El producto debe de ser de bajo costo.

### 4.2. Generación de conceptos

#### Primera versión

El primer concepto que se concibió fue que los recolectores iban a contar con una carcasa externa cuya función era proteger el interior del contenedor contra impactos, albergar los mecanismos que se diseñaron para poder obtener las muestras biológicas y a su vez servir como una superficie ergonómica para que los buzos lo pudieran manipular. Para esta carcasa se propuso un cilindro, con dimensiones similares a las latas comerciales de aluminio que albergan bebidas de 16[oz] (52.40 x 157.22 x 211[mm]) [13] por tres razones. La primera involucra la forma geométrica, ya que un cilindro no tiene esquinas en su cara principal, por lo que no existen concentradores de esfuerzo que puedan llevar a la ruptura del contenedor después de uno o múltiples impactos. La segunda razón sigue involucrando la ausencia de esquinas, ya que un diseño sin esquinas permitió a

los biólogos extraer las muestras biológicas posteriormente a la recolección de mejor manera. La tercer y última razón involucra las dimensiones, y es que las latas de aluminio están diseñadas para caber en las manos de cualquier persona. A diferencia de una lata comercial que es lisa, se optó por agregar alguna especie de surcos a lo largo de la cara principal del cilindro con el propósito de aumentar el agarre al momento de sostenerlo.

Una vez determinada la forma del contenedor, se continuó al considerar cuál sería la mejor manera de ingresar las estrellas de mar al contenedor para obtener las muestras de regurgito, teniendo en mente que su manipulación debía ser mínima y que había que cuidar su integridad física en todo momento. Para esto se propuso el uso de una canastilla retráctil, la cual cuenta con una asa que permite a los buzos meterla y sacarla del contenedor, ya sea para ingresar o para retirar el espécimen a estudiar. En el piso de la canastilla, en donde se pensó que la estrella de mar iba a reposar al ser ingresada al contenedor, se instaló una rejilla que permitió el flujo del regurgito a los niveles inferiores. Por último se optó por utilizar un sistema de canaletas y guías entre la canastilla y el contenedor, lo que permitió que esta pieza se pudiera ingresar y retirar sin que se separara del contenedor. También se agregó un sistema de bloqueo con las guías y las canaletas, en donde si se giraba la canastilla  $30[^\circ]$  en sentido horario, se bloqueaba la posición en la que se encontrara, ya fuera en posición extendida o retraída con respecto al contenedor. El primer modelo de la canastilla lo podemos observar en la figura 6.

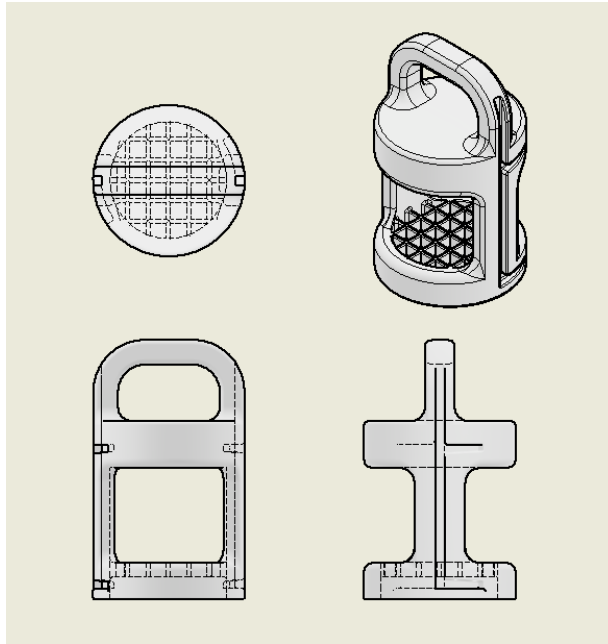


Figura 6: Múltiples vistas del primer modelo de la canastilla creada para ingresar o retirar las estrellas de mar del dispositivo. De arriba a abajo y de izquierda a derecha se aprecia la vista superior, isométrica, frontal y lateral de esta pieza. En la vista isométrica y lateral se aprecian las guías que permiten meter, sacar y bloquear la canastilla en su lugar.

Una vez definido el contenedor y la manera de ingresar y retirar las estrellas del mar al mismo, se presentó la inquietud referente a sellar las muestras de regurgito con tal de evitar pérdidas del material recolectado. Para esto se propuso utilizar algún tipo de mecanismo inmediatamente después de la canastilla que permitiera u obstruyera el flujo de líquidos entre el área de la canastilla y el área subsecuente del contenedor en donde reposarían las muestras. Por otro lado se tomó en cuenta que dichas muestras de regurgito se trataban de una suspensión, tal como se planteó en las suposiciones básicas 3.1, razón por la cual se contempló un mecanismo de apertura y cierre del estilo iris como el que se observa en la figura 7. Este mecanismo permite abrir y cerrar el diámetro interno del contenedor casi en su totalidad sin obstáculos de por medio, por lo que esto hubiera permitido que la suspensión pasara a través del mismo fácilmente. Sin embargo, este mecanismo tiene la desventaja de ser complejo al contar con múltiples guías, piezas deslizantes y piezas móviles.

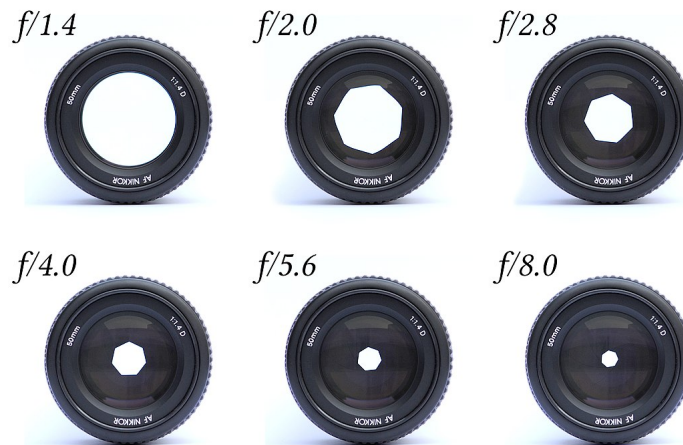


Figura 7: Mecanismo de apertura tipo iris instalado en un lente de una cámara [14]. En la imagen se ven los diferentes grados de apertura que puede tener la cámara al cambiar la posición de las aspas del mecanismo.

Después de considerarlo con los biólogos así como con el director del laboratorio LINX, se determinó que el mecanismo de iris utiliza múltiples piezas que se deslizan entre sí, lo que lo hace más propenso a fallas debido a obstrucciones que se encuentren en el mar (arena, tierra, o la misma sal del agua salada al secarse). Con la idea de evitar posibles fallas mecánicas durante la recolección de muestras biológicas, se propuso simplificar el mecanismo de apertura y cierre, por lo que se propuso un sistema con aspas rotatorias, tal como el modelo que se muestra en la figura 8. Si bien este sistema no otorga la ventaja del mecanismo tipo iris, en donde casi se puede abrir en su totalidad el diámetro interno del contenedor, este otro otorga mucha sencillez y fiabilidad al tratarse únicamente de dos piezas que giran  $30^\circ$  entre sí para abrir y cerrar las aperturas que existen entre las aspas, tal como se aprecia en la figura 9.



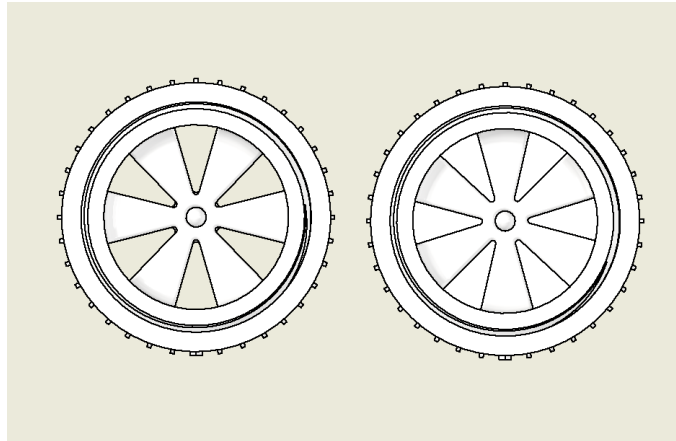


Figura 8: Vista superior del sistema de aspas propuesto en el primer modelo del contenedor. Del lado izquierdo se aprecia el sistema cuando se encuentra abierto y listo para captar las muestras biológicas. Del lado derecho se ve como el mecanismo se encuentra cerrado después de rotar las aspas  $30^\circ$ .

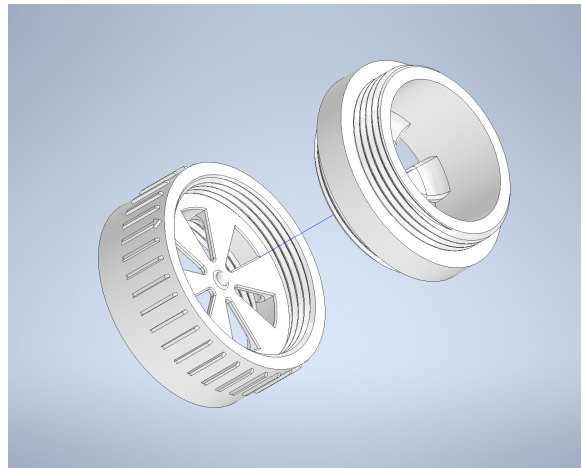


Figura 9: Vista explosiva del mecanismo de aspas propuesto. Se aprecia como el mecanismo consta de dos piezas, las cuales al ser rotadas  $30^\circ$  se cierran entre si, mientras que al girarlo nuevamente la misma cantidad de grados, abre el sistema.

Con todas las consideraciones previamente descritas, se realizó el diseño del primer concepto, el cual incluye el cuerpo cilíndrico externo con surcos, el mecanismo de apertura y cierre en forma de aspas y la canastilla que va a permitir el ingreso o retiro del espécimen. Con tal de recolectar y salvaguardar las muestras de regurgito una vez que se hayan obtenido, se diseñó un espacio

para almacenar dicha muestra inmediatamente abajo del sistema de aspas. Todo esto se puede observar en las figuras 10 y 11.

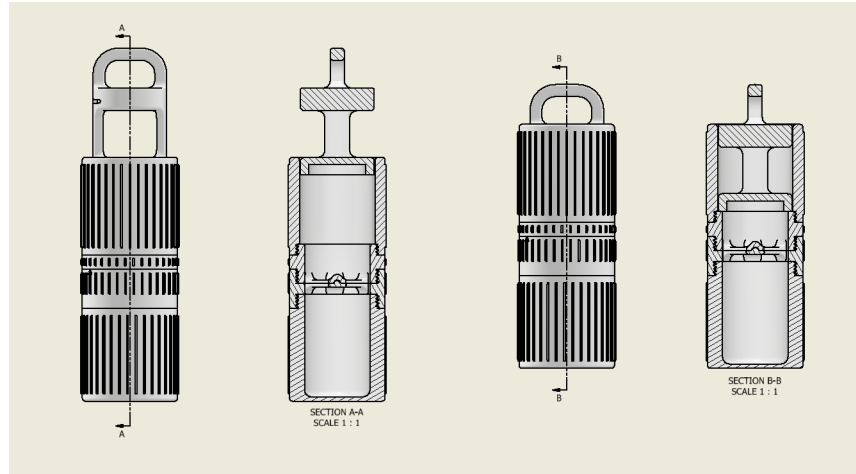


Figura 10: Vista frontal de la primera versión del recolector de muestras biológicas para estrellas de mar con una vista transversal de cada posición de la canastilla. Las dos ilustraciones del lado izquierdo muestran al contenedor con la canastilla al estar extendida. Las dos ilustraciones del lado derecho muestran la canastilla retraída dentro del contenedor.

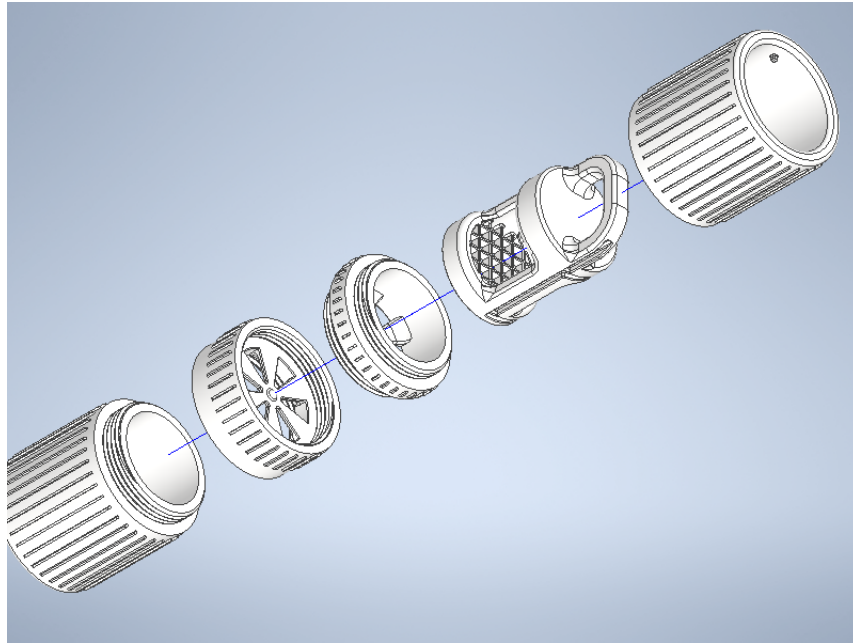


Figura 11: Vista isométrica y explosiva de la primera versión del recolector de muestras biológicas. Se aprecia como el modelo consta de 5 piezas. De izquierda a derecha se aprecia el reservorio, seguido de las dos piezas que conforman el mecanismo de las aspas, la canastilla para ingresar y retirar las estrellas de mar del sistema, y por último una carcasa que protege a la canastilla y aísla a esta última del medio ambiente.

Durante el diseño se contempló que la canastilla se pudiera extender y retraer sin que la misma se pudiera separar del resto del contenedor para simplificar el proceso de recolección de muestras para los buzos. Por esto es que los rieles de los rieles se encuentran dentro de la carcasa que protege la canastilla, y los rieles de esta última están diseñados de tal manera que únicamente se pueden retirar por la parte opuesta a donde se ingresa o retira la estrella de mar, tal como se puede observar en la figura 11. Esto implica que la única manera en que la canastilla se puede separar del resto del contenedor es a través de desenroscar el sistema de aspas y el contenedor de la canastilla.

#### **Segunda versión**

Una vez terminada esta primera versión del contenedor, se imprimió en 3D para probar el sistema. Se determinó que las dimensiones eran correctas pero se optó por hacer pequeñas correcciones en la canastilla. La primera involucró bajar unos cuantos milímetros la reja destinada para que la estrella de mar reposara durante su manipulación. Esto formó un valle cuya finalidad fue que la estrella de mar se mantuviera en su lugar más fácilmente.

Una segunda modificación que se decidió implementar constó en simplificar el mecanismo de apertura a una sola aspa. La idea detrás de esto fue que si bien

ahora no iba a cerrar en su totalidad dicha estructura, las aspas iban a ayudar a reducir las turbulencias que se pudieran generar al extender y retraer la canastilla del resto de la estructura, salvaguardando así las muestras recolectadas. De igual manera esto simplificaba la toma de muestras para los buzos.

Si bien se especificó al inicio de este trabajo que se iba a tomar una muestra de un tentáculo regenerable del espécimen, no fue hasta este punto que los biólogos comentaron que iban a realizar esta prueba. Por esto es que era necesario adaptar alguna especie de contenedor aislado del compartimento destinado a almacenar las muestras de regurgito. Si bien no nos fueron especificadas las dimensiones exactas de la muestra, se nos comentó que iba a tener un volumen muy reducido al tratarse de la punta de un tentáculo. Por esto es que se adaptó un contenedor rectangular en la parte externa de la carcasa protectora de la canastilla, la cual se cierra con una pieza que utiliza la flexibilidad del material impreso en 3D para asegurarse al entrar a dicho contenedor. Estas adaptaciones se puede observar en la figura 13.

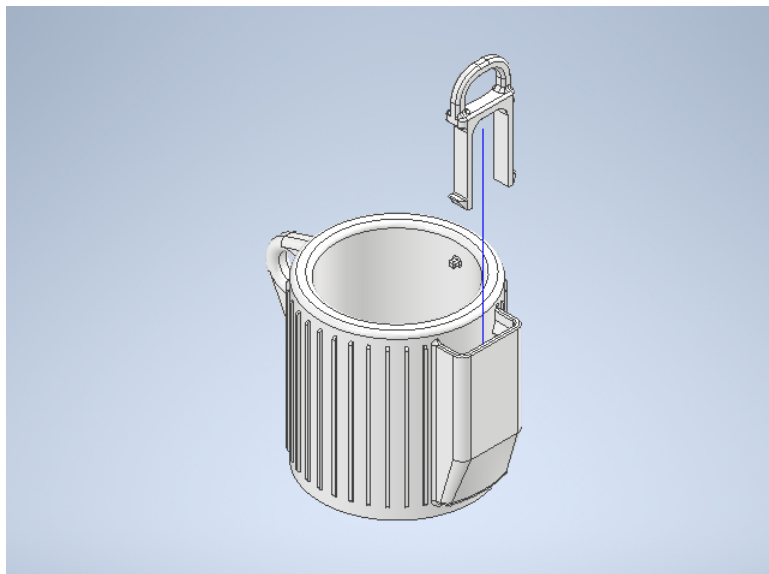


Figura 12: Vista explosiva isométrica de la carcasa que protege a la canastilla, en donde se aprecia el contenedor para recolectar la muestra de ADN junto con la tapa cuya función es la de abrir y cerrar el mismo.

En este punto del proceso de diseño se recibió más información por parte de los biólogos y los buzos una vez que observaron el primer modelo del recolector. Ellos especificaron que los buzos iban a utilizar mosquetones para asegurar el equipo a sus trajes de buceo durante la expedición. Por esto último es que se optó por agregar puntos de aseguramiento para los mosquetones sobre el cuerpo externo del contenedor, con tal de evitar que se utilizaran mosquetones en el asa principal de la canastilla, reduciendo así la probabilidad de debilitar o romper

dicha estructura. El punto de agarre para los mosquetones se pueden observar en forma de asa en la figura 13.

Una vez que se adaptaron las dimensiones de la canastilla, se redujo el sistema de aspas a una sola pieza, se agregó el punto de aseguramiento para los mosquetones y se agregó el contenedor para las muestras de ADN se terminó la segunda versión de los recolectores para estrellas de mar. Este segundo diseño se puede apreciar a continuación en uno de los planos que se mandó a los biólogos en su momento para su análisis. De igual manera se imprimió en 3D este modelo para realizar pruebas en el laboratorio.

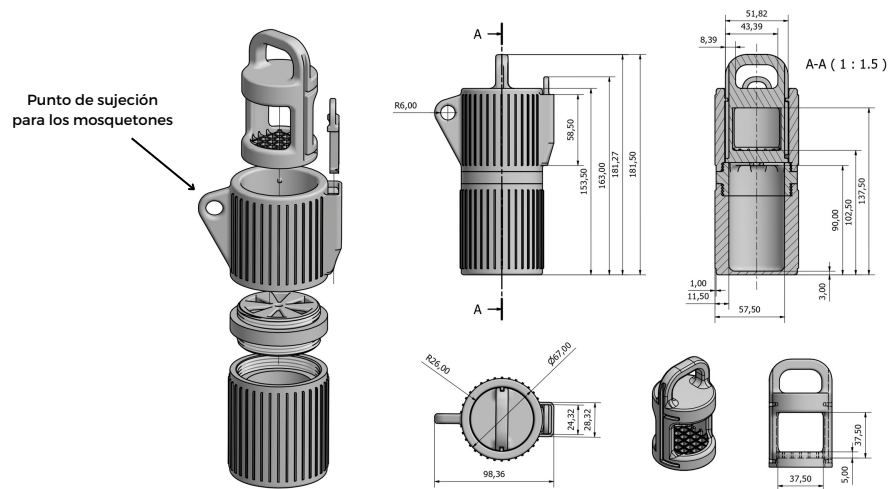


Figura 13: Imagen extraída de un plano, la cual muestra los detalles de la segunda versión del recolector para estrellas de mar.

### Tercera versión

Para este punto en el desarrollo fue de interés determinar la capacidad de sellado de la canastilla al encontrarse retraída, así como la efectividad del aspa como sistema para reducir la pérdida de las muestras de regurgito. De estas pruebas se determinaron los siguientes problemas/áreas de oportunidad:

- Algo que no se consideró previo a estas pruebas es que al tratarse de piezas de plástico ABS impreso en 3D, el recolector flota.
- El sistema de aspas parece reducir las turbulencias al extender o retraer la canastilla, pero no es muy efectivo.
- El contenedor externo destinado a recibir la muestra de ADN es muy pequeño y la tapa es propensa a romperse, bloquearse y/o caerse.

El problema más urgente que se tenía que resolver tenía que ver con la flotabilidad del dispositivo. Para esto se propuso integrar plomo en el diseño,

ya que los buzos utilizan este mismo material para contrarrestar la flotabilidad natural del cuerpo durante los buceos [15]. Para calcular que tanto va a flotar el recolector para estrellas de mar (en el momento en el que se encuentre relleno de agua en vez de aire) utilizamos el principio de Arquímedes:

$$F_b = \rho \times g \times V \quad (1)$$

En donde  $F_b$  es la fuerza de flotabilidad,  $\rho$  es la densidad del fluido al que se va a sumergir el objeto,  $g$  es la fuerza de gravedad y  $V$  es el volumen del objeto que se va a sumergir [16]. La densidad del agua de mar varía entre los  $1,020 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  a los  $1,029 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  [17], por lo que se tomó el valor de  $1,025 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  para estos cálculos. Por otro lado se tomó la gravedad como  $9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  al tomarse en consideración que la expedición se llevará a cabo a nivel del mar. Por último se utilizó el software Autodesk Inventor para determinar el volumen del recolector que se diseñó, el cual equivale a  $444,410 \left[ mm^3 \right]$ . Con todo estos datos se obtuvo el siguiente resultado con base en la ecuación 1:

$$F_b = 1,025 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.00044441m^3$$

$$F_b = 4.46N$$

Con tal de contrarrestar la fuerza de flotabilidad, se calculó la cantidad de peso necesario para que la flotabilidad del objeto fuera nula. Para esto dividimos la fuerza previamente calculada entre la gravedad.

$$W = \frac{F_b}{g} \quad (2)$$

$$W = \frac{4.46N}{9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$W = 0.45[kg]$$

Antes de continuar tenemos que considerar que debido a que los recolectores fueron creados con manufactura aditiva, no se trata de un objeto completamente sólido. Su interior es hueco con un poco de material de soporte interno. Para ser específicos el relleno se programó para que fuera del 18%, por lo que el peso real es el siguiente:

$$W = W \times 0.18 \quad (3)$$

$$W = 450[g] \times 0.18$$

$$W = 81[g]$$

Sin embargo se decidió agregar un factor de seguridad de 2 para contrarrestar el aire atrapado, resultando en que el peso total calculado fuera de  $162[g]$ . Con este factor de seguridad agregado se busca que el contenedor se hunda ligeramente en vez de tener una flotabilidad nula, causando así que el contenedor se mantenga en una posición vertical y su diseño interno sea efectivo.

Una vez que se calculó la masa necesaria que tienen que llevar las pesas, se calculó el volumen requerido del compartimento que se iba a añadir al recolector. Con base en las propiedades del plomo y las dimensiones del contenedor mostradas en los planos de la figura 13 se realizaron los siguientes cálculos con base en la fórmula de densidad [18]:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Primero tenemos que determina la densidad  $\rho$  del plomo, la cual es igual a  $\rho = 11.29 \frac{g}{cm^3}$  [19]. También conocemos la masa gracias a la solución de la ecuación 2, la cual nos dice que se necesitan  $W = 0.45[kg]$ . Con estos dos valores podemos resolver la ecuación 4 para el volumen de la siguiente manera:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (5)$$

$$V = \frac{162[g]}{11.29 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$V = 14.35[cm^3]$$

Dentro del laboratorio LINX ya se contaba con placas de plomo con un espesor de  $7[mm]$ , por ello es que con base en este espesor y el volumen de material que se determinó con la ecuación 5, se optó por hacer un compartimento externo en la parte inferior de los contenedores destinados a almacenar las muestras de regurgito. Esta modificación se puede ver en la figura 14.

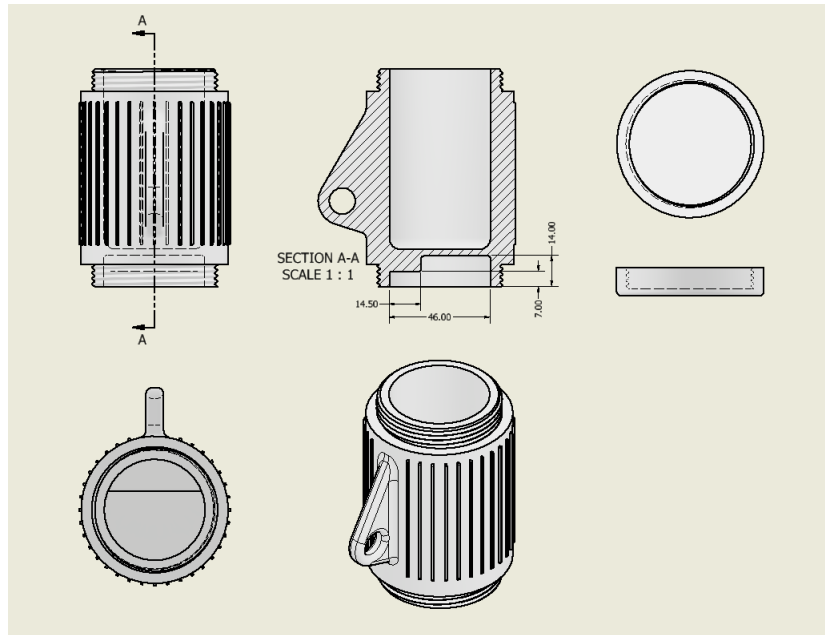


Figura 14: Contenedor para muestra de regurgito con punto de anclaje para mosquetón en la cara externa y un compartimento inferior aislado para contener el plomo. El volumen de este último compartimento es igual a  $40[cm^3]$ . En la esquina superior derecha se aprecia la tapa que se hizo para cerrar dicho compartimento para las placas de plomo.

Otra observación que surgió al momento de realizar las pruebas fue que se necesitaba mejorar el mecanismo de aspas por un sistema pasivo más efectivo que permitiera conservar de mejor manera las muestras de regurgito. Se propuso el uso de un plano inclinado con una pequeña apertura en la zona más profunda del mismo, a manera de que con la misma gravedad el regurgito en forma se suspensión se asentara e ingresara al mismo, similar al principio de funcionamiento de un embudo. El plano inclinado a su vez representa una obstrucción considerable para la muestra una vez que ingresa, resultando en un sistema pasivo de contención que dificulta la salida del material recolectado.



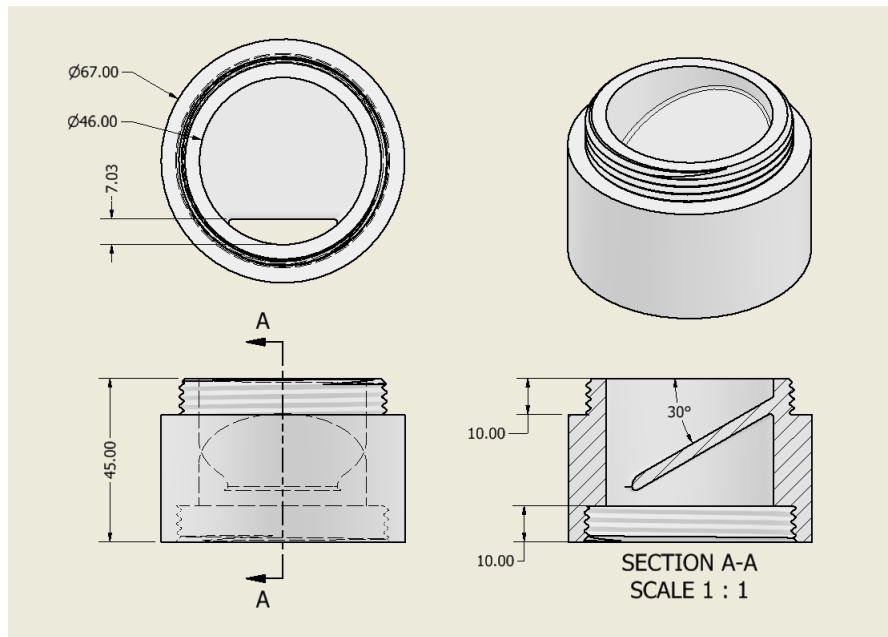


Figura 15: Diferentes vistas del módulo que contiene al plano inclinado que sustituyó al mecanismo de aspas. En la figura superior izquierda se aprecia la pequeña apertura que permite el ingreso de material en la parte más profunda del plano inclinado. Este plano se puede apreciar de mejor forma en el corte transversal de la figura inferior derecha.

Gracias a las pruebas que se realizaron con la segunda versión, se determinó que el contenedor externo destinado a salvaguardar el tejido para la muestra de ADN era muy pequeño y su tapa era propensa a romperse. Por esto es que se optó por un segundo diseño con dimensiones más grandes, cuya apertura tuviera forma de embudo e hiciera más fácil la recepción y almacenamiento de la muestra. Esto se aprecia de mejor forma en la figura 16.

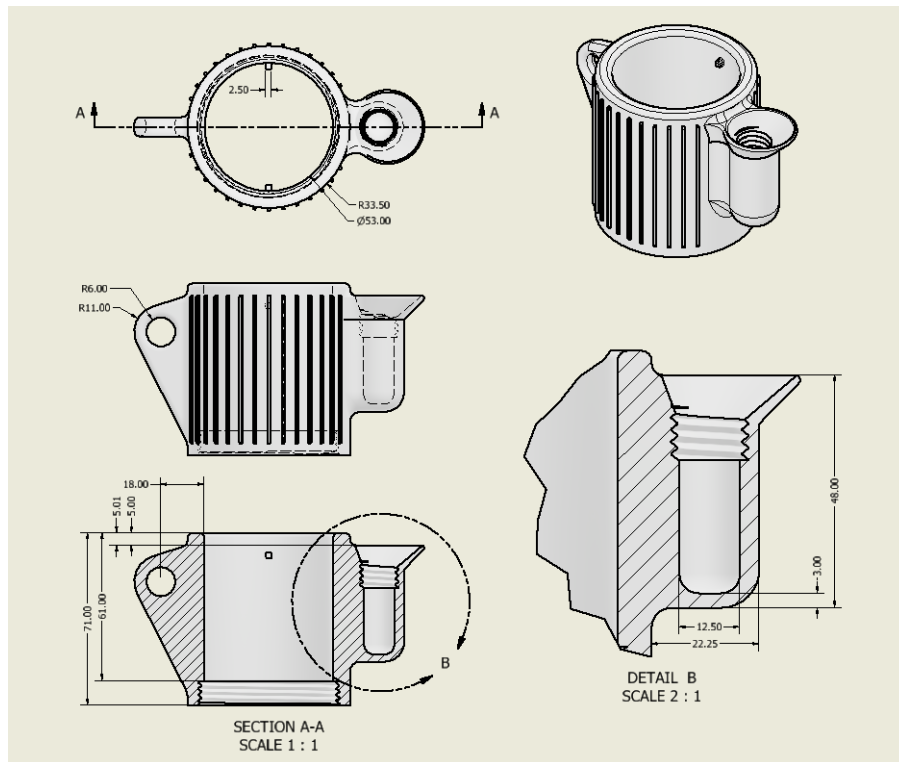


Figura 16: Tercera versión del contenedor de la canastilla, en donde se aprecia el nuevo contenedor con forma de embudo opuesto a la posición del punto de anclaje para los mosquetones.

En vez de utilizar la tapa de la versión anterior que utiliza la flexibilidad del material para abrir y cerrar, se optó por una tapa enroscable, la cual se muestra en la figura 17. Esta pieza fue diseñada pensando en el buzo manipulándola bajo el agua, por lo que se integraron las siguientes características:

- Una oreja con una depresión en la parte superior-central para mayor ergonomía.
- La rosca esta diseñada para que la tapa cierre completamente con un giro de 180°.
- Bordes redondeados.

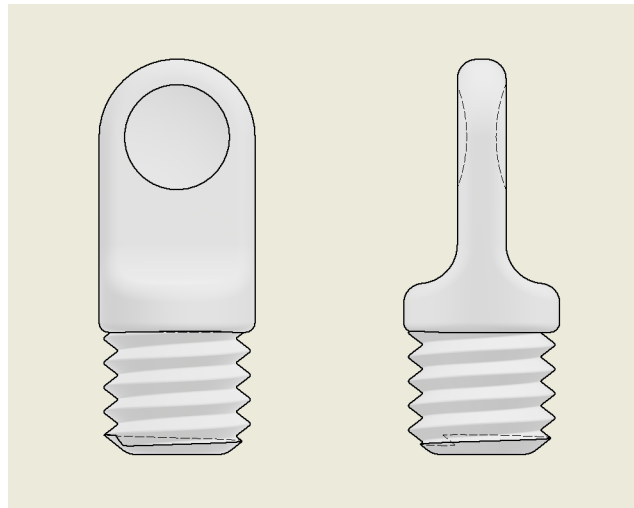


Figura 17: Tapa enroscable para el contenedor externo para recolección de ADN.

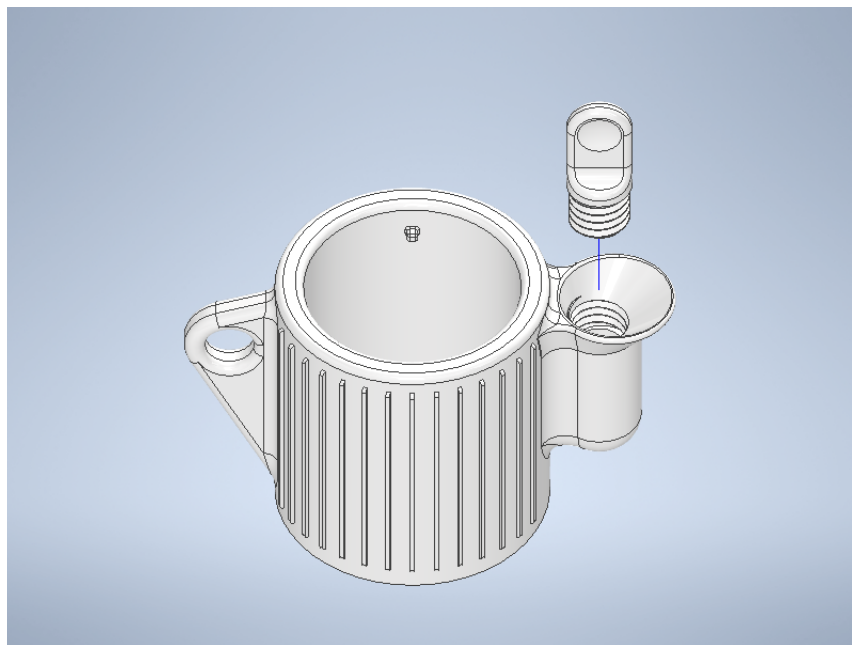


Figura 18: Vista explosiva del contenedor de la canastilla junto con la taparroscas.

Una vez realizados todos los cambios previamente descritos se terminó la tercera versión del recolector para estrellas de mar. A continuación se puede ver una imagen con los planos de la tercera versión del recolector.

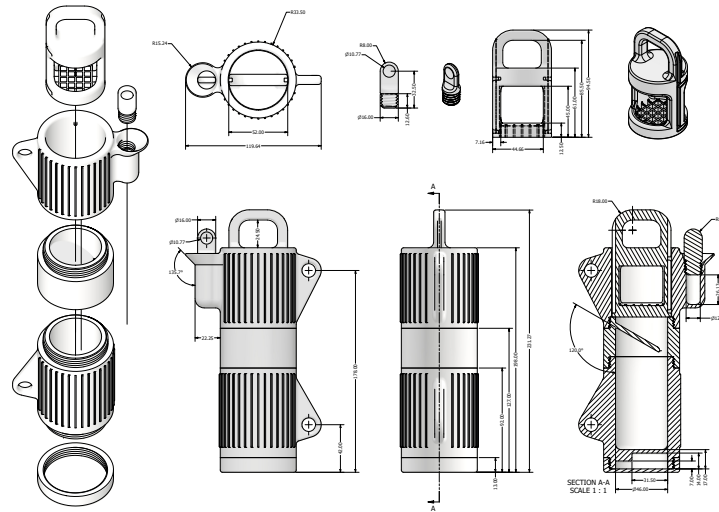


Figura 19: Imagen extraída del plano de la tercera versión de los recolectores para estrellas de mar. A diferencia de la segunda versión del dispositivo que se aprecia en la figura 13, se observa que el recolector es más alto y cuenta con un compartimento inferior para plomo, un contenedor cilíndrico externo para las muestras de ADN y una plano inclinado en vez de las aspas originales inmediatamente después de la canastilla. Este incremento en altura implicó la adición de un segundo punto de anclaje para los mosquetones en la parte inferior del recolector.

#### Cuarta versión

Una vez diseñada la tercera versión de los recolectores, se imprimieron las piezas en 3D y se volvieron a someter a pruebas bajo el agua. Se notó la presencia de fugas entre la canastilla y el contenedor que protege a esta última en la parte superior (donde se encuentra la manija). Por otro lado se mostró el modelo a los biólogos y si bien les agradó el nuevo contenedor externo para las muestras biológicas de ADN, comentaron que la posición del contenedor externo era incómoda y no permitía tomar los recolectores con la mano completa.

El problema principal con estas observaciones fue crear un sello que evitara el derrame del agua y las muestras biológicas de regurgito. Para esto se utilizó un O-Ring #225 en la canastilla con tal de crear un sello entre esta pieza y el contenedor que rodea a la misma una vez que la canastilla se encontrara retraída. Se modificaron las dimensiones de la canastilla y se trazó una canaleta en la misma con tal de ingresar el O-Ring y fijarlo en su sitio, tal como se muestra en la figura 20.

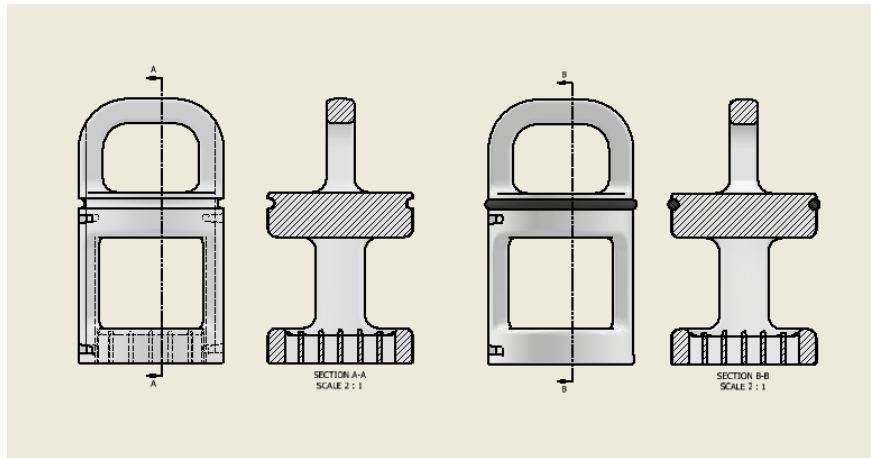


Figura 20: Vista frontal con cortes transversales de la segunda versión de la canastilla, en donde se creó una pequeña cuenca al bajar  $2.5[mm]$  la rejilla destinada al reposo de la estrella de mar durante su manipulación. De igual manera se aprecia la modificación que se hizo para adaptar un anillo O-Ring, el cual se puede observar montado en las dos ilustraciones del lado derecho.

Por otro lado, para solucionar el problema ergonómico que presenta el contenedor externo para las muestras de ADN, se cambió su posición  $140^\circ$  sobre la cara externa del cilindro. Después se agregó texto en la cara superior del contenedor de la canastilla para indicar si esta última se encuentra abierta o cerrada con base en la posición del asa. Por último se agregó el logo del laboratorio LINX en la parte inferior del contenedor externo para ADN, sobre la cara del contenedor para la canastilla. A continuación se aprecian estos cambios en la figura 21.

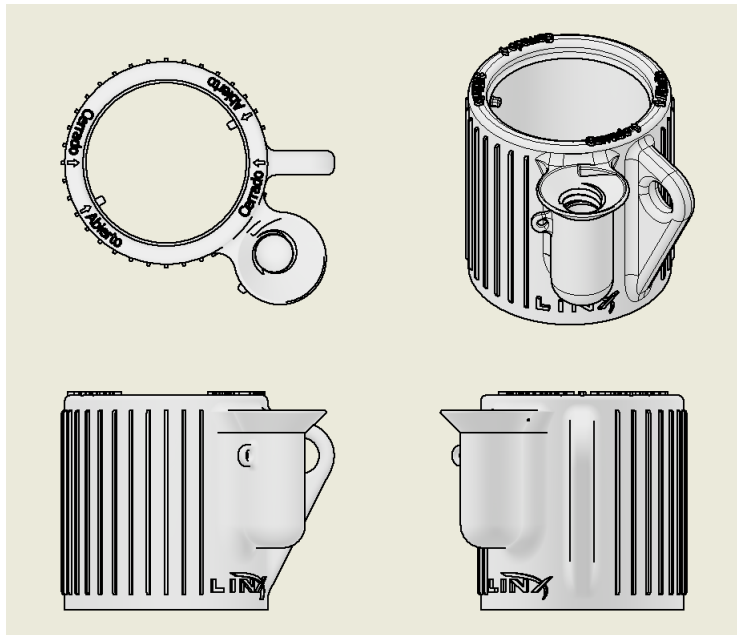


Figura 21: Modelo digital con múltiples vistas del contenedor de la canastilla en su última versión. Se aprecia como en la figura superior izquierda se agregó texto con flechas que indican cuando la canastilla se encuentra abierta y/o cerrada dependiendo de la posición del asa. De igual manera se aprecia como la posición del contenedor cilíndrico externo para las muestras de ADN se cambió de lugar y ahora se encuentra más cerca del punto de anclaje para el mosquetón. También se aprecia en la figura superior derecha e inferior izquierda como se agregó un pequeño eslabón para fijar con cuerda la taparrosca de dicho contenedor externo. Por último se aprecia en todas las figuras a excepción de la superior izquierda como se agregó la leyenda "LINX" debajo del contenedor externo previamente mencionado.



#### 4.4. Selección del método de manufactura

Una vez terminado el diseño de los recolectores y obtenido el visto bueno de los biólogos, se analizaron los requisitos, limitaciones, disponibilidad de materiales y métodos de manufactura descritos en el capítulo 3. Con base en toda esta información se optó por utilizar el método de impresión 3D con filamento.

El siguiente paso consistió en seleccionar el material a utilizar en la impresora 3D de filamento. Los materiales más comunes que se usan para esto son el PLA (ácido poliláctico) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) [20], pero en el laboratorio LINX también se cuenta con Nylon y PETG (poliéster de glicol). De todos estos materiales previamente mencionados, solo el Nylon y el ABS se recomiendan para hacer prototipos funcionales [20]. De estos dos materiales se optó por el ABS por las siguientes razones [21]:

- Tiene buenas propiedades mecánicas y resiste impactos en un rango alto y bajo de temperaturas.
- Es fácil de trabajar en una impresora 3D, ya que genera pocos hilos y residuos.
- Buena resistencia a la abrasión.
- Tiene un costo mucho más bajo que otros materiales equivalentes.

Por último se definió que las piezas se iban a imprimir en la impresora Ultimaker 2+, debido a que es una de las más rápidas y precisas que tiene el laboratorio LINX.

##### 4.4.1. Tiempos y costos de manufactura

El kilo de filamento de ABS que se consigue en el laboratorio proviene de la misma marca de la impresora, es decir Ultimaker. El precio con envío por cada carrete es de \$1,700 pesos mexicanos. A continuación, en la tabla 1 se detallará la cantidad de material y el tiempo de impresión de cada pieza con ayuda del software Ultimaker Cura. Para esto nos basaremos de la figura 23, en donde se ve el explosivo de los recolectores en su versión final. De izquierda a derecha tenemos las siguientes piezas:



<b>Pieza</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Material [g]</b>	<b>Costo [\$]</b>
Tapa para albergar el plomo	101	13	28.78
Contenedor principal	458	72	163.85
Módulo con plano inclinado	283	39	87.55
Contenedor de la canastilla	353	50	113.37
Canastilla	418	49	110.75
Taparrosca externa	21	2	4.87
<b>Total</b>	<b>1 634</b>	<b>225</b>	<b>509.17</b>

Tabla 1: En la tabla se aprecia el tiempo de manufactura, la cantidad de material usado y el costo unitario de cada pieza de los colectores, así como el total de cada una de estas variables en la última fila.

Con la tabla anterior podemos ver el estimado de tiempos, cantidad de material y costos del material aproximado que se utiliza para crear un recolector completo. Si bien el costo total del material es de \$509.17, hay que agregar costos de suministros, electricidad y tiempos de limpieza de las piezas para remover los soportes y detallar cualquier desperfecto que haya podido surgir. Para esto vamos a sumar el 20 % al tiempo total de manufactura así como el precio final. Esto implica que el tiempo total de trabajo para realizar un recolector es de 1960.8[*min*] aproximadamente, lo cual es igual a 32.68[*h*]. Cabe recalcar que este tiempo no es igual al tiempo total que se trabajó en ellos, ya que muchas veces se aprovechaba el tiempo de impresión para limpiar las piezas que ya se habían realizado. Por otro lado el costo total de cada modelo sin tomar en cuenta los costos de diseño es de \$607.

#### 4.5. Manufactura y ensamble del contenedor

Los biólogos nos solicitaron 6 contenedores en total, por lo que se imprimieron múltiples piezas a la vez con tal de ahorrar tiempos e impresiones. Una vez que se terminaba la impresión, se retiraban las piezas y se ponía a imprimir la siguiente ronda de piezas faltantes. Mientras estas últimas se estaban realizando, se retiraban los soportes, se limaban las imperfecciones y se pintaban las letras y logos de las piezas ya impresas, por lo que el tiempo total que conllevó realizar cada uno de los contenedores es menor al calculado.

Conforme se terminaban de imprimir y limpiar las piezas, se fueron probando y ensamblando para ver que no hubiera ningún tipo de error al momento de la impresión 3D. Hubo piezas que tuvieron que rehacerse debido a problemas de impresión, tales como desprendimiento de la cama de la impresora, fracturas en el material ocasionado por cambios de temperatura ambiental repentinos e incluso problemas con que se fue la luz en el instituto en una ocasión. También llegaron a ocurrir accidentes durante la limpieza de las piezas, ya sea por errores al incluir los soportes en la preimpresión o al momento de retirar dichos soportes de las piezas. En la figura 24 se pueden apreciar 3 contenedores finalizados, mientras que en la figura 25 se aprecian los 6 contenedores completados y em-

pacados, antes de ser entregados a los biólogos. Por último la figura 26 muestra el peso total de los contenedores con el plomo ya montado en ellos.



Figura 24: Fotografía con 3 recolectores ensamblados, pintados y finalizados. Se aprecia la cuerda negra que va de la taparroscas al contenedor externo para muestras de ADN, cuya función es evitar que se pierda o se caiga la taparroscas cuando esta se abre bajo el agua.



Figura 25: Fotografía con los 6 recolectores solicitados empacados y listos para ser entregados a los biólogos.



Figura 26: Peso total de un recolector individual con el plomo adentro. Se aprecia como el peso total corresponde con lo estipulado en los cálculos que se hicieron para determinar la cantidad de plomo y el estimado de masa del material en la tabla de cada componente.

## 5. Pruebas de funcionamiento

### 5.1. Pruebas en laboratorio

La primera prueba que se hizo conforme iban saliendo los recolectores de la impresora 3D consistió en comprobar que todas las roscas estuvieran limpias y libres de imperfecciones, con tal de operar como estaba planeado. Después de eso se probó que la canastilla se deslizara correctamente entre las guías y los topes establecidos, todo con la idea de poder extraer e ingresar la canastilla correcta y suavemente del recolector. Al momento de poner el O-Ring en la canastilla, se hicieron múltiples pruebas de ingresar y retirar la canastilla del contenedor para esta pieza, ya que se tuvo que limar de poco en poco este último componente con tal de obtener un mejor sellado.

De igual manera se crearon modelos de estrellas de mar a escala real con tal de simular la operación de los contenedores. Se introdujeron dichos modelos en la canastilla y se simuló el como se iban a ingresar, retirar y manipular con el contenedor. Se confirmó que las dimensiones de la canastilla y del contenedor para esta última eran correctas, y el sistema de guías y canaletas funcionaba adecuadamente.

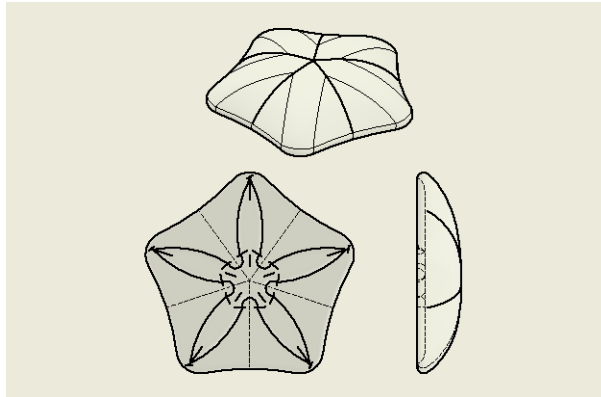


Figura 27: Imagen extraída de un plano normalizado que muestra diferentes vistas de los modelos a tamaño real que se manufacturaron para simular la operación de los recolectores con los especímenes.

Nuevamente se hicieron pruebas con agua en el laboratorio con tal de ver el funcionamiento y la hermeticidad del recolector. Una prueba que se hizo fue llenar el reservorio con agua, enroscar todo el recolector y dejar la canastilla en la posición retraída con tal de probar la efectividad del O-Ring al poner de cabeza el dispositivo. Se observó que había goteos y que lentamente se drenaba el agua del interior, pero por razones relacionadas a las fechas de entrega se decidió que las fugas no eran considerables como para que la suspensión escapara. También se notó que había fugas en las uniones de cada pieza, por lo que se instaló teflón en los hilos de cada pieza con tal de evitar esto.

## 5.2. Pruebas de campo

Una de las primeras cosas que se realizaron en el cenote "Aerolito" consistió en que los buzos se sumergieran con los recolectores después de recibir una pequeña explicación de como utilizarlos. De esta manera los buzos pudieron tener su primer acercamiento al dispositivo y familiarizarse con su principio de funcionamiento.

Una vez que se les explicó su funcionamiento y terminaron de acostumbrarse a los mecanismos del recolector, se cercioraron de llenarlos en su totalidad con agua del cenote previo a iniciar la expedición. Ya que inundaron todos con el agua del lugar, procedieron a transportarlos hasta el área de distribución del espécimen con ayuda de los puntos de anclaje para los mosquetones.

Ya en el sitio se volvieron a abrir los recolectores para cambiar el agua y enjuagar los contenedores por tercera vez. Se tomó un espécimen a la vez, y con ayuda de una espátula, se introdujo en la canastilla de un respectivo recolector. Una vez cerrado el recolector con el espécimen dentro, se colgó el dispositivo sobre la línea de vida de los buzos un tiempo aproximado de 5 – 15[*min*]. Se dejó reposar en este sitio para que las estrellas de mar *Asterinides* cf. *pompom* regurgitaran y la suspensión se asentara en el fondo del dispositivo.



Figura 28: Imagen de un recolector colgando de la vida de línea en el cenote "Aerolito", con un espécimen de *Asterinides* cf. *pompom* dentro.

Una vez pasado el tiempo previamente descrito, se retiró la estrella de mar del contenedor a través de la canastilla y se cerró el recolector inmediatamente para evitar contaminación y/o pérdida de material para la secuenciación posterior.

Por último se tomó una muestra del tejido de la estrella, al cortar uno de sus 5 tentáculos regenerables para obtener muestras de ADN en el laboratorio. Para esto se abrió el contenedor externo previo al procedimiento quirúrgico, seguido de introducir la muestra biológica en el mismo, para cerrar el contenedor externo al final con la taparroca.

### 5.3. Observaciones y áreas de oportunidad

Una de los primeros comentarios que realizaron los buzos fue que los recolectores cumplieron su propósito, ya que facilitaron y agilizaron la toma de muestras para las estrellas de mar de interés. Las dimensiones y ergonomía del dispositivo fue ideal según el buzo, y si bien comenta que los sintió un poco pesados al cargar 4 a la vez, no le molestó ya que dicho peso cumplió el propósito y evito que flotar. También le resultaron útiles los puntos de anclaje, ya que utilizó unos clips para anexarlos a su chaleco para buceo en cuevas.

Un segundo punto positivo que notaron fue que redujo drásticamente la manipulación de la especie, reduciendo el estrés innecesario y por ende ayudando a la preservación de dicha especie amenazada. En contraste, los buzos realizaron una segunda expedición imprevista a los cenotes para obtener más muestras. Para esto no contaban con más recolectores, por lo que utilizaron bolsas herméticas para obtener las muestras. Los buzos comentaron esto hizo muy fácil su manipulación, pero los biólogos no estuvieron de acuerdo con dicho procedimiento, ya que las estrellas de mar fueron presionadas con los dedos para inducir la regurgitación, resultando en grandes niveles de estrés para los especímenes.

También nos comentaron que durante la expedición, mientras los buzos se familiarizaban con los recolectores, un recolector sufrió una ruptura del asa al ejercer un poco de fuerza con tal de cerrarlo. De igual manera nos comentaron que otro recolector sufrió una fractura en cuanto al contenedor externo para las muestras de tejido. Esto significa que se tiene que mejorar el diseño para reducir la posibilidad de otra fractura, así como supervisar más de cerca el proceso de manufactura, ya que además de la expedición subacuática, el equipo tiene que trasladarse a través de la jungla para poder llegar al cenote.

Otra área de mejora que nos solicitaron tuvo que ver con la hermeticidad del sistema, ya que aunque las filtraciones fueron pocas, consideran que hubo una pérdida de varios mililitros del agua recolectada dentro de los dispositivos. Se hizo énfasis en que los recolectores tienen que ser herméticos completamente para poder ser transportados posteriormente a través de la selva sin necesidad de llevar algún contenedor adicional. También se tiene que mejorar el diseño de las taparrosas del contenedor externo, ya que algunas se rompieron al ser utilizadas.

## 6. Rediseño con base en la retroalimentación de campo

### 6.1. Proceso de rediseño

Con base en las observaciones y áreas de oportunidad estipuladas en la sección 5.3, se necesita un producto con mayor resistencia que a su vez tenga una hermeticidad casi perfecta. Este primer punto se empezó a trabajar desde el diseño como se observa a continuación.

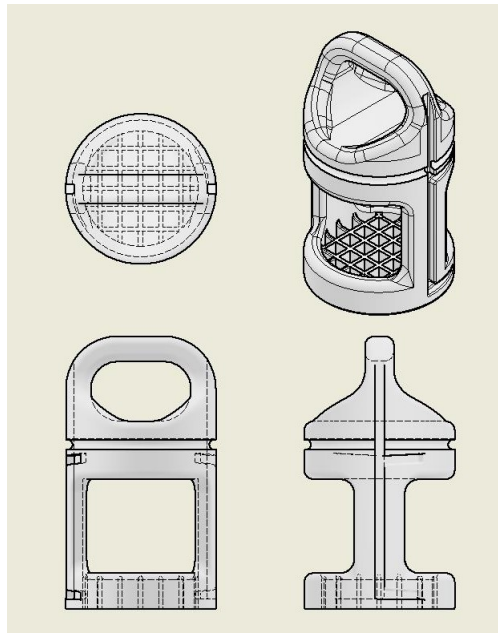


Figura 29: Canastilla para las estrellas de mar con modificaciones en el diseño del asa, los cuales otorgan una mayor rigidez por medio de unos nervios que reducen los concentradores de esfuerzo.

Después de modificar la canastilla así como se observó en la figura 29, se modificaron las dimensiones del contenedor que la alberga para que todo embonara. Se aumentó la altura de dicho contenedor con tal de que el O-Ring quede más abajo y mejore el sello al aumentar la deformación del mismo.

### 6.2. Modificaciones en los parámetros de impresión

Una vez modificada la canastilla y mejorado el sello, era necesario aumentar la resistencia general del recolector ante impactos. Con tal de lograr esto se decidió modificar los parámetros de la impresora 3D durante la impresión de los modelos, tales como la cantidad de las paredes y el porcentaje de relleno de las

piezas. Para determinar la influencia de cada una de estas variables se realizó el siguiente experimento.

### **6.3. Experimentación con los parámetros de impresión**

#### **6.3.1. Introducción**

Este experimento tiene como propósito determinar la influencia que tiene la cantidad de paredes y el porcentaje de relleno con respecto a las cualidades mecánicas de las piezas impresas. Para esto se teoriza que entre más sólida sea la pieza, mayor será su resistencia ante esfuerzos cortantes que puedan surgir por la orientación de las capas con las que se imprimió la pieza.

#### **6.3.2. Objetivo**

Se imprimirán diferentes probetas con variaciones en los parámetros de impresión. Con base en los principios de mecánica de sólidos, se analizarán dichas probetas al poner una carga en uno de sus extremos, simulando los esfuerzos cortantes que sufre una viga en voladizo. Al variar las cargas ejercidas en dichas probetas, se podrá determinar la resistencia ante esfuerzos cortantes.

#### **6.3.3. Materiales y equipamiento necesario**

- Impresora 3D Ultimaker 2+.
- Material ABS blanco en filamento de  $\varnothing = 2.85[mm]$ .
- Clamps de bancada.
- Mesa fija.
- Diferentes herramientas que fungan como pesas.
- Báscula electrónica.

#### **6.3.4. Requerimientos previos**

Después de imprimir las piezas de prueba en la impresora 3D, se necesita limpiarlas para remover los soportes de adhesión al plato. De igual manera se analizan las piezas visualmente para descartarlas en caso de alguna imperfección en la impresión.

#### **6.3.5. Desarrollo**

1. Se diseñó una viga de  $1x1x70[mm]$  en Inventor, con un fillet de  $3[mm]$  en sus aristas más largas.
2. Se mandó a imprimir la viga en la impresora Ultimaker 2+ en vertical, variando el número de paredes (2, 3 y 4) y el porcentaje de relleno (10 %, 18 % y 26 %). Por esto se obtuvieron 9 barras cuadradas al final.



3. Se retiraron las vigas de la impresora y se limpiaron para remover rebabas e imperfecciones.
4. Se numeró cada una de las vigas para poder identificarlas correctamente.
5. Se imprimió un soporte auxiliar, cuyo objetivo consta en asegurar la viga con tal de que 20[mm] sean los que están empotrados, dejando el resto de los 50[mm] en voladizo.
6. Se tomaron las diferentes herramientas (llaves inglesas y dados) y se pesaron en la báscula para obtener dos conjuntos de 100[g] y otro de 300[g].
7. Se tomaron 8 envases de plástico con taparrosca y se llenaron con agua hasta que cada uno de ellos pesara exactamente 500[g].
8. Se creó una tabla para anotar el peso máximo que aguantó cada una de las vigas antes de romperse, así como sus parámetros de impresión.
9. Se utilizó una clamp de bancada para asegurar cada una de las vigas en voladizo, con ayuda del soporte auxiliar.
10. Se aseguró el asa de una bolsa de tela al extremo en voladizo de la viga, y poco a poco se le fueron agregando los conjuntos de herramienta y los envases de plástico, de tal manera que se incrementó el peso sobre la viga en conjuntos de 100[g] hasta la ruptura de las vigas.
11. Se anotó el peso máximo que soportó cada viga antes de su ruptura en la tabla.
12. Se calculó la fuerza aplicada promedio que soportó cada parámetro de impresión al multiplicar el promedio del peso máximo soportado con la gravedad en la Ciudad de México con la distancia de la viga en voladizo.

#### **6.3.6. Resultados**

Tras haber realizado cada uno de los pasos del desarrollo previamente mencionado, se obtuvo la siguiente tabla:

		Num. de Prueba	1	2	3	4	5		
#	Cantidad de paredes	Porcentaje de relleno	Peso máximo [g]					Promedio peso máximo [kg]	Fuerza aplicada [N]
1	2	10 %	1600	1500	1500	1800	1300	1.540	0.753
2		18 %	2000	1900	2100	1800	2000	1.960	0.958
3		26 %	1800	2300	2200	2300	-	2.150	1.051
4	3	10 %	2000	1900	2100	1800	1700	1.900	0.929
5		18 %	2300	2500	2600	2400	2500	2.460	1.203
6		26 %	2900	2700	2400	3000	2600	2.720	1.330
7	4	10 %	2400	2500	2500	2300	2700	2.480	1.213
8		18 %	2800	2600	-	3000	3200	2.900	1.418
9		26 %	4100	3300	3300	3300	4000	3.600	1.760

Tabla 2: En la tabla se aprecian los resultados obtenidos ante las pruebas con las diferentes probetas. Cada una de las 9 combinaciones entre los parámetros de impresión se realizó 5 veces para obtener el peso promedio máximo que aguantó cada probeta.

Para obtener los valores de la columna de “Fuerza Aplicada” de la tabla 2, se multiplicó el promedio del peso máximo que aguantó cada probeta por la gravedad en la Ciudad de México ( $9.78 \frac{m}{s^2}$ ) por la distancia de la probeta en voladizo ( $0.05[m]$ ).

### 6.3.7. Conclusiones

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos con las probetas, se realizó la siguiente gráfica para visualizar de mejor manera como afectan los parámetros de impresión la resistencia de las piezas ante fuerzas aplicadas:



Figura 30: Gráfica que muestra los resultados del experimento al variar los parámetros de impresión de cada probeta. La línea azul representa las probetas con dos paredes, la roja con tres y la amarilla con 4. El eje de las abscisas muestra el porcentaje de relleno mientras que el eje de las ordenadas representa el peso máximo promedio soportado por las probetas antes de su ruptura.

En la gráfica de la figura 30 se puede apreciar como es que entre más sólida sea la pieza, mayor es la resistencia que esta tiene ante fuerzas aplicadas. Esto se ve en las diferentes rectas, las cuales tienen una pendiente positiva, lo que demuestra que a mayor porcentaje de relleno, mayor resistencia. De igual manera se puede observar como las gráficas se desplazan positivamente en el eje de las ordenadas al aumentar el número de paredes internas.

Con estos resultados podemos determinar que si queremos aumentar la resistencia de las piezas ante fuerzas externas aplicadas a los contenedores, tenemos que aumentar el número de paredes y/o el porcentaje de relleno de las piezas al ingresar los parámetros de impresión. Que parámetro y cuánto habrá que aumentarlo estará determinado por los tiempos de impresión y el presupuesto disponible que se tenga para el siguiente lote de contenedores, ya que estos dos factores aumentan de manera proporcional al incremento en cualquiera de las dos variables mencionadas sobre los parámetros de impresión.

## 7. Conclusiones

A través de este trabajo se mostró el proceso de diseño, desarrollo y manufactura de unos contenedores para muestras biológicas para las estrellas de mar *Asterinides* c.f. *pompom*, cuyo objetivo es imprescindible para el estudio de dicha especie marina amenazada única en el mundo al no existir un sistema comercial similar que cumpla con el mismo propósito.

Se mostraron las diferentes versiones de diseño así como los puntos buenos y las áreas de mejora que se presentaron con cada una, tanto con comentarios y observaciones realizadas en el laboratorio así como con los buzos. La quinta versión de estos sistemas se probó en campo y cumplió el objetivo de tener un diseño amigable e intuitivo para los buzos, que a su vez permitió mantener la integridad física de dichos especímenes, otorgándonos información muy valiosa de campo que nos llevó a la creación de la sexta y última versión de los recolectores. Esta última versión queda pendiente para ser manufacturada y enviada a los biólogos, para que se pueda probar en campo y podamos obtener más observaciones o una validación por parte de ellos, pero esto queda pendiente para un trabajo a futuro.

## 8. Bibliografía

### Referencias

- [1] Boletín UNAM. *Peligra la cueva “El Aerolito”, donde se descubrió la primera estrella de mar cavernícola del mundo*. URL: [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013\\_241.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013_241.html). (accedido: 29.11.2022).
- [2] Fernando Calderón-Gutiérrez, Carlos A. Sánchez-Ortiz y Leonardo Huato-Soberanis. “Ecological patterns in anchialine caves”. En: *PLOS ONE* 13 (nov. de 2018), págs. 1-19. DOI: 10.1371/journal.pone.0202909. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202909>.
- [3] Guadalupe Bribiesca y Francisco Solís-Marín Alejandro Zaldívar. *Estudio inédito documenta rasgos de especie marina endémica en cueva*. URL: [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2020\\_678.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2020_678.html). (accedido: 1.12.2022).
- [4] Francisco Márquez-Borrás, Francisco A. Solís-Marín y Luis M. Mejía-Ortiz. “Troglomorphism in the brittle star *Ophionereis commutabilis* Bribiesca-Contreras et al., 2019 (Echinodermata, Ophiuroidea, Ophionereididae)”. En: *Subterranean Biology* 33 (2020). eprint: <https://doi.org/10.3897/subtbiol.33.48721>. URL: <https://doi.org/10.3897/subtbiol.33.48721>.
- [5] Andrea Fisher. *National Geographic en español: Así son los cenotes: el sistema subterráneo único que conecta a toda la Península de Yucatán*. URL: <https://www.ngenespanol.com/ecologia/que-es-un-cenote-y-cuales-son-sus-caracteristicas/>. (accedido: 28.11.2022).
- [6] Flottweg. URL: <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/suspension/>. (accedido: 1.1.2023).
- [7] Stratasys. *Fused Deposition Modeling - FDM Technology*. URL: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/>. (accedido: 31.07.2023).
- [8] Creality Experts. *Choosing a 3d Printer: Filament or Resin?* URL: <https://www.crealityexperts.com/filament-or-resin-3d-printer>. (accedido: 14.12.2022).
- [9] Joseph Flint. *The Pros and Cons of Resin-based 3D Printing*. URL: <https://3dinsider.com/resin-3d-printing/>. (accedido: 18.12.2022).
- [10] Carville. *Properties Applications of Acrylic*. URL: [https://www.carvilleplastics.com/latest\\_news/key-properties-acrylic/](https://www.carvilleplastics.com/latest_news/key-properties-acrylic/). (accedido: 18.12.2022).
- [11] Dielectric Manufacturing. *Aluminum*. URL: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/aluminum/>. (accedido: 18.12.2022).
- [12] Britannica. *Properties of wood*. URL: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Thermal-properties>. (accedido: 18.12.2022).

- [13] Envases.mx. *Aluminio para bebidas 16 Oz*. URL: <https://www.envases.mx/es/soluciones-de-embalaje/cat%C3%A1logo-de-productos/envases-de-aluminio-para-bebidas/product-details/?filterBy=1382&product=1967>. (accedido: 28.12.2022).
- [14] KoeppiK. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=78136658>. (accedido: 28.12.2022).
- [15] Scuba.com. URL: [scuba.com/blog/scuba-guides/lead-scuba-weights-explained/](https://scuba.com/blog/scuba-guides/lead-scuba-weights-explained/). (accedido: 11.1.2023).
- [16] Byjus. URL: <https://byjus.com/physics/archimedes-principle/>. (accedido: 11.1.2023).
- [17] Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Seawater>. (accedido: 11.1.2023).
- [18] The Editors of Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/density>. (accedido: 18.1.2023).
- [19] The Editors of Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/lead-chemical-element>. (accedido: 18.1.2023).
- [20] Formalabs. URL: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>. (accedido: 19.1.2023).
- [21] Team Xometry. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>. (accedido: 19.1.2023).