



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

---

**Diseño e implementación de un sistema para el  
monitoreo de erizos de mar energizado por  
celdas solares flexibles**

---

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**LICENCIADO EN INGENIERIA EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

PRESENTA

**Jesús Javier Figueroa Moo**

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Edith Osorio de la Rosa

ASESORES

Dr. Javier Vázquez Castillo

Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Dra. Nancy Cabanillas Terán

Dr. Francisco López Huerta



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, 31 DE OCTUBRE DE 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

**ÁREA DE TITULACIÓN**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE  
TESIS DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA  
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

### LICENCIADO EN INGENIERIA EN SISTEMAS DE ENERGÍA

#### COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:   
Dra. Edith Osorio de la Rosa

ASESOR:   
Dr. Javier Vazquez Castillo

ASESOR:   
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

ASESOR:   
Dra. Nancy Cabanillas Terán

ASESOR SUPLENTE:   
Dr. Francisco López Huerta



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, 21 DE SEPTIEMBRE DE 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

ÁREA DE TITULACIÓN

---

## **Dedicatorias**

Esta tesis va dedicada a mi madre por su apoyo, cariño, sacrificio y confianza pues sin sus palabras de aliento me podría haber quedado atrás en el camino, es un orgullo dedicarle mi esfuerzo.

A mis compañeros y amigos, por todo su apoyo recibido a través de los años, fue una inspiración tener compañeros tan dedicados e inteligentes, cada uno me ofreció la mano cuando más confundido me encontraba, me motivaron de distintas formas a aspirar a lograr grandes cosas.

Finalmente me gustaría dedicarle este trabajo a los docentes que me compartieron sus conocimientos pues ellos son la base de todo lo que he aprendido.

---

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora, la Dra. Edith Osorio de la Rosa, por su paciencia la hora de guiarme, por sus conocimientos que me fueron de gran ayuda a lo largo de las etapas de este trabajo, sus consejos que de igual manera me ayudaron muchas veces a tener una mejor perspectiva en los momentos de mayor confusión.

Me gustaría agradecer a la Dra. Nancy Cabanillas Terán, en primer lugar, por su confianza brindada a lo largo de todo el proceso de este trabajo, además de su guía e información ofrecida, gracias a su experiencia, su apoyo y ayuda en las pruebas realizadas en campo.

También un agradecimiento especial a todos los docentes, pues por su sabiduría, experiencia y rigurosa dedicación, hoy logre lo que he terminado, fue gracias a ellos y lo que me aportaron a lo largo de los cursos que pude obtener las herramientas necesarias para resolver los problemas ingenieriles que se me presenten a donde quiera que vaya.

A mis padres, especialmente a mi madre, mi más grande inspiración, la figura más grande en mi vida, quien siempre confió en mí, me apoyo y me impulso en los momentos más difíciles, por ella aprendí a no rendirme y siempre seguir adelante sin importar las dificultades que se presenten en el camino.

Finalmente, a mis amigos y compañeros que estuvieron a mi lado en este recorrido, los buenos amigos al igual que la familia son un gran motor de impulso, quiero agradecer todo el apoyo brindado en las distintas etapas de la carrera, las horas de trabajo y todas aquellas noches de desvelos las atesorare por siempre y las llevare en mi mente y corazón, fueron bastantes los retos que pasamos todos juntos, gracias por estar siempre ahí.

Este trabajo se realizó con la ayuda del Conacyt, a través de la beca de licenciatura del proyecto titulado: Nichos isotópicos de invertebrados marinos clave para entender la degradación de los arrecifes coralinos del Caribe. FORDECYT-PRONACES/1312440/2020.

---

## Resumen

El objetivo de este trabajo se enfoca en aprovechar la energía producida por celdas solares flexibles con el fin de energizar un sistema de monitoreo de erizos de mar dentro de su hábitat, debido a la gran versatilidad de la tecnología solar, se seleccionó este método ya que el animal de interés a monitorear tiene una vida nocturna activa, lo que queda perfecto para el panel solar, ya que permite cargar el sistema durante el día y poder utilizar la energía almacenada por las noches. Este sistema de monitoreo utiliza una cámara nocturna con un banco de diodos emisores de luz infrarrojos, el cual se monta sobre una base que se construyó pensando en la fuerza de la marea y con el propósito de proporcionar la mayor estabilidad posible, los materiales que se utilizaron para la base fueron el concreto y tubos de PVC

Así, el objetivo del sistema de monitoreo de erizos (será mencionado como SIMOER a partir de ahora) es adquirir imágenes desde que comience a operar, con una frecuencia sintonizable, lo que da la posibilidad de observar en intervalos todos los eventos que ocurran dentro del campo de visión de SIMOER, además esta forma de capturar datos permite una administración más eficiente de la energía utilizada, al final el sistema opera con 86 W, otra ventaja es que el sistema no necesita estar encendido a cada segundo, lo que significa una menor temperatura dentro del sistema y reduce las posibilidades de fallo o de averías. Al final del trabajo se puede observar cómo después de realizar las pruebas necesarias en el día o durante la noche, en distintos escenarios, y tanto dentro como fuera del agua, durante la prueba final de forma exitosa se logró alimentar de energía los dos bancos de baterías que SIMOER utiliza para funcionar de forma continua hasta por 12 horas de manera correcta y capturando fotos completamente visibles, así mismo gracias a la base no se obtuvieron imágenes con movimiento no deseado, logrando una buena estabilidad.

---

## Contenido

<b>Dedicatorias</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>Contenido</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO I.</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>I.1 Generalidades</b>	<b>7</b>
<b>I.2 Marco teórico</b>	<b>8</b>
<b>I.4 Objetivo</b>	<b>11</b>
<b>I.5 Objetivos específicos</b>	<b>11</b>
<b>I.6 Descripción capitular</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO II.</b>	<b>12</b>
<b>CELDA SOLARES FLEXIBLES Y SISTEMAS DE MONITOREO</b>	<b>12</b>
<b>II.1 Celdas solares flexibles</b>	<b>13</b>
Parámetros de funcionamiento de una celda solar	15
<b>II.2. Aplicaciones.</b>	<b>17</b>
<b>II.3. Sistemas de monitoreo</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO III.</b>	<b>19</b>
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>19</b>
<b>III.1. Base de sistema de monitoreo</b>	<b>20</b>
<b>III.2. Panel fotovoltaico</b>	<b>22</b>
<b>III.3. Microcontroladores (Raspberry)</b>	<b>23</b>
<b>III.4. Baterías</b>	<b>27</b>
<b>III.5. Cálculo del número de baterías</b>	<b>29</b>
<b>III.6. Desarrollo de código de Raspberry</b>	<b>30</b>
<b>III.7. Diagrama electrónico a bloques de SIMOER</b>	<b>31</b>
<b>III.8. Implementación de Raspberry con leds y banco de baterías.</b>	<b>35</b>
<b>III.9. Sistema de monitoreo</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO IV.</b>	<b>41</b>
<b>RESULTADOS</b>	<b>41</b>
<b>IV.1. Características eléctricas de la celda solar</b>	<b>42</b>
<b>IV.2. Desempeño del banco de batería</b>	<b>43</b>
<b>IV.3. Adquisición de las imágenes</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO V.</b>	<b>55</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>55</b>



# CAPÍTULO I.

# INTRODUCCIÓN

## I.1 Generalidades

La capacidad de generación de energía solar fotovoltaica ha aumentado significativamente en la última década. Su contribución al suministro eléctrico global en el 2018 fue de 600 TWh casi el 2.4%, la cual está predicha a incrementar al 22% en 2025 y llegar arriba del 70% (40,000 TWh) en 2050. Sin embargo, el desarrollo de grandes instalaciones de sistemas fotovoltaicos a gran escala se ve limitado, esto debido a diversas cuestiones que principalmente se pueden atribuir a tres factores importantes: 1) el costo y la disponibilidad del terreno, 2) la disminución de la eficiencia a altas temperaturas de operación de la celda fotovoltaica, y 3) el impacto ambiental sobre la biodiversidad. Por estos factores, actualmente surge la motivación y necesidad de introducir tanto sistemas fotovoltaicos integrados en edificios como sistemas fotovoltaicos flotantes, aprovechando así la instalación tanto en tierra como en alta mar. Para el caso de los sistemas fotovoltaicos implementados en alta mar, los podemos clasificar en instalaciones para barcos, como fotovoltaica flotante (FPV, por sus siglas en inglés: floating photovoltaic) y en islas. De los beneficios que nos proporcionan los sistemas FPV, se encuentran los siguientes: ahorra el espacio que sería utilizado en tierra así pudiendo implementarla para uso agrícola, además que debido a los altos niveles de velocidad del viento que se encuentra en alta mar, junto con la presencia de agua, hay un potencial de enfriamiento natural que puede mejorar el rendimiento fotovoltaico. Además de estas ventajas, tenemos una menor cantidad de obstáculos que podrían causar pérdida por las sombras y una menor cantidad de polvo en comparación con los sistemas fotovoltaicos terrestres. Aunado al hecho de que alrededor del 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de una costa oceánica, un sistema FPV puede ser ubicado estratégicamente para suministrar energía a estas regiones. Además, la energía extraída de los sistemas FPV podría ser un gran suministro para las plataformas marinas y barcos lo que evitaría en casi el 3% de la emisión global de gases de efecto invernadero emitido por ellos. Todo esto está llevando a que los sistemas FPV se conviertan en un tema actual de investigación en este momento. Los sistemas FPV se clasifican respecto a sus estructuras de soporte en cuatro grupos principales que son: (1) película delgada: no se requiere una embarcación o casco (pontón) fuerte como estructura de soporte debido al bajo peso de los módulos de película delgada; (2) sumergido: puede instalarse con o sin pontón, (3) arreglos inclinados: necesita pontones rígidos; y (4) un nuevo enfoque que utiliza módulos de pontones basados en material de cambio de fase micro-encapsulado. Los beneficios comunes de estas instalaciones se identificaron como (i) reducir la evaporación del agua del embalse / estanque en el que se encuentran estos sistemas y (ii) disminuir el crecimiento de algas. Por otro lado, la implementación de SFV en el mar del caribe mexicano, abre nuevas posibilidades para el aprovechamiento y uso eficiente de la energía producida, como por ejemplo para energizar dispositivos que se podrían emplear para el monitoreo de la vida marina en los arrecifes coralinos. En el desarrollo de esta tesis se propone un sistema FPV para energizar un sistema de monitoreo diurno y/o nocturno del erizo de mar *Diadema antillarum*, que se encuentra en los arrecifes someros de las costas del caribe mexicano. Estos

erizos son componentes importantes de las comunidades bentónicas marinas, son consumidores clave que ejercen una fuerte influencia en la comunidad debido a su moldeable conducta alimenticia (Carpenter, 1986), y su ramoneo controla la biomasa de macroalgas controlando así el crecimiento excesivo de éstas sobre los corales. *D. antillarum* es una especie clave que sufrió una mortandad masiva en 1984 y actualmente se han reportado mortandades fuera de lo común. En este sentido el monitorear el comportamiento de los hábitos nocturnos de los erizos es de interés científico ya que este contribuye al conocimiento de este equinoideo y su papel ecológicos en los fondos coralinos someros, abriendo así la posibilidad de entender su comportamiento nocturno y servir como línea base para entender los diferentes hábitos de ramoneo y eventualmente adecuar sistemas de protección para éstos, por ejemplo, evitando el contacto con sus depredadores en las zonas de alimentación. En este sentido, el desarrollo de dispositivos para monitoreo de fauna marina toma relevancia y gran importancia. La implementación de este tipo de sistemas de monitoreo de erizos de mar nos brindará información específica de su comportamiento durante su actividad nocturna, en general de las zonas donde acostumbra a llevar a cabo su alimentación. El trabajo de tesis propone el diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de erizos de mar energizado mediante celdas solares flexibles. Este tipo de sistema de sensores se propone debido a que el ambiente donde el erizo de mar que estudiaremos habita, son aguas someras y con alto potencial para sistemas solares.

## I.2 Marco teórico

Las consecuencias actuales del modelo socioeconómico basado en el consumo y dependencia de combustibles fósiles han alcanzado tal nivel de dramatismo durante los últimos años que ya nadie niega que el actual modelo energético está en crisis y por lo tanto en vías de transformación. Es urgente redirigir el actual sistema centralizado y basado en los recursos fósiles a un sistema básicamente distribuido y sostenido en las energías renovables.[1]

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no resultan tan nuevas, como lo es la leña o las centrales hidroeléctricas, ni renovables en el sentido estricto (geotermia), y que no siempre se utilizan de forma blanda o descentralizada, y su impacto ambiental puede llegar a ser importante.

Las energías renovables a lo largo de la historia y hasta bien entrado el siglo XIX, han cubierto la práctica totalidad de las necesidades energéticas del hombre, solo en los últimos cien años han sido superadas, primero por el empleo del carbón y a partir de 1950 por el petróleo y en menor medida por el gas natural, la energía nuclear con 441 centrales nucleares en 2003, con una potencia instalada de 360 GW, cubre una parte insignificante del consumo mundial y a pesar de algunas previsiones optimistas su papel será siempre marginal.

Cada día el sol seguirá saliendo para todos los habitantes del mundo y continuara enviándonos cantidades asombrosas de calor y energía, sin embargo a pesar de las grandes

cantidades de energía que desprende no hay que olvidar que se trata de una forma de energía difusa y poco concentrada además de las dificultades existentes en el aprovechamiento directo de la radiación solar, lo que evoca en una sociedad en la que el consumo de este tipo de energía es aprovechado solo por algunas fábricas industriales y grandes metrópolis en su mayoría.[2]

Si bien no toda la energía emitida por el sol llega a la Tierra, esto se debe a que la Tierra solo constituye una insignificante superficie captadora que se sitúa a 150 millones de km, es por ello por lo que la potencia interceptada es de tan solo 173.000 TW, lo que equivale a una parte muy pequeña de la emitida por el sol, aun así, es aproximadamente 10 mil veces mayor que la proporcionada por todas las formas de energía empleadas por los humanos en la tierra.

La constante solar se define como la cantidad de energía recibida por unidad de superficie y unidad de tiempo sobre una superficie perpendicular al sol situada en el límite de la atmósfera, a la distancia media anual Tierra-Sol. Su valor es de  $1,353 \text{ W/m}^2$  y representa la energía media que llega a la capa más externa de la atmósfera terrestre. La energía expresada por la constante solar no llega de forma total a la superficie de la tierra; cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre esta pierde intensidad.

Debido a complejos fenómenos de absorción, reflexión y difusión que ocurren en las capas de la atmósfera por la acción de los gases que la constituyen, el vapor de agua y de las partículas en suspensión, el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire tienen un poder de absorción muy débil, el ozono absorbe la mayor parte de la radiación UV y tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono absorben una fracción de la radiación IR.

Así, esta energía corresponde a una radiación electromagnética conformada por un conjunto de longitudes de onda ( $\lambda$ ), cuya velocidad de propagación es de 300,000 km/s. Esta radiación se descompone y es llamada espectro solar, está formado por tres bandas de longitudes de onda que abarcan un amplio rango de valores. [1] principalmente se dividen en los siguientes valores conocidos:

- Ultravioleta (UV):  $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$
- Visible:  $0.35 < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$
- Infrarrojo cercano (NIIR):  $0.75 < \lambda < 2.5 \mu\text{m}$

Cada longitud de onda transporta una cantidad de energía, siendo el valor máximo de  $0.47 \mu\text{m}$  lo que significa que está dentro de la zona visible del espectro solar, por lo que en conjunto la radiación visible transporta el 47% de la energía solar, la radiación IR el 46%, mientras que el 7% restante es transportado por la radiación UV.

Así, la distribución de la energía solar en la tierra no es uniforme y existen muchos factores de los que depende, por un lado, está la hora del día, la latitud del lugar y la orientación de la superficie receptora, y por otro, las condiciones climatológicas. Los primeros factores son calculables sin problemas, pero las condiciones climatológicas solo son predecibles en términos estadísticos.

Por lo que es necesaria la evaluación del recurso solar para saber la radiación solar que llega en cada momento a un lugar determinado, y con ello aprovechar al máximo el dimensionamiento de las diversas tecnologías que basan su funcionamiento con la energía del Sol. Para ello, distintas instituciones como la administración nacional de aeronáutica y el espacio (NASA por sus siglas en inglés) o el servicio solimétrico mexicano, utilizan instrumentos que permiten poder llevar a cabo mediciones de diversas variables de la radiación solar, así con los resultados obtenidos por distintos métodos, tanto de la medida como de cálculo en diversos puntos, las instituciones pueden elaborar los mapas solares que permite obtener datos de mucha confianza a quienes estén interesados en utilizar la información recabada.

La utilización de energías renovables se considera ampliamente como una alternativa prometedora al sistema de combustibles fósiles convencional y, por lo tanto, atrae cada vez más la atención [2–6]. Actualmente, la producción de energía a partir de fuentes de energía renovable aumenta cada año, y la mayoría de los países tienen como objetivo lograr una producción de energía renovable superior al 15 % para 2020 [7].

Una de las fuentes de recolección de energía más utilizadas es la celda fotovoltaica (PV-cell) debido a su simplicidad y alta potencia de salida. En particular, las células fotovoltaicas flexibles ofrecen un gran potencial para aplicaciones portátiles y aisladas. Además, esta tecnología en fechas recientes se ha empezado a utilizar como una herramienta poderosa en sistemas de monitoreo de vida salvaje. Este tipo de dispositivos energéticamente sustentable con energía solar promete transformar la recopilación de datos ambientales y de comportamiento, mejorando en gran medida el bienestar animal.

Investigadores de la University College de Dublín ha mostrado que los paneles solares de sistema de seguimiento (rastreadores) son una fuente de energía eficaz durante las largas pruebas; demostrando cómo su uso podría abordar algunos de los serios desafíos que enfrentan quienes se dedican a la conservación y la investigación de campo.

#### I.4 Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo de erizos de mar energizado mediante celdas solares flexibles.

#### I.5 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema de monitoreo de erizos de mar energizado mediante energía renovable.
2. Realizar la construcción del prototipo de monitoreo.
3. Evaluar el desempeño del sistema de monitoreo en condiciones controladas de agua y profundidad.
4. Implementar el sistema de monitoreo en campo.

#### I.6 Descripción capitular

El presente trabajo se estructura con cinco capítulos, las descripciones de cada uno de ellos son las siguientes:

*Primer capítulo:* Se redacta una introducción sobre celdas solares flexibles y sistemas de monitoreo. Donde se realiza una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de las celdas solare flexibles, identificando sus características eléctricas. También se hace un resumen de sistemas de monitoreo de vida silvestre energizados mediante energía renovable.

*Segundo capítulo:* Se presenta el diseño e implementación del sistema de monitoreo.

*Tercer capítulo:* Se detalla la metodología experimental sobre obtención de curvas I-V y eficiencia de la celda solar. Aquí también se hace una descripción detallada de los componentes del sistema de monitoreo, como se instrumentó, como se midió, y la programación del microcontrolador usado.

*Cuarto capítulo:* Se describen los resultados experimentales.

*Quinto capítulo:* Se concluye el trabajo respecto a las respuestas que se encontraron en el capítulo anterior y se plantean algunos posibles trabajos futuros

## **CAPÍTULO II.**

# **CELDA SOLARES FLEXIBLES Y SISTEMAS DE MONITOREO**

---

En esta sección se presentarán el funcionamiento de las celdas solares y los elementos fundamentales que compondrán el sistema de monitoreo. Así también, presenta una revisión bibliográfica de sistemas de monitoreo de vida silvestre reportados en la literatura.

## II.1 Celdas solares flexibles

Debido al rápido desarrollo de la tecnología y al aumento en la preocupación mundial por el calentamiento global, se han hecho muchos esfuerzos para desarrollar fuentes de energía verdes, renovables y económicas que se adapten a cualquier superficie o dispositivo.

La energía solar tiene dos características específicas que son muy importantes y la diferencian de las fuentes energéticas usuales: La dispersión y la intermitencia.

La energía solar es una forma de energía que presenta una gran dispersión, esto debido a su densidad, que bajo condiciones muy favorables difícilmente alcanza  $1000 \text{ W/m}^2$ , este valor queda muy por debajo de las densidades con las que normalmente trabaja la ingeniería, por lo que para lograr grandes densidades energéticas son necesarias extensas superficies de captación o en su lugar, sistemas de concentración para los rayos solares.

Entonces, el primer paso para poder aprovechar la energía es su captación, en este aspecto destacan dos sistemas con características distintas: sistemas pasivos y sistemas activos.

Conocemos como sistemas pasivos a aquellos que no requieren de ningún dispositivo para poder captar la energía solar, esto hace que exista una íntima relación entre el sol, el almacenamiento del calor y el espacio, esta relación es posible gracias a la aplicación de distintos elementos arquitectónicos.[8]

Por otro lado, los sistemas activos basan su funcionamiento en la captación de la radiación solar, utiliza un elemento con determinadas características conocido como colector.

Según las características que posea el colector, el aprovechamiento de la energía solar se puede observar bajo dos puntos de vista distintos: la conversión térmica (el aprovechamiento del calor obtenido en la radiación solar) y la conversión eléctrica (aprovechamiento de energía luminosa (fotones) de la radiación solar para poder generar de forma directa corriente eléctrica (efecto fotovoltaico)).[9]

El efecto fotovoltaico se describe como el fenómeno que ocurre en un material semiconductor como consecuencia al incidir luz en él, esto provoca que se liberen electrones que puedan generar una corriente eléctrica. Los materiales semiconductores se caracterizan por su conductividad eléctrica intermedia entre un aislante y un conductor, uno de sus rasgos distintivos más importantes es que en ellos existen dos tipos de portadores de corriente: unos dotados de carga eléctrica negativa, constituidos por electrones libres y otros dotados de carga eléctrica igual en magnitud, pero de signo positivo, que se denominan huecos.

---

Ciertos semiconductores presentan predominantemente conducción por huecos y se denominan semiconductores tipo  $p$  y otros presentan predominantemente conducción por electrones y se denominan semiconductores tipo  $n$ . [10]

La cualidad más importante que posee es que la resistividad de un semiconductor independientemente de su naturaleza (silicio, germanio, arseniuro de galio, fosforo de galio, sulfuro de cadmio, sulfuro de cinc, etc.), puede disminuirse añadiendo pequeñas cantidades de impurezas apropiadas, o incluso puede hacerse que un semiconductor tipo  $p$  pase a ser un tipo  $n$ , o viceversa. A este proceso de adición controlada de impurezas que afectan las propiedades eléctricas del semiconductor se le denomina dopaje o dopado, por ejemplo, en el semiconductor más utilizado hoy en día con fines electrónicos, el silicio, al agregarle impurezas de fosforo o de arsénico este se hace de tipo  $n$ , mientras que al utilizar las impurezas de boro o de galio este se hace de tipo  $p$ , sin embargo, el alto grado de pureza que se necesita para obtener semiconductores es el motivo por el que su precio es tan alto.

Al construir un diodo semiconductor se utilizan los semiconductores tipo  $p$  y tipo  $n$ , en su plano de separación entre ambos semiconductores (unión  $p-n$ ) existe un elevado gradiente de ambos tipos de portadores que provoca que estos tiendan a abandonar por difusión la región en donde son abundantes para ir a la región donde son minoritarios: los electrones hacia la zona  $p$  y los huecos hacia la zona  $n$ .

Cuando esto ocurre dejan en la zona próxima a la unión las cargas fijas, positivas en la zona  $n$  y negativas en la zona  $p$ , sin la neutralización que le daban las cargas móviles, electrones y huecos respectivamente, todo ello provoca un campo eléctrico a ambos lados de la unión  $p-n$ , que se dirige de la zona  $n$  a la  $p$  y tiende a compensar el efecto anterior para mantener el sistema en equilibrio (carga neta nula).

En el momento en el que incide una radiación luminosa en un semiconductor con energía suficiente como para romper los enlaces de los electrones de valencia y generar pares electrón-hueco, la existencia de una unión  $p-n$  separa estos pares y envía a los portadores minoritarios hacia la región donde son mayoritarios, esto debido a su alto campo eléctrico. Un aporte de cargas de este modo haciendo circular ambas regiones (electrones yendo a la zona  $n$  y los huecos yendo a la zona  $p$ ) es, en resumen, una corriente eléctrica que atraviesa la unión  $p-n$  desde la zona  $n$  a la  $p$ , y esta puede ser entregada a un circuito exterior, saliendo por la región  $p$  y entrando por la región  $n$ .

Entonces, para aprovechar estos materiales utilizamos celdas solares fotovoltaicas constituidas por un disco monocristalino de silicio, dopado en su superficie superior (lado expuesto al sol) hasta hacerla de tipo  $n$  en un espesor de  $0.6 \mu\text{m}$ , mientras que en la parte inferior se deja del tipo  $p$  con un espesor de incluso hasta  $0.4 \mu\text{m}$ , así produciendo una unión  $p-n$  paralela a la superficie iluminada de la celda.

---

Para poder unir las celdas solares, se deben depositar dos capas metálicas sobre ambas caras de la célula, pero del lado superior se deben colocar en forma de rejilla, esto se hace debido a que de lo contrario no sería posible que la luz entrase en el semiconductor, entonces la corriente fotovoltaica generada sale por el contacto  $p$ , atraviesa una carga externa y vuelve a entrar por  $n$ .

Cuando las condiciones de radiación solar son de  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ , una célula solar que se encuentre en condiciones óptimas de trabajo puede proporcionar una potencia de  $14 \text{ mW}/\text{cm}^2$  ( $28 \text{ mA}/\text{cm}^2$  a una tensión de  $0.5 \text{ V}$ ), lo que supone un rendimiento del 14%, Si la iluminación varía, entonces la corriente de la celda variará de forma proporcional, mientras que la tensión se mantiene casi de manera invariable, sin embargo, los niveles de tensión son inutilizables para la mayor parte de las aplicaciones, pero si se quiere incrementar el nivel de tensión basta con conectar cierto número de celdas en serie, si conectamos 36 de ellas de un tamaño de  $7.6 \text{ cm}$  de diámetro podemos obtener hasta  $18 \text{ V}$ , lo que es suficiente para hacer funcionar equipos de  $12 \text{ V}$ , aun teniendo iluminaciones menores a  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ , estas 36 celdas interconectadas y montadas entre dos láminas de vidrio que las protegen de la intemperie constituyen lo que conocemos como un panel fotovoltaico.

Hay que tener en cuenta que la corriente suministrada por un panel fotovoltaico es corriente continua lo que es válido para una serie de aplicaciones, en particular para aplicaciones de baja potencia, el panel se conecta a un acumulador electroquímico (batería) para poder disponer de energía eléctrica almacenada, entonces se debe colocar entre el panel y el acumulador un diodo en serie (diodo de bloqueo) de tal forma que permita la salida de corriente del panel pero impida que el acumulador se descargue a través del panel por ausencia de luz, a su vez cuando el acumulador va alcanzando su máxima carga la corriente que empieza a admitir es menor por lo que aumenta la tensión de salida en el panel y como la tensión del acumulador no debe superar su valor máximo de carga se debe introducir un regulador de tensión que limite la tensión máxima del panel para evitar dañar la batería.[11]

### **Parámetros de funcionamiento de una celda solar**

Los parámetros eléctricos de funcionamiento de una celda solar se detallan a continuación:

Voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ , por sus siglas en inglés voltaje open circuit). Es la tensión para que los procesos de recombinación igualan a los de generación y, por lo tanto, la corriente que se extrae de la celda es nula; constituye la máxima tensión que se puede extraer de una celda solar.

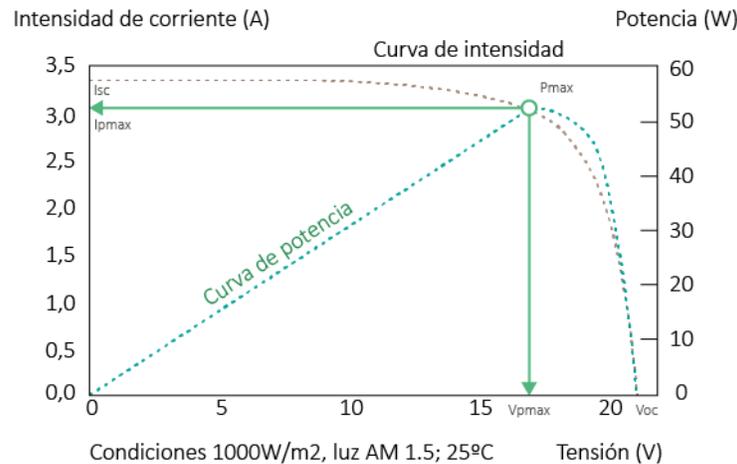
Corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ , por sus siglas en inglés current short circuit). Es la corriente que se obtiene de la celda cuando el voltaje es de cero voltios; es la máxima corriente que se puede obtener de la celda. En la figura 1 se ilustra la corriente a corto circuito.

Potencia máxima ( $P_{max}$ ), es el producto de la corriente por el voltaje ambos en el punto máximo y su relación son

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1)$$

donde  $I_{max}$  es la corriente y  $V_{max}$  es el voltaje ambos en el punto máximo de potencia.

El factor de forma (FF) es un parámetro clave a la hora en que se evalúa el rendimiento de los paneles solares, es el cociente entre la potencia real de los paneles solares entre su salida de potencia en corto circuito, el FF se define como la relación entre el máximo punto de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto y la corriente en cortocircuito, la ecuación (2) expresa la relación. Un panel solar común usualmente tiene un valor de factor de forma mayor a 0.70, un panel con un factor de forma que oscile entre 0.4 a 0.65 es considerado ineficiente y por lo tanto debe ser rechazado.[12]



**Figura 1. Imagen ilustrativa de la curva característica**

Ecuación del factor de forma: 
$$FF = \frac{(I_{max})(V_{max})}{(I_{SC})(V_{oc})} \quad (2)$$

La eficiencia de una celda solar se define como el porcentaje de potencia convertida dividido sobre la potencia incidente, la ecuación (3) relaciona la potencia convertida como una función de la potencia máxima, calculando así la eficiencia de la celda solar.

Eficiencia de una celda solar: 
$$\eta = 100 \times \frac{P_{max}}{P_{int} \times A} \quad (3)$$

Donde  $P_{max}$  = potencia máxima de la celda solar,  $P_{int}$  = potencia incidente de luz por unidad de área que se recibe del sol en forma de fotones (en condiciones estándar 1000 mW / cm<sup>2</sup>) y A = área efectiva de la celda solar en condiciones estándar (STC, por sus siglas en inglés Standar Test Condition) y área efectiva de la celda solar.

La STC especifica una temperatura de 25 °C y una irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> con una masa de aire espectral de 1.5 atmósfera de espesor (AM 1.5) ya que comúnmente los paneles solares son diseñados para funcionar bajo la presión de más de una atmósfera debido a que cuando el sol se encuentra en ángulo con la superficie de la Tierra, un espesor mayor será más efectivo, este valor corresponde a un ángulo cenital solar de 48.2 ° sobre la horizontal. Esta condición representa aproximadamente la posición del sol de mediodía en los equinoccios de primavera y otoño con una superficie orientada directamente al sol.[13] De esta manera, bajo estas condiciones una célula solar típica de 1 cm<sup>2</sup>, y de una eficiencia del 27% aproximadamente, se espera que pueda llegar a producir una potencia de 2.5 volts.

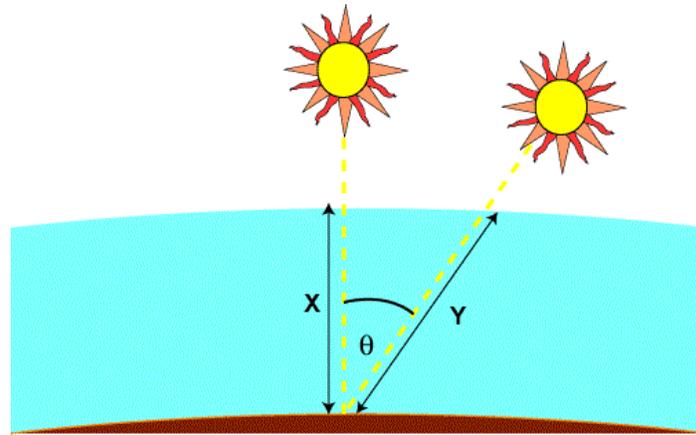


Figura 2.- Ilustración del cálculo del espesor de la masa de aire

La eficiencia se puede expresar en términos de la corriente en corto circuito y voltaje a circuito abierto como sigue:

$$\eta = 100 \times \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{int} \times A} \quad (4)$$

## II.2. Aplicaciones.

Los sectores de aplicación de la energía solar fotovoltaica son diversos y distintos, entre ellos se puede citar:

- Aplicaciones remotas.
- Usos rurales.
- Autogeneración.
- Grandes centrales.
- Señalización y comunicaciones.
- Cargar dispositivos para uso remoto.

---

En el desarrollo de grandes instalaciones de sistemas fotovoltaicos a gran escala se encuentran varias limitantes que se deben a diversas cuestiones aun que se pueden destacar tres como más importantes:

- El costo y la disponibilidad del terreno.
- La disminución de la eficiencia a altas temperaturas de operación de la celda fotovoltaica.
- El impacto ambiental sobre la biodiversidad

Por estos factores ha surgido la motivación de embarcarse a considerar otras alternativas a las instalaciones convencionales, como podrían ser sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios, así como también sistemas fotovoltaicos flotantes para su aplicación en tierra o en alta mar.

Teniendo en cuenta los problemas anteriormente mencionados, los sistemas fotovoltaicos flotantes parecen ser una muy buena opción, pero a diferencia de los sistemas convencionales que llevan mucho tiempo en experimentación y uso, los flotantes apenas van comenzando su recorrido aun así presentando grandes beneficios que pueden ser aprovechados.

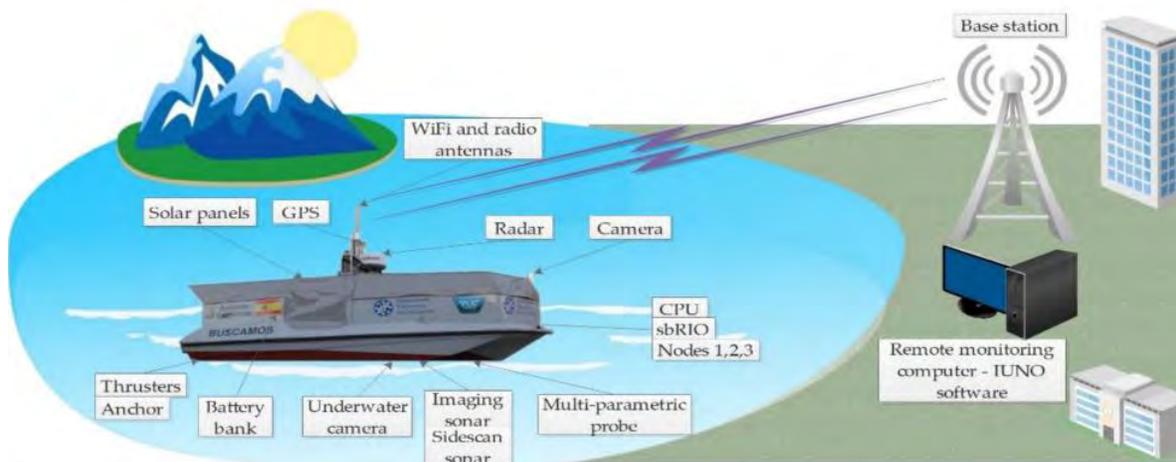
### II.3. Sistemas de monitoreo

Los sistemas de monitoreo de vida acuática o especies acuáticas que se energizan mediante sistemas fotovoltaicos han sido pocos los reportados en la literatura. En particular, se ha reportado el uso de un sistema fotovoltaico dentro de sistemas de acuaponía para el monitoreo de sus condiciones biológicas, para evitar las causas de un brote de microorganismos patógenos en el cultivo de peces, cultivos de vegetales y que por consecuencia afecten la salud humana. Donde los autores destacan como resultados importantes la optimización de un nuevo método de detección rápida y de alta precisión en la detección de microorganismos patógenos, así como la disminución del consumo eléctrico en su sistema [14].

Un artículo habla sobre un observatorio robótico marino autónomo alimentado por energía solar, este es utilizado para el monitoreo de grandes áreas que sean poco profundas, una parte de este sistema consta de una embarcación monocasco que fue construida de polyester además de que fue reforzada con fibra de vidrio, tiene un tamaño de 5.10 m de largo y 1.97 m de ancho, esta embarcación se traslada gracias a dos hélices independientes que van ancladas al espejo de popa, cada hélice es energizada por dos baterías de ion de litio de 28 V y van conectadas en serie, estas hélices son controladas por un timón que cambia la dirección de empuje gracias a un motor lineal.[15]

Para la parte de electrónica emplearon los siguientes dispositivos, un radar 3G de banda ancha SIMRAD, una cámara modelo PTZ AXIS P5534-E y otra modelo AXIS P1435-LE, un sonar

de barrido lateral modelo Tritech SeaKing, un sonar de imágenes modelo Tritech Micron Sonar y una sonda multiparamétrica modelo YSI 6600 V2, el sonar de barrido lateral se encarga de generar las imágenes del lecho marino, la sonda multiparamétrica la utilizan para medir la salinidad, la temperatura, el oxígeno disuelto, la concentración de clorofila y los nitratos, mientras que el radar 3G y el sonar de imágenes son empleados para evitar los obstáculos que hayan bajo el agua.



**Figura 3.- Concepto del observatorio marino**

En la parte energética utilizan un sistema fotovoltaico y un conjunto de baterías para garantizar el uso del sistema a largo plazo, el sistema fotovoltaico consta de 8 paneles fotovoltaicos flexibles de 130 Wp cada uno, cubren un área total de 4000 x 1355 mm como puede observarse en la figura 4, su potencia total instalada es de 1040 Wp, por otro lado, el conjunto de baterías consta de 4, son de 26 V y de 104 Amperios/unidad y se distribuyen en 2 bancos de 2 baterías cada uno logrando una autonomía de seis horas.[15]



Figura 4.- Distribución de los paneles solares.

De forma semejante, otro artículo[16] ¿Cuál? propone un robot acuático cuyo propósito es compilar y analizar imágenes para el monitoreo de los arrecifes y así realizar un mapeo de la zona que seleccionen, este robot consta de cinco sistemas principales que son, el sistema de alimentación que se encargara de mantener funcionando al robot durante un tiempo determinado, está el sistema de monitoreo que será el encargado de la iluminación y visualización de lo que será el campo de estudio, el sistema mecánico de movimiento el cual permitirá que se desplace el robot dentro del agua, y el sistema de control que permitirá al robot hacer los movimiento necesarios para trasladarse de un punto a otro.

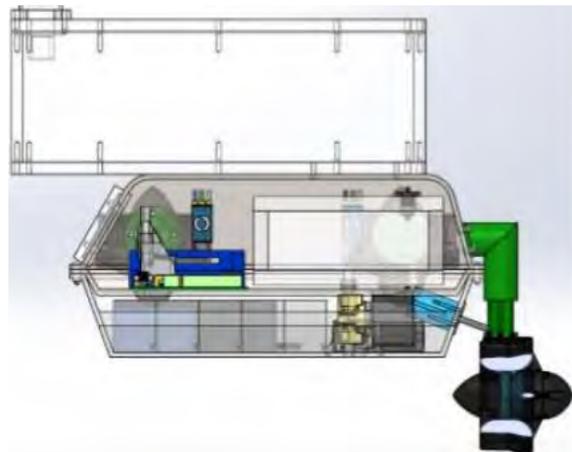
Para el robot acuático se emplearon tres materiales principales, el acero inoxidable el cual proporciona una gran resistencia a la corrosión, en específico aceros inoxidables austeníticos ya este tipo de acero es el que presenta la mayor resistencia a la corrosión, el siguiente material que utilizan es el acrílico para permitir la visión de la cámara con el exterior y también es donde ira la iluminación, este material protegerá los componentes del agua, el ultimo material es el neopreno, este destaca por lo bien que se adapta a distintas necesidades en diversos ambientes, además presenta características ideales para mantener al robot hermético.

Para la parte electrónica se utilizaron los siguientes componentes, para el movimiento del robot un motor comercial modelo T100 que permite al robot bajar 10 m sin problema, para la propulsión se utilizó un motor modelo M100 el cual es un motor eléctrico sin escobillas lo que le permite ser utilizado bajo el agua, un controlador electrónico de velocidad el cual es un circuito cuya función es variar la velocidad de un motor eléctrico, para poder sumergir al robot utilizan el principio del submarino por lo que tienen un compartimiento que se llena de agua, emplean una bomba modelo AD20P-1230C para evacuar el agua interna y hacer emerger al robot, por otra parte también utilizan un sensor MPU6050 que contiene un sensor de temperatura, un giroscopio y un acelerómetro, ambos de tres ejes, para controlar la bomba encargada de la extracción del agua, utilizan una electroválvula de accionamiento directo,

finalmente en la parte energética utilizaron una batería LiPo modelo Hyperion G5 50C 4S de 4000 mAh y para la Raspberry utilizaron una batería de 1300 mAh modelo G5 50Cmax 2S de 4.2V.[16]



**Figura 5.- Vista frontal con corte central donde se aprecian la mayoría de los componentes**



**Figura 6.- vista lateral del robot**

De igual forma un proyecto propone la construcción de un robot submarino que pueda ser operado de forma remota, tiene como fin el realizar exploración acuática en algunas fuentes hídricas mediante posicionamiento global y así graficar un plano cartográfico, mientras a su vez almacena un video que permita ver las especies que se alojan en esos sitios y las condiciones en que viven.

Para el chasis del robot utilizan PVC de 20 mm de diámetro, ya que es un material ligero y resistente, la forma final se aprecia en la siguiente imagen.



**Figura 7.- Forma final de la estructura.**

Al tener la estructura lista, ensamblaron los motores en sus respectivos lugares. Por otra parte para la etapa de control emplearon los siguientes componentes: para la corriente del vehículo, emplearon un controlador Sabertooth que suministra hasta 12A de forma continua y maneja un voltaje de 12 hasta 24Vdc, también utilizan un MOSFET modelo IRF520 que se encarga del control en la velocidad de inmersión para poder mantenerlo estable, asimismo utilizan algunos sensores más como un módulo GPS modelo Ublox NEO-6M, un sensor de temperatura y un sensor de flujo de agua modelo YF-S201.

Para la parte de adquisición de imágenes, utilizaron un cámara Wi-Fi ultra HD, con una memoria SD de 8GB, sin embargo, la resolución de su conexión wifi se ve limitada a un 1m de profundidad, además utilizan dos baterías recargables de 12V con 7.5A. [17]



**Figura 8.- Estructura final con la cámara montada.**

# CAPÍTULO III.

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

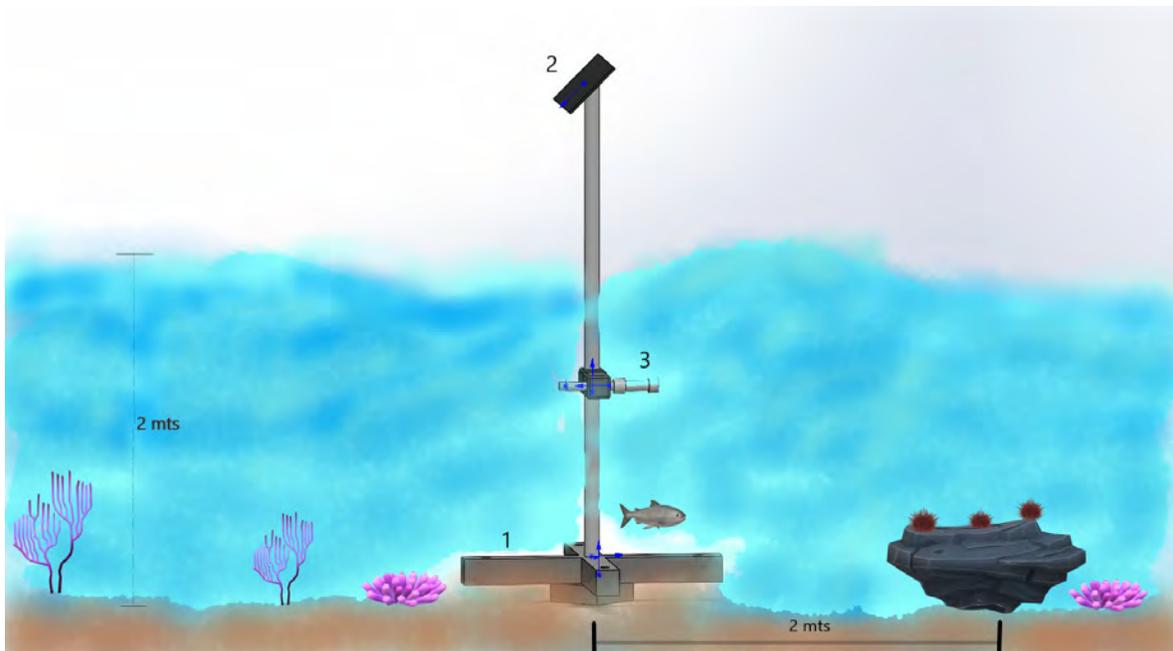
En este capítulo se aborda la metodología aplicada para el desarrollo de este proyecto, la cual se describe a continuación:

Identificar un sistema de fijación del sistema de monitoreo de acuerdo con las características de aguas someras.

Identificar la disponibilidad y desempeño de los diversos componentes que componen al sistema de monitoreo, realizando el análisis del consumo energético de los componentes seleccionados de la fuente de energía.

Analizar y evaluar los componentes del bloque adquisidor de imágenes del sistema de monitoreo: diodos emisores de luz (LEDs, por sus siglas en inglés), banco de baterías y toma de imágenes.

En la Figura 9 se esquematiza el SIMOER, se basa en: 1) base de fijación tipo anclaje del sistema, la cual debe resistir el oleaje y ser sumergible al menos 2 metros. 2) sistema de energía renovable: celda solar flexible y 3) componentes electrónicos banco de baterías, cámara nocturna y LEDS esto es debido a que se ha reportado gran actividad nocturna por parte de los erizos de mar.



**Figura 9. Diagrama esquemático del sistema de monitoreo de erizos de mar, donde se considera una profundidad de 2 metros y distancia focal de 2 metros.**

### III.1. Base de sistema de monitoreo

Para la base se tuvieron que considerar varios factores, como el oleaje que podría causar movimiento en la cámara y provocar que se capturen imágenes borrosas, por lo que la base

debería ser rígida para soportar cualquier tipo de vibración provocado por el oleaje, el agua salada sería otro factor al que se expondría, entonces de emplear cualquier tipo de metal se debería tener mucho cuidado ya que se terminaría oxidando, para evitar estos inconvenientes el material que se decidió utilizar para que tuviera peso y pueda quedar fijo al hundirse fue el cemento y tubos de PVC. Así mismo, se contemplaron ambos factores para seleccionar la forma que tendría la base, dicha forma es en cruz ya que cada extremo nos aporta estabilidad y disminuye las posibilidades de algún volcado provocado por las fuerzas de las olas, de igual manera se contempló una perforación en cada extremo para tener la posibilidad de clavar estacas para mayor fijación en caso de necesitarlo.

La Figura 10 muestra la secuencia fotográfica de la construcción de la base del sistema de monitoreo. Para la realización de la base, lo primero en hacerse fue construir el molde con la forma deseada en el que se vertería la mezcla de cemento, la forma consto de una cruz, con cada lado de un largo de 50 cm, un ancho de 10 cm y una altura de 10 cm, teniendo ya el molde deseado, se prosiguió a fijarlo en una base plana de madera para evitar que se quede fijo en el piso una vez se vierta la mezcla, ver Figura 10 (a).

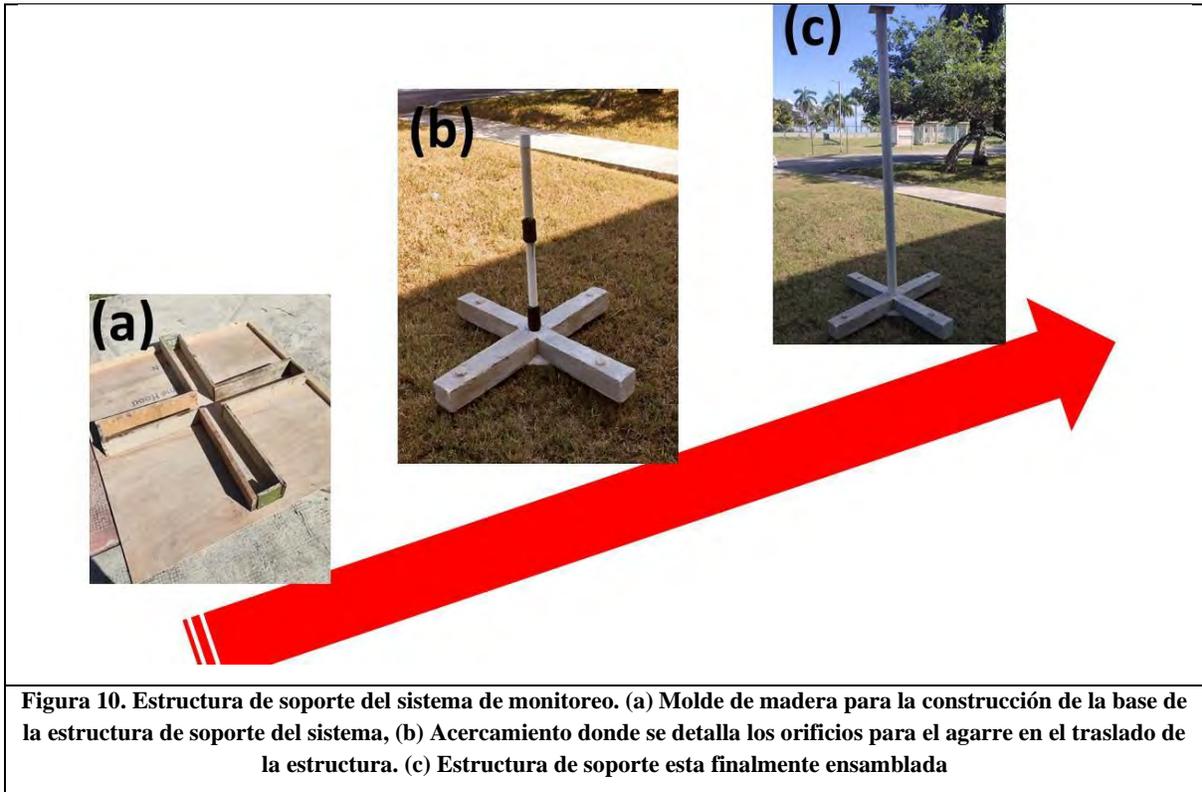
Luego con un tubo de PVC de 1.5 pulgadas de diámetro se recortó una pieza de 1.5 m de largo que iría en el centro y funcionaría como conector con la segunda parte de la estructura y 4 piezas de 10 cm de largo que irían en cada extremo de la cruz y funcionarían como el espacio hueco en el que se podría utilizar estacas para mayor fijación con el fondo, todas las piezas fueron fijadas en la base plana de madera con silicón en su respectiva posición.

A continuación, se procedió a cortar 4 piezas de varilla de 1.10 m de largo y se colocaron de a dos en paralelo en el centro de cada lado del molde de cruz de tal manera que librarán los tubos de PVC.

Lo siguiente que se llevó a cabo fue la preparación de la mezcla de cemento, las proporciones que se utilizaron fueron 3:1, por cada parte de cemento se utilizaron 3 de piedra y grava, una vez realizado, de forma inmediata se vertió en el molde de cruz hasta llegar al límite del mismo y se esperó el tiempo recomendado antes de poder desmoldarlo para estar seguros de su correcto secado previo y así poder evitar la aparición de cualquier grieta que pueda permitir que se filtre agua y oxide las varillas utilizadas.

Para que el tubo de PVC del centro, donde se uniría a la segunda parte de la base no estuviera unido a la cruz solo por contacto, se le introdujo 4 varillas cuyos extremos fueron doblados para un mayor agarre y posteriormente se prosiguió con rellenar el interior del tubo con mezcla de cemento para cubrir las varillas, protegerlas del agua, reducir las vibraciones que puedan provocar los impactos de las olas y crear mayor peso en la estructura, al final considerando que la estructura estaría compuesta por dos partes se le agregó dos rollos de hule para crear fricción con la segunda parte de la estructura y esta pueda encajar de forma justa sin movimientos indeseados, el resultado final se muestra en la Figura 10 (b).

La segunda parte de la estructura, la que sostendría el panel solar y la carcasa de la cámara consto de un tubo de PVC hidráulico de 2.5 pulgadas de diámetro y 2 m de largo, este se rellenó de cemento casi en su totalidad dejando solo el espacio necesario para introducirlo en la primera parte de la estructura de la base, esto con el propósito de no dejar espacios vacíos y su fijación sea justa y no vibre una vez quede ensamblado. Como se puede observar en la Figura 10 (c).



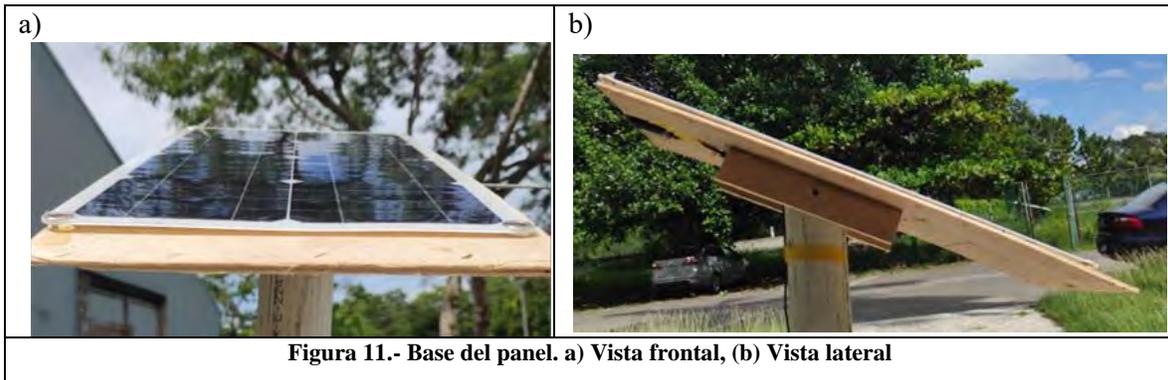
**Figura 10. Estructura de soporte del sistema de monitoreo. (a) Molde de madera para la construcción de la base de la estructura de soporte del sistema, (b) Acercamiento donde se detalla los orificios para el agarre en el traslado de la estructura. (c) Estructura de soporte esta finalmente ensamblada**

### III.2. Panel fotovoltaico

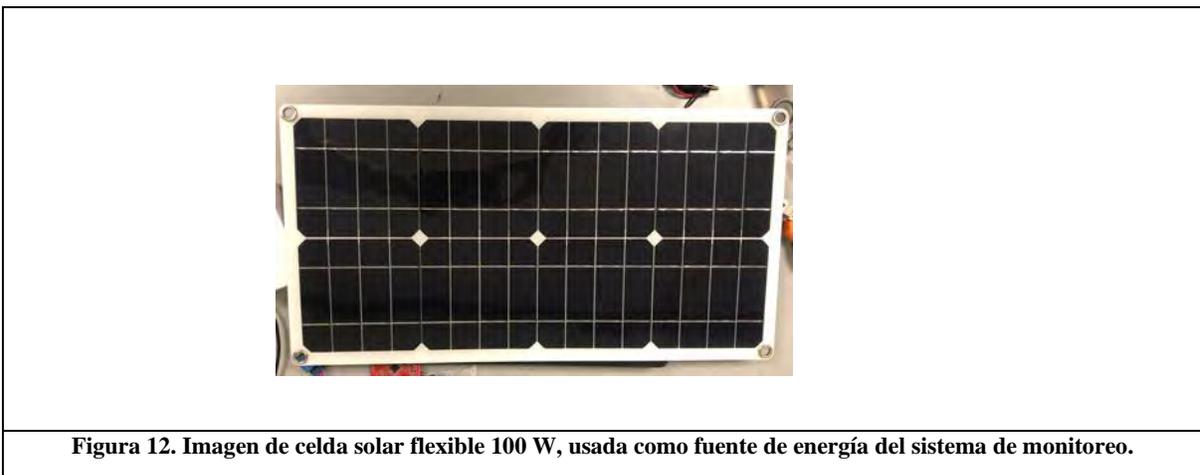
Por las condiciones acuáticas en las que el sistema deberá trabajar, la mejor elección fue un panel fotovoltaico flexible de película delgada, ver figura 12, esto debido a que en el mercado estos se encuentran mejor protegidos ante la humedad y el agua, soportando más que solo algunas salpicaduras, además de que nos proporciona la potencia necesaria para poder cargar el sistema y este pueda operar de forma autónoma, otra ventaja es su tamaño reducido que provocara menos resistencia ante el viento reduciendo así la posibilidad de que este salga volando en caso de condiciones de vientos fuertes.

El panel se fijará en la parte superior de la base, como se puede observar en la figura 11 aprovechando los orificios que tiene en las esquinas, se coloca apuntando hacia el sur y se conectará a un convertidor DC/DC para poder cargar las pilas con una tensión constante de

5V y evitar variaciones que puedan presentarse por sombras momentáneas provocadas por nubes, además de proteger las pilas ya que minimiza la variación de voltaje.



Una de las pruebas que se realizó fue la de descargar por completo ambos bancos de pilas, posteriormente fueron conectadas a las 7 am al panel fotovoltaico para comprobar el tiempo necesario para que los bancos de pilas puedan estar completamente cargados, como resultado se obtuvo que el tiempo necesario para cargarlas es de al menos 12 h cumpliendo satisfactoriamente nuestras necesidades del proyecto.



### III.3. Microcontroladores (Raspberry)

Este microcontrolador empezó con el objetivo de animar a las personas a que aprendan sobre informática, todo de manera didáctica y de costo inferior al que tendría un equipo de cómputo, ya que lo sustituye en versión miniatura, convirtiéndose con el paso del tiempo en quien empezó la revolución a nivel microprocesador, ya que abrió las puertas a una amplia variedad de experimentación y aprendizaje, como lo serían proyectos de electrónica y algunas actividades básicas de cualquier equipo de computación, como lo es navegar por internet,

reproducir y capturar videos con complementos que se le pueden añadir a la Raspberry, utiliza lenguaje de alto nivel como Python, C++ y Java, permitiendo a las nuevas generaciones interactuar con sus computadoras de formas muy versátiles. [18]

La Raspberry pi utiliza un microprocesador con arquitectura ARM con varias frecuencias de funcionamiento, pudiendo incluso tener la posibilidad de subirla hasta 1 GHz, tiene memoria RAM que va desde los 256 MB hasta 1 GB y una tarjeta gráfica o GPU (Graphics Processing Unite) en un solo chip, más conocido como sistema SoC (System on a Chip), su SoC es del tipo Broadcom BCM2835, en lugar de disco duro para su almacenamiento cuenta con espacio para introducir una tarjeta SD y su fuente de alimentación debe ser externa. [19]

Existen dos familias de Raspberry pi, la versión normal que abarca desde Raspberry Pi 1 hasta Raspberry Pi 4 y el modelo un poco más reducido de tamaño y de menor costo, la Raspberry Zero (ver Figura 13), el cual fue elegido para el desarrollo de este proyecto. La Raspberry Zero cuenta con un Soc Broadcom BCM2835 junto a un procesador ARM1176JZF-S a 1 GHz y 512 MB de RAM, la placa además posee dos puertos micro USB sirviendo para energizarlo y el otro para datos, como salida de video y audio utiliza un puerto mini-HDMI, cuenta también con una ranura de tarjeta microSD y un GPIO de 40 pines. [20]

Los motivos para decidir utilizar esta Raspberry de entre la selección disponible de la familia Raspberry se debe en primer lugar a su reducido costo, esto hace más accesible la posibilidad de hacer más de un dispositivo a futuro y ampliar así el alcance de la visión disponible, otra ventaja frente a los otros modelos es su corto tamaño, al ser considerablemente más pequeña y discreta que la Raspberry estándar permite una mayor maniobrabilidad y se acopla bien en la carcasa previamente planeada, además su consumo de energía es menor, lo que nos garantiza utilizar menos cantidad de baterías para el tiempo de trabajo planeado.



Figura 13. Raspberry Pi Zero W

### Cámara de visión nocturna

Estas cámaras cuentan con función diurna y nocturna diseñadas para espacios abiertos y de poca iluminación, durante el día esta tiene imágenes a color y cuando empieza a detectar baja luminosidad activara de forma automática su modo nocturno, aplicando un filtro que capta mejor la luz infrarroja IR brindando unas imágenes de buena calidad en blanco y negro. [21]

Para el desarrollo de este proyecto se seleccionó una cámara Raspberry Pi de visión nocturna OV5647 con una resolución de 1080p y enfoque ajustable, en la Figura 14 se observa un dibujo de la cámara utilizada, cuyas características principales son:

- Longitud focal ajustable de 3.6mm.
- Voltaje de operación de 3.3V.
- Resolución de 5 Megapíxeles.
- Resolución de fotos de 2592 x 1944.
- Resolución video de 1080p 30 FPS, 720p 60 FPS, 640 x 480p 6090.
- Tamaño de la cámara 25mm x 34mm
- Peso 3g.
- Filtro infrarrojo (longitud de onda de 950 nm).

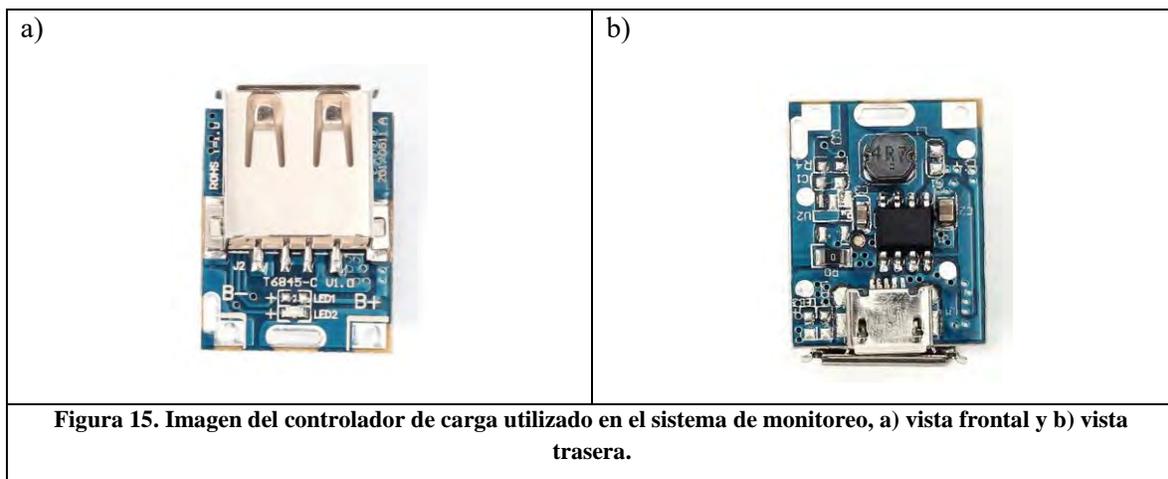


Figura 14. Cámara Raspberry Pi

### Controlador de carga

El controlador de carga permite aprovechar al máximo la energía que el panel estará suministrando mientras garantiza la protección de las baterías. El objetivo primordial del controlador es permitir el proceso ideal para cargar las baterías de forma completa y así evitar daños causados por una sobrecarga o sobredescarga y alargar la vida útil de las pilas. Algunos controladores cuentan inclusive con un sistema de monitorización que se encarga de registrar y almacenar la operación del sistema para su previo análisis . [22]

Para este proyecto se seleccionó el controlador de carga modelo 134N3P (ver Figura 15), por su tamaño de solo 25 mm x 20 mm encaja muy bien dentro del sistema sin ocupar demasiado espacio. El voltaje de carga con el que opera tiene un rango que va desde 3.7 V hasta los 5.5 V, lo cual viene bien para el banco de pilas al que estará conectado, permite una corriente de salida máxima de 1 A. Otra característica es el voltaje de carga que es de 4.2 V preestablecidos y una corriente de carga de 1 A, asimismo cuenta con control inteligente de temperatura y protección contra el sobrecalentamiento, lo que será muy útil ya que estará operando en un sistema cerrado. La temperatura de operación es hasta 60 °C, cuenta con protección contra los picos altos de tensión, protección contra cortocircuitos y protección contra sobrecargas, en caso de ocurrir cualquiera de los problemas anteriormente mencionados la Raspberry y la cámara estarán protegidos.



### Convertidor DC/DC

El convertidor DC/DC es un dispositivo electrónico que tiene la capacidad de cambiar la tensión que recibe de entrada por un voltaje mayor o menor a la salida, esto maximiza la relación asociada de potencia lo que define la eficiencia del conversor. El convertidor se clasifica en dos tipos, como Buck (reductor) cuando el dispositivo reduce el voltaje a su salida y como Boost (elevador) en el caso contrario, también existen los convertidores Buck-Boost (reductor-elevador) que es cuando el dispositivo tiene la capacidad de mantener una tensión de salida cuando el voltaje recibido es superior o inferior al voltaje que se espera. [23]

La manera en que el dispositivo ajusta el voltaje de salida es aprovechando una red de resistencias, lo cual conforma un lazo de retroalimentación proporcionado por el circuito

integrado para regular la tensión de salida, esto se logra mediante un potenciómetro de precisión manual. [23]

El tipo de panel solar que se utilizará para el proyecto, en sus especificaciones menciona que la máxima potencia que podría alcanzar es de 20V por lo que se optó por utilizar el convertidor Buck, seguido de la conversión AC/DC para mantener un voltaje aceptable para alimentar las baterías y protegerlas. El tipo de convertidor usado es el LM2596 DC/DC (ver Figura 16), puede conducir una carga de 3 A con una excelente línea y regulación de carga, funciona a una frecuencia de 150 kHz, igual incluye una tolerancia de  $\pm 4\%$  en la tensión de salida, el voltaje de operación de entrada va de un rango de 3V hasta los 40V y un voltaje de salida desde 1.25V hasta los 35V, su tamaño es de 4.3cm x 2cm x 1.3cm.

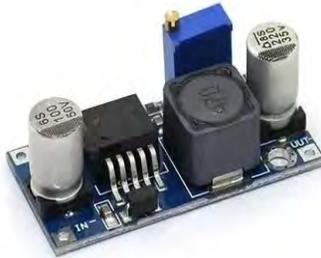


Figura 16. Convertidor LM2596 DC/DC.

#### III.4. Baterías

La autonomía energética en los equipos electrónicos se obtiene al utilizar baterías para su operación, se les conoce como de tipo primario a las que son desechables y por lo contrario a las que si tienen la capacidad de ser recargables se les conoce como de tipo secundario.

Una batería puede transformar la energía electroquímica que va almacenando en energía eléctrica, esto es posible gracias a la oxidación-reducción que ocurre en su interior, las baterías de tipo secundario pueden realizar esta reacción de forma reversible, en el caso de las pilas recargables las tecnologías más utilizadas son el Níquel-Cadmio (Ni-Cd), Níquel Metal-Hidruro (Ni-MH) y Iones de Litio (Li-Ion). Para este proyecto se eligieron las de tipo Li-Ion ya que, de las tres tecnologías, esta última es la que presenta la mayor densidad tanto volumétrica como gravimétrica, hoy en día este tipo de pilas se encuentran en dispositivos celulares, automóviles híbridos y cámaras fotográficas entre otros.

La capacidad energética de una batería se expresa en ampere-hora, lo que significa la cantidad de corriente que ésta nos puede suministrar durante una hora antes de que caiga por debajo de su umbral de operación útil, pero para el caso de los dispositivos electrónicos portátiles, la capacidad de las baterías se expresa comúnmente en miliampere-hora (mAh).

El fabricante proporciona una capacidad que se conoce como la capacidad nominal la cual está determinada en condiciones específicas de temperatura, corriente de operación y el voltaje final de operación, ahora la capacidad medida es la que los usuarios determinan a través de alguna prueba estándar, y la capacidad practica es aquella disponible cuando se considera una carga máxima proporcionada por el sistema cargador y el voltaje mínimo de operación que se establece por el sistema que va a utilizar las baterías, también podemos conocer el estado de salud de la batería, esta se obtiene del resultado del cociente entre la capacidad medida y la capacidad nominal, ecuación 5.

$$SOH = \frac{C_m}{C_n} \quad (5)$$

Se considera que la batería se encuentra en el estado final de su vida cuando el valor que se obtiene de la ecuación de su estado de salud es igual a 0.8.

Dentro de las pilas recargables de tecnología Li-Ion una de fácil adquisición es la del modelo 18650 (Figura 17), esta es de tipo cilíndrico y puede dar un voltaje nominal de 3.7 V lo cual la hace la indicada para su uso en circuitos electrónicos que operen con 3.3 V. Estas pilas en su mayoría no son de algún fabricante reconocido por lo que hay que realizar pruebas y mediciones previas para estar seguros de su correcta funcionalidad y de que la capacidad indicada corresponda con la obtenida. [24]



Figura 17. Imagen de baterías de Li-Ion

## III.5. Cálculo del número de baterías

Estimación del consumo que debe cubrir la instalación fotovoltaica

Con el fin de dimensionar una instalación fotovoltaica aislada, es necesario conocer el consumo que debe cubrir el módulo fotovoltaico, por lo que se debe calcular la potencia total de la instalación considerando la potencia de cada dispositivo que consume energía, es decir, la potencia unitaria de cada carga que será conectada a la instalación, así como las horas estimadas de funcionamiento diario. En la tabla 1 se enlistan los dispositivos electrónicos del SIMOER que se conectan al módulo fotovoltaico flexible, debido a que se pretende monitorear a los erizos por la noche las horas de uso para todo el dispositivo es de 12 horas, sin embargo, los leds encenderán 3 s cada minuto, considerando que la región de la península de Yucatán se reporta 4.8 Horas de Sol Pico [HPS] de radiación solar.

El consumo energético se calcula como sigue:

$$E_{consumida} = P [W] \times \text{Número de horas de uso diario [h]} \quad (6)$$

donde P = potencia [W],  $E_{consumida}$  = Energía consumida [Wh].

Tabla 1. Lista de carga eléctrica que constituyen el sistema de monitoreo de erizos.

Carga (Elemento electrónico)	Cantidad	Potencia [W]	Hora de uso	Energía consumida [Wh]
Led IR <sup>1</sup>	2	3	0.6	1.2
Cámara <sup>2</sup>	1	1	12	12
Raspberry Pi <sup>3-5</sup>	1	0.75	12	9
Módulo regulador de voltaje <sup>6</sup>	1	0.15	12	1.8
Módulo de carga de	1	0.15	12	1.8

banco de baterías <sup>7</sup>				
Diodo de protección	2			
Total	6			25.8

El banco de baterías debe suministrar 25.8 W al día, así, para dimensionar el número de baterías consideramos que los 25.8 W sean máximo el 40 % del banco de baterías, por lo que debe tener una capacidad de 86 W, la ecuación (7) calcula la capacidad total del banco de baterías conectadas en serie-paralelo.

$$P_{total} = [I_{bat} \times \# \text{ baterías en paralelo}] \times [V_{bat} \times \# \text{ baterías en serie}] \quad (7)$$

donde  $I_{bat}$  = corriente de la batería,  $V_{bat}$  = voltaje de la batería, como se estará energizando a dispositivos electrónicos de 5 V el número de baterías en serie es uno, así, el número de baterías en paralelo es:

$$\# \text{ baterías en paralelo} = \frac{P_{total}}{I_{bat} * V_{bat} * \# \text{ baterías en serie}} \quad (8)$$

donde  $P_{total} = 86$  W,  $I_{bat} = 2200$  mAh,  $V_{bat} = 4.2$  V, por lo que el número de baterías en paralelo necesarias son 9.3 baterías, por lo que se utilizan 10 baterías.

### III.6. Desarrollo de código de Raspberry

Como se observa en el diagrama de flujo (ver Figura 18), el proceso al que la cámara se verá sometida es la más practica para este proyecto, ya que se buscó el reducir al mínimo las funciones que realizaría la Raspberry Zero para así tener un uso más eficiente de la energía disponible y se ocupe un menor espacio con las baterías que irán almacenando lo que el panel solar produzca a lo largo del día.

Cuando el sistema se enciende y carga sus programas correspondientes, lo primero que realiza antes de que comience el ciclo en forma de bucle es ajustar y fijar los parámetros iniciales como: girar la imagen 180°, ajustar los parámetros de la calidad de la imagen a sus máximos valores, posteriormente se ajusta la ISO de la cámara en 800 para permitir que capte la mayor cantidad de luz posible.

Una vez cargados estos parámetros iniciales lo siguiente sería el ciclo que se repetiría en bucle, dicho ciclo comienza encendiendo la cámara ya con sus parámetros previamente

fijados, luego encendiendo los leds infrarrojos por tres segundos para después capturar la imagen y proceder a apagar los leds, finalmente guarda la captura recién hecha con la fecha y la hora en la que fue tomada, este último proceso toma un total de 5 segundos operando por cada minuto que pasa. Se decidió que los leds prendan durante tres segundos para poder darle el tiempo suficiente al sistema junto a la cámara de adaptarse a la luz que recibe y así evitar destellos indeseados en las capturas.

Estos últimos cinco pasos serán repetidos en forma de bucle cada minuto que vaya transcurriendo, esto con el objetivo de obtener un time-lapse y conseguir visualizar el movimiento del animal al que buscamos monitorear, el erizo de mar *Diadema Antillarum*. Esta especie se encuentra en condiciones en donde no hay una alta densidad de estas por lo que no compiten por el alimento y su rango de movimiento varía entre 0.5-1 m<sup>2</sup> [25].

Teniendo en cuenta el rango de movimiento estimado se decidió que un minuto entre captura sería suficiente para captarlos moverse, además se optimiza el uso de energía prendiendo el sistema lo mínimo posible, pero a la vez obteniendo los datos que necesitamos.

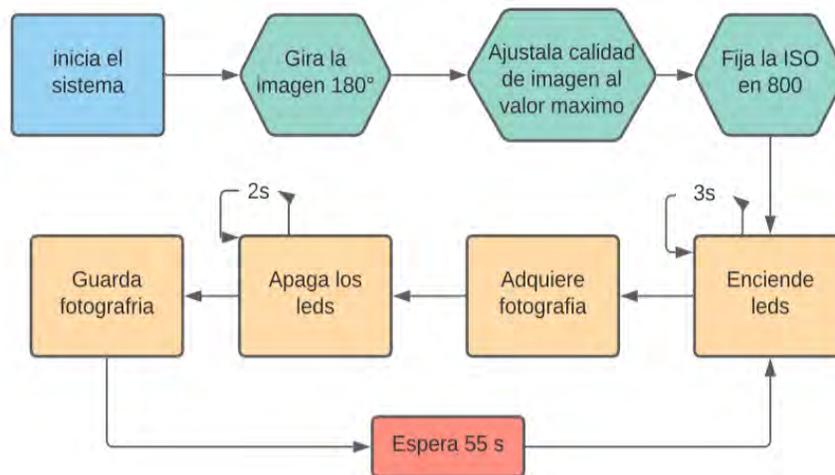


Figura 18.- Diagrama de flujo

### III.7. Diagrama electrónico a bloques de SIMOER

Como se observa a continuación en la Figura 19, el diagrama a bloques inicia con la celda solar flexible, esta va conectada a un regulador convertidor DC/DC modelo LM2596, su función es mantener una salida de voltaje fija a 5V, este regulador a su vez va conectado a los controladores de carga que son modelo 134N3P, estos protegen de sobrecargas o cortocircuitos a ambos bancos de baterías a los que van conectados, además este modelo de controlador de carga permite a su vez extraer la energía almacenada en los bancos de baterías por medio de una conexión USB, el primero de los bancos va conectado al MOSFET modelo

IRF520, este se acopla a la Raspberry para permitir la comunicación con los leds infrarrojos, de igual manera al MOSFET van conectados los leds, el otro banco se conecta a la Raspberry pi Zero W y a esta última va unida a la cámara modelo OV5697.

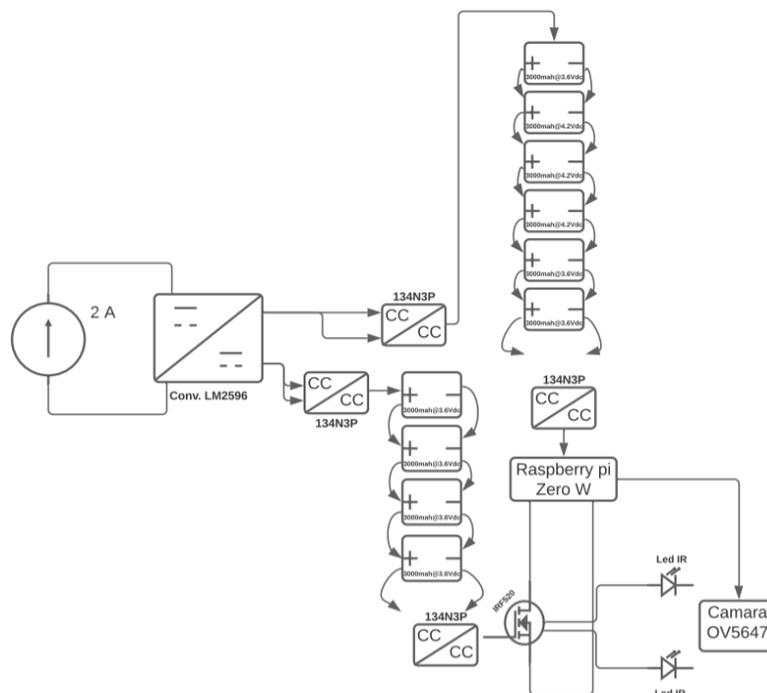


Figura 19.- Diagrama electrónico a bloques

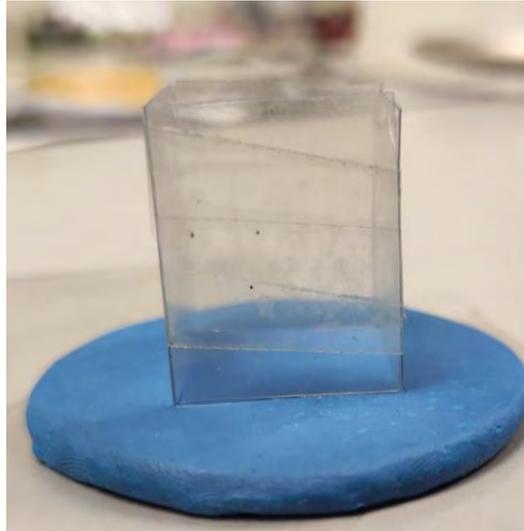
### III.8. Leds infrarrojos

Debido a la naturaleza del proyecto, el sistema debe operar durante la noche, por ese motivo es necesario utilizar iluminación que provenga de leds infrarrojos, esto con el objetivo de no interferir con la vida marina y de esta forma evitar la alteración del entorno.

Por la forma de la carcasa y para evitar la presencia de reflejos indeseados, se ubicaron los leds fuera de la carcasa, pero debido a que se encontraría sumergido se tuvo que idear la manera de protegerlos del agua y evitar cualquier corto circuito que se pudiese presentar, se

decidió que la forma más segura sería utilizando la resina epoxi y encapsulándolos de manera completa junto la conexión de sus cables que los alimentarían y comunicarían con la Raspberry, dejando expuesta únicamente la parte superior por donde iluminaría.

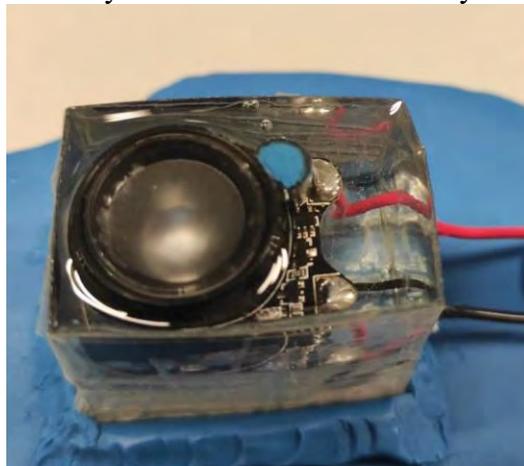
Para realizar el molde se utilizó una hoja de acetato, ya que permitirá el poder utilizar la resina epoxi sin riesgo a que esta se quede pegada en las superficies que toque y su



**Figura 20.- Molde de acrílico**

flexibilidad permite darle la forma que se desee, en este caso la forma fue la de una caja rectangular, los bordes fueron pegados con cinta adhesiva (figura 20).

Lo siguiente fue colocar el led con sus cables soldados de tal forma que no pudiera tener contacto con el agua y se realizaron dos perforaciones para permitir que los cables lo atraviesen. Una vez se tuvo todo preparado, lo próximo que se realizó fue la mezcla de resina con su activador, para evitar la aparición de burbujas que pudiesen permitir el paso del agua, se tuvo que calentar la mezcla y revolver de forma lenta y envolvente, cuando tomó la



**Figura 21.- led encapsulado en resina**

consistencia que le correspondía se vertió dentro del molde hasta dejar el led completamente sumergido a excepción de la parte superior por donde la luz será proyectada (figura21).

Se repitió el mismo proceso para proteger las conexiones que alimentaban ambos leds utilizados.

### **Dispositivo MOSFET**

Un MOSFET es de manera general un dispositivo semiconductor que se utiliza para la comunicación y la amplificación de señales, comúnmente disponen de tres terminales que son: Gate, Drain y Source, también a su vez se subdividen en dos tipos, los MOSFET de canal P y los MOSFET de canal N. [26]

Para este proyecto se optó por el módulo controlador MOSFET tipo IRF520 (Figura 22), este en específico ya viene montado en una placa que trae insertados unos sockets que facilitan la conexión de nuestras cargas y dispositivos en el módulo, este modelo también cuenta con unas resistencias que son de encapsulado SMD, estas protegen al módulo de cualquier corriente parasita que se pueda presentar y cuenta con un led que nos permite ver que está funcionando, otra característica es que puede manejar cargas de 2A hasta 9A.[26]

Para este caso las cargas que controlara serán solo las del par de leds de 3A, para que estos enciendan debemos enviar una carga de 5V al Gate del MOSFET para que este pueda permitir el paso libre de la corriente activando así los leds.



Figura 22. MOSFET tipo IRF520 donde se observan los sockets, el led y las resistencias

### III.8. Implementación de Raspberry con leds y banco de baterías.

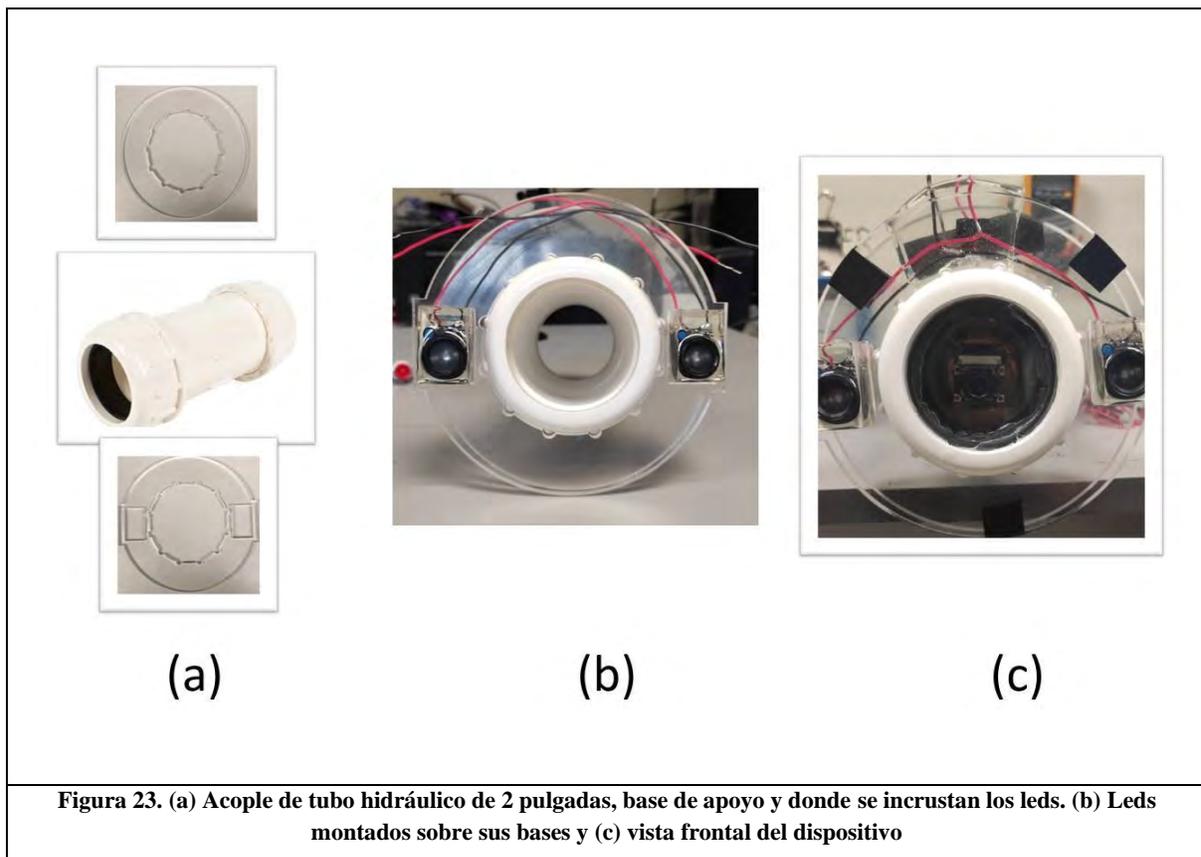
Debido a la forma y el tamaño de la carcasa del dispositivo, para evitar cualquier tipo de reflejo que puedan provocar los leds estos tuvieron que ser removidos de la cámara para ser colocados por fuera de la carcasa, como consecuencia, su funcionamiento pasaría de ser automático a ser controlado por la Raspberry y ahora se debía energizar de una fuente externa, como por ejemplo un banco de baterías. El medio por el que se comunica la orden es a través del MOSFET que va conectado a la Raspberry, la energía del banco de baterías pasa por este mismo MOSFET permitiendo encender los leds con el voltaje correcto sin riesgo a que este disminuya y los afecte.

La carcasa seleccionada permite introducir todos los componentes electrónicos necesarios, para esto entre una gran variedad de materiales se escogió un acople de tubo hidráulico de PVC de 2 pulgadas (Figura 23a). La forma cilíndrica del acople asegura una buena resistencia a la presión que el agua pudiera ejercer sobre el sistema ya que sus paredes oponen poca resistencia a la flexión, además entra en la categoría de recipiente de pared delgada por lo que la distribución del esfuerzo no varía de forma significativa a través del espesor del material por lo que el esfuerzo es uniforme, además sus dos extremos cuentan con conexiones de rosca NPT, lo que permite montar y desmontar de forma rápida y ampliar la carcasa para adaptarle la parte en la que se guardaría el banco de baterías utilizado, además de aprovechar el otro extremo abierto para adaptar un lente que le permita una clara visión a la cámara a la vez que pueda estar aislada del agua.

Cuando se comprobó el correcto funcionamiento lo próximo que se realizó fue el encapsulado de los leds para protegerlos del agua, el encapsulado fue realizado tomando en cuenta la forma que tendría la carcasa ya que estos se ajustarían por fuera de ella a los lados de la cámara, para montarlos por fuera se utilizó acrílico ya que pudo ser cortado a medida justa por una cortadora laser, se recortaron dos piezas, la base donde se apoyarían los leds y una segunda pieza donde se incrustarían los leds para mantenerlos en una posición fija y apuntando hacia enfrente, ambos soportes se pueden apreciar en la Figura 23 (a).

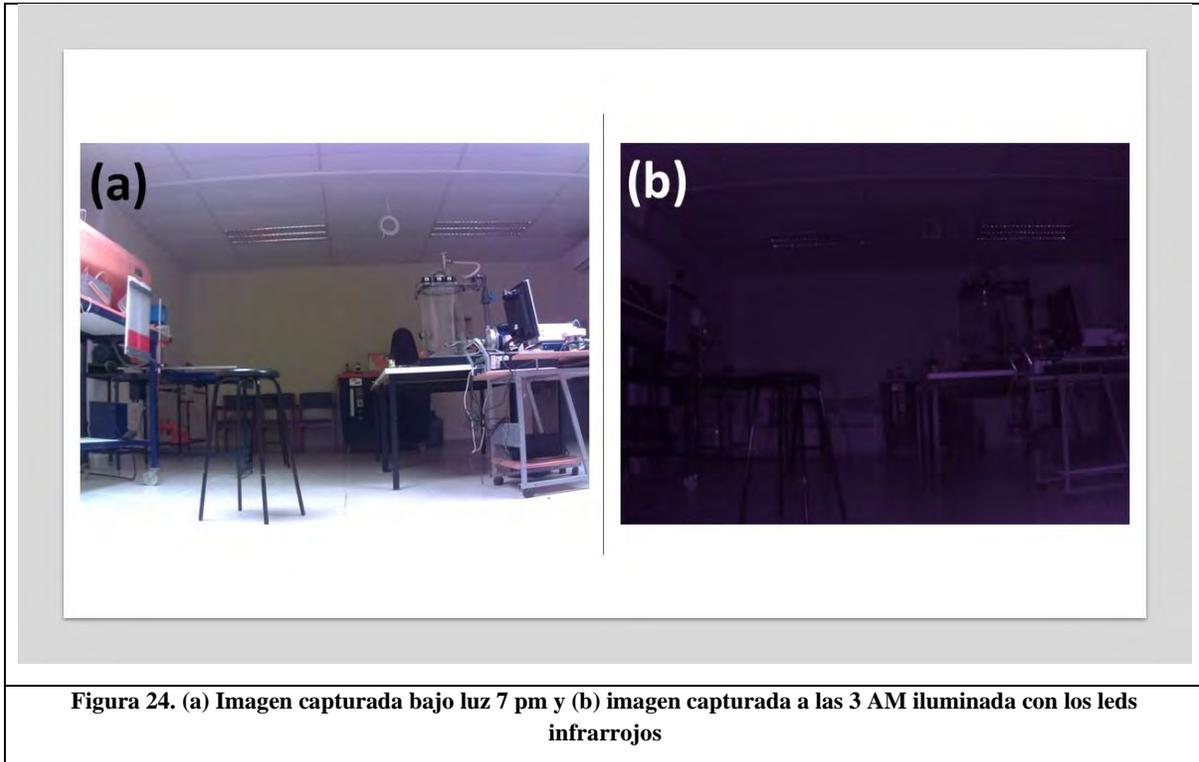
Una vez teniendo ambos soportes estos fueron ajustados en la parte exterior de la rosca superior por donde la cámara tendría acceso a la visión, lo primero en ajustarse fue la base donde los leds se asentarían seguido de los leds para luego cerrarlo con el soporte superior, como se ilustra en la Figura 23 (b).

Lo siguiente que se realizó fue el amarre de los cables de los leds, estos fueron soldados para alimentar a ambos a través de la misma fuente y puedan funcionar en conjunto conectados al mismo MOSFET, dicho amarre al igual que los leds fue encapsulado en resina epoxi para su protección contra el agua ya que estarían de igual forma expuestos, el resultado final con los componentes dentro se puede observar en la Figura 23 (c).



**Figura 23. (a) Acople de tubo hidráulico de 2 pulgadas, base de apoyo y donde se incrustan los leds. (b) Leds montados sobre sus bases y (c) vista frontal del dispositivo**

Teniendo ya fijada esa parte lo próximo fue realizar pruebas de nuevo para comprobar si la ubicación de los leds no perjudicaría de alguna forma la visión nocturna al estar tan separados de la cámara, la prueba se siguió realizando, conectando el sistema a una fuente de energía y dentro de un cuarto con condiciones de baja luz y completa oscuridad, en las Figura 24 se puede observar que todo funciona correctamente:



Una vez asegurada la posición correcta de los leds, se procedió a fijarlos en la tapa superior de la carcasa, lo siguiente fue introducir los cables que alimentarían los leds dentro de la carcasa, ya que debían ir conectados al MOSFET que iría en el mismo sitio, para realizar esta conexión se efectuaron dos perforaciones en la carcasa a la altura del sitio donde se encontraba fijo el MOSFET, dichas perforaciones se hicieron utilizando un taladro con una pequeña broca del grosor de los cables, para fijar ambos cables en las perforaciones realizadas, se utilizó un pegamento epóxico, con este pegamento se recubrió la sección del cable que pasaría por las perforaciones realizadas y se aseguró que se cubriera ambos lados de la perforación realizada, como protección extra se aplicó un sellador en spray de caucho líquido, este material se aplicó por capas justo por encima de las perforaciones, teniendo un total de tres y adhiriéndose de buena manera al material del tubo PVC, quedando finalmente de la siguiente manera:



**Figura 25. Perforaciones selladas**

Con todo funcionando como debía, se acoplaron los bancos de baterías al sistema, se utilizaron diez baterías en total, seis baterías conforman el primer banco y están destinadas para energizar la Raspberry, mientras que las otras cuatro baterías conforman el segundo banco de baterías que va destinado exclusivamente para los leds, ambos bancos de baterías van conectados en paralelo, los bancos van separados uno del otro por una placa de acrílico, se hizo con la finalidad de evitar cualquier contacto entre ellos, además cada banco lleva conectado su propio controlador de carga.

Para acoplar ambos bancos de baterías al sistema de la cámara y protegerlos del agua, se utilizó para su carcasa un tubo de PVC de 1.5 pulgadas, este tubo fue sellado de un extremo con un tapón de su medida y se pegó con pegamento para PVC, mientras que su otro extremo se acopló al tubo hidráulico que resguarda la cámara y la Raspberry, así el SIMOER quedaría completamente sellado y a prueba de agua.

Con la carcasa ya completada, lo siguiente en lo que se trabajó fue en las conexiones entre los bancos de baterías y los dispositivos a los que energizarían, se soldó a cada banco de baterías un controlador de carga para recargarlas de forma segura con el panel solar, el controlador que se seleccionó cuenta con dos entradas, una micro USB que nos permite poder cargar los bancos de baterías y uno USB para poder conectar dispositivos que utilicen la energía de los bancos (Figura 26).

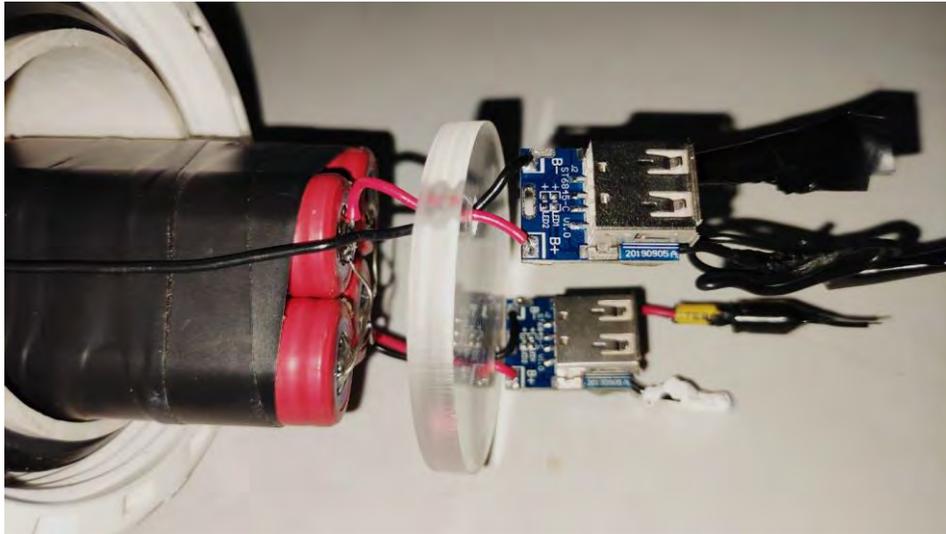
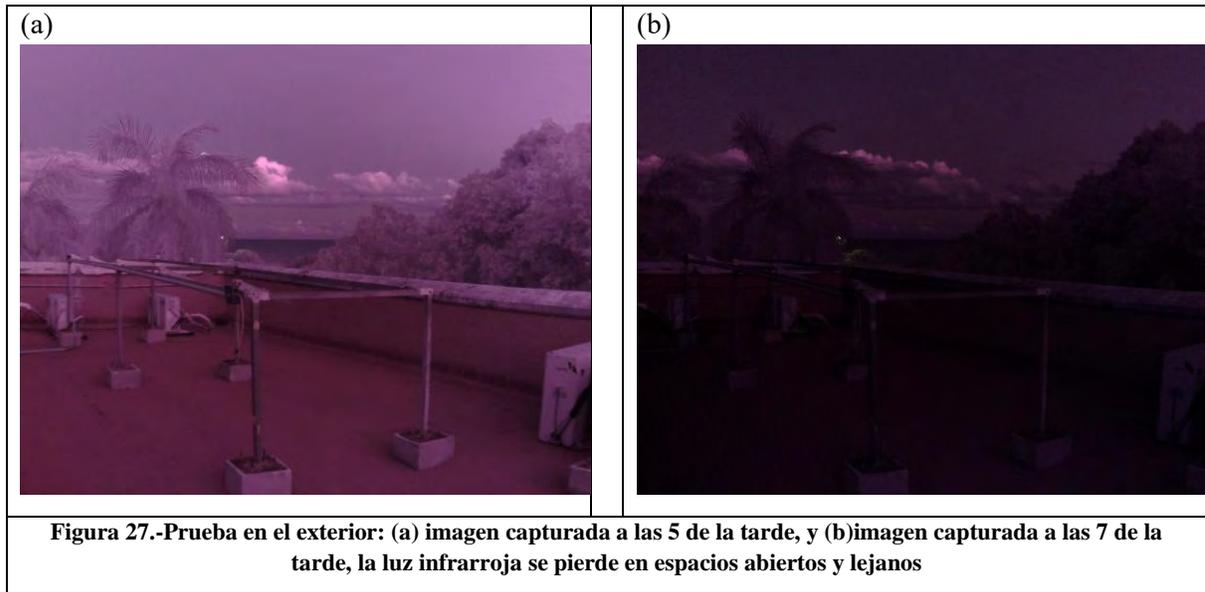


Figura 26.- bancos de baterías conectados a su controlador de carga

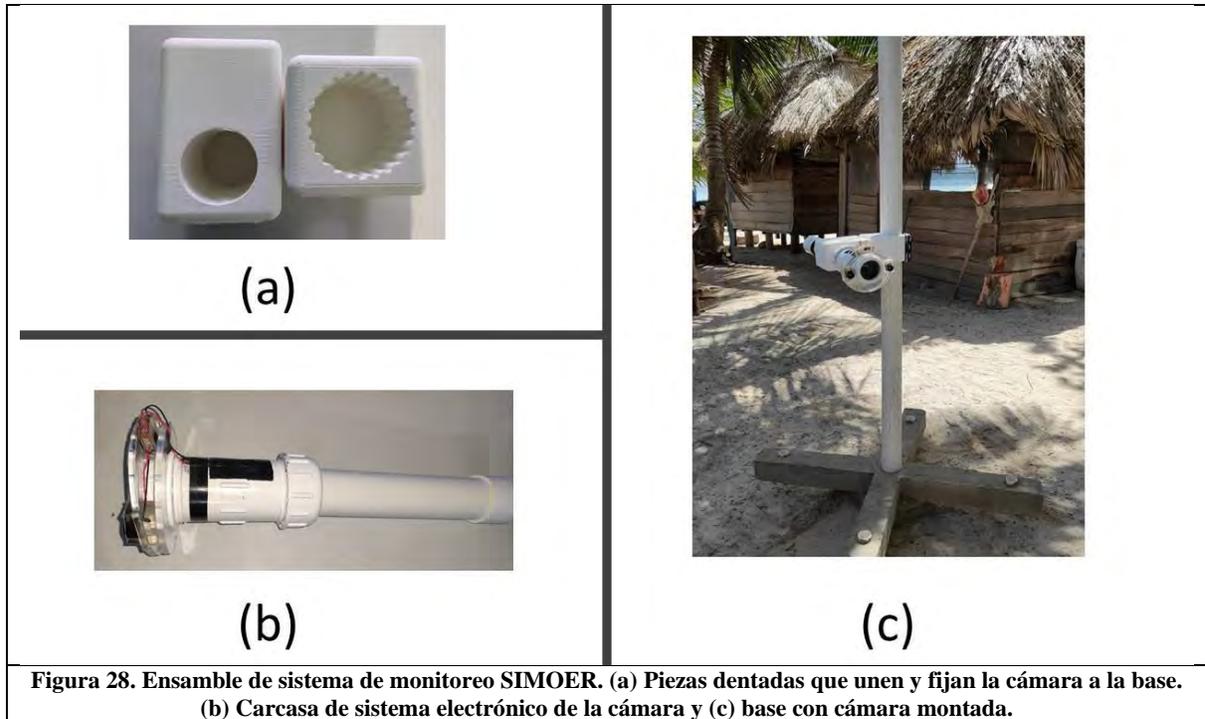
Debido a la entrada USB que los controladores de carga tienen, se soldó a los pines de la Raspberry un conector USB para poder conectarla al controlador de su banco de baterías, de la misma forma se soldó un cable USB al MOSFET, para energizarlo y pueda encender los leds.

Teniendo el sistema completo y sellado se pudieron realizar las primeras pruebas en el exterior (ver Figura 27), esta prueba se realizó sobre un techo despejado dejando el sistema durante 12 h continuas operando, en esta primera prueba no se obtuvieron los resultados esperados ya que la luz de los leds no tenían donde reflejarse o rebotar, perdiéndose así la luz al no fijarla a un objetivo fijo y por lo tanto teniendo como resultado una serie de fotografías oscuras donde no se podía apreciar nada (figura 27 (b)) sin embargo se aprendió que se debe delimitar un área de operación donde la luz generada pudiera ser captada por el lente de la cámara, esta área se delimitó a través de pruebas dentro de un cuarto cerrado y resultó ser de 3-4 m<sup>2</sup>



### III.9. Sistema de monitoreo

En la Figura 27 se muestra el sistema de monitoreo completo ensamblado. Figura 28 (a) se muestra la pieza diseñada para unir debajo del agua la carcasa de la cámara con la base del sistema. Se diseñaron dos cajas, una a la medida de la base y la otra a la de la cámara para hacerla por medio de impresión 3D, ambas cajas se unen a través de huecos dentados distribuidos cada  $10^\circ$  para poder darle la inclinación que se necesite a la cámara según el escenario que se presente. En la Figura 28 (b) se observa la carcasa ensamblada con la cámara, el microcontrolador y el banco de baterías. Teniendo ambas partes se prosiguió con montar cada pieza que conformaba el sistema de monitoreo para unirlo y hacerlo funcionar como un sistema único, el resultado final se muestra en la Figura 28 (c):



# CAPÍTULO IV.

# RESULTADOS

#### IV.1. Características eléctricas de la celda solar

La característica eléctrica del panel fotovoltaico flexible se obtuvo mediante su curva I-V bajo condiciones de iluminación  $781 \text{ W/m}^2$ . La corriente se adquirió usando la Unidad 2420-C SourceMeter® Keithley (SMU). La figura 29 se muestra la curva V-W de la celda solar bajo iluminación de campo, en la tabla II se enlista los valores eléctricos extraídos de la figura 29 y aplicando las ecuaciones (1), (2) y (3) descritas en el capítulo 2.

Las condiciones de radiación se midieron con una celda de silicio de referencia, la cual da  $74.2 \text{ mA}$  de corriente con una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  (medido con un simulador profesional). Cuando se hizo la medición la celda de referencia daba  $58 \text{ mA}$  y como las celdas de silicio se comportan de manera lineal se podría estimar la radiación en  $781 \text{ W/m}^2$ .

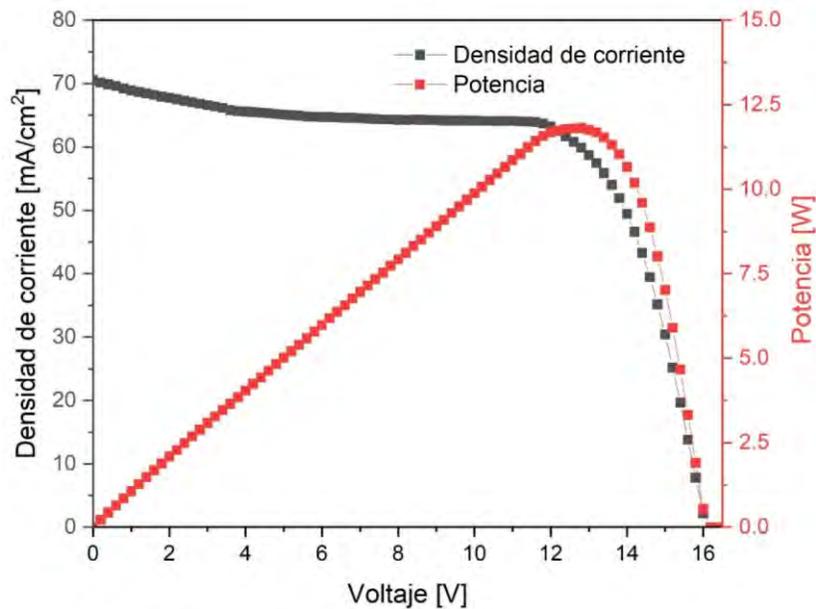


Figura 29. Curva V-W de celda solar flexible bajo radiación solar de  $781 \text{ W/m}^2$

Tabla II. parámetros eléctricos extraídos de la figura 28.

Voc [V]	16
Isc [mA/cm <sup>2</sup> ]	70
I <sub>max</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	65
V <sub>max</sub> [V]	12.8
P <sub>max</sub> [W]	11.8
FF	67.11

## IV.2. Desempeño del banco de batería

Para comprobar la duración de las baterías, primero se cargaron completamente para después dejar funcionando el dispositivo hasta que estas se descarguen en su totalidad. Su duración funcionando fue de 24 h continuas, gracias al controlador de carga el equipo se apaga automáticamente cuando las pilas reducen su voltaje a menos de 3.8V. Cada banco se encuentra completamente cargado al llegar a los 4.2V, por el controlador de carga que ambos bancos llevan, se tiene la posibilidad de cargar las baterías con dos opciones; i) mediante el panel solar y ii) conectándolas con un cargador de celular en cualquier enchufe disponible. El tiempo que le toma cargarse en su totalidad varía según la potencia de la fuente donde se cargue, al panel solar le lleva un promedio de 10 horas en condiciones ideales de un cielo despejado, pudiendo demorarse más según la condición del clima, a diferencia, cuando se cargan por medio de un cargador de celular, le toma un promedio de tres horas y media

Una vez cargadas las baterías, durante su tiempo de operación puede llegar a tomar y almacenar hasta 1440 fotografías de un tamaño de 2048 x 1536 antes de quedarse apagada, pero contando con mucho espacio disponible en la memoria para continuar almacenando fotos si se le sigue suministrando carga a las baterías

## IV.3. Adquisición de las imágenes

Estas primeras pruebas realizadas de forma controlada fueron hechas en la Bahía de Chetumal, frente a la Universidad de Quintana Roo, aproximadamente a 50 m de la costa, como podemos observar en la Figura 30. A pesar de que el agua se encontraba turbia y con poca visibilidad se logró visualizar a un par de piedras que estaban de fondo en el sitio, además de que de forma exitosa no hubo ninguna filtración de agua hacia el equipo dando la seguridad necesaria para su uso en las próximas pruebas en el entorno donde habitan los erizos.



**Figura 30.- imagen capturada en la Bahía de Chetumal**

La siguiente prueba controlada se realizó en la zona de interés, la playa de Xahuayxol.



**Figura 31.-** fotografía tomada con la cámara del proyecto en el lugar de pruebas.

La prueba fue realizada durante el día, el propósito de esta prueba fue comprobar la visibilidad disponible en el sitio de pruebas de interés y poder así ajustar los parámetros de la cámara, además se asegura que el erizo podría reconocerse en las fotografías, los resultados obtenidos de la prueba fueron los siguientes:



**Figura 32.-** Fotografía del coral



**Figura 33.- Imagen cercana de un erizo**



**Figura 34.- Erizo de 10 cm capturado en imagen**



**Figura 35.- Foto de erizo a una distancia mayor**



**Figura 36.- Vista del erizo desde otro ángulo**

Una vez comprobado su funcionamiento de forma controlada y durante el día en el sitio de interés, se prosiguió con la prueba nocturna que es la de mayor importancia. Dicha prueba

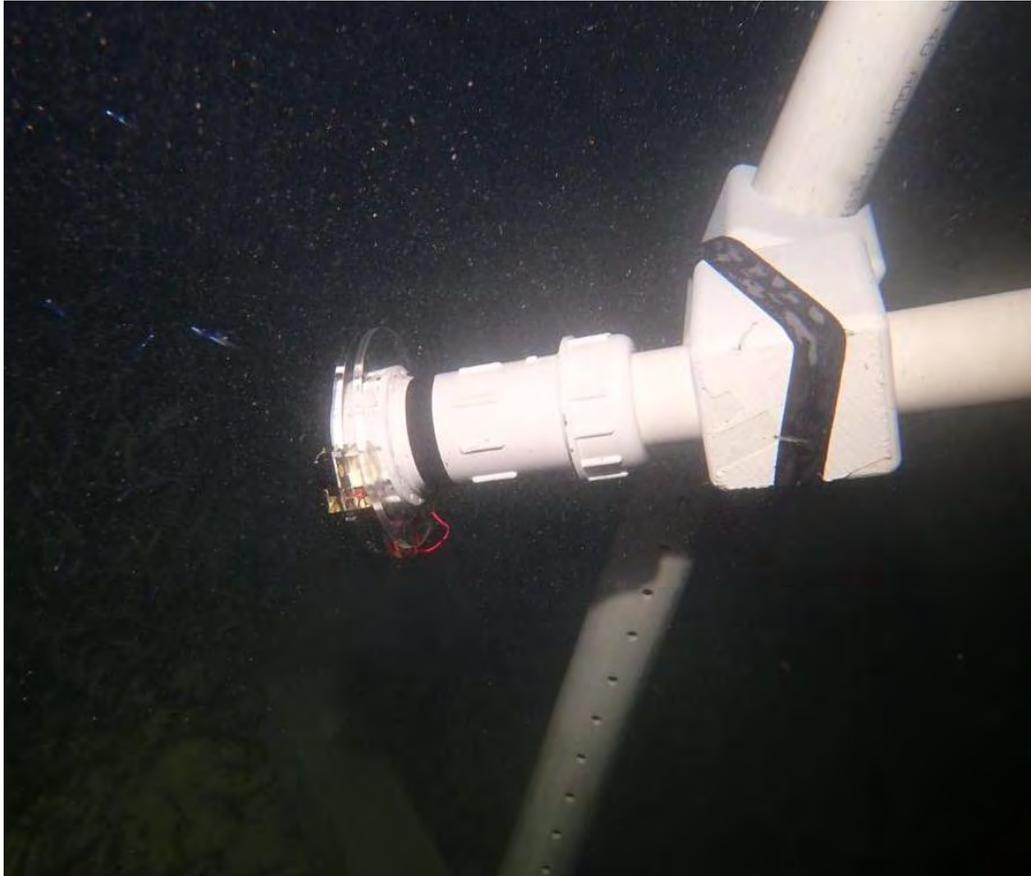
consistió en utilizar toda la estructura y componentes en un sitio previamente seleccionado. La estructura completa con la cámara montada luce de la siguiente manera:



**Figura 37.- Estructura con la cámara montada**

Lo primero que se realizó antes de introducir la estructura al agua, fue seleccionar un sitio favorable, el lugar debía estar cerca de alguna formación rocosa, para tener más posibilidades de encontrar erizos, además de contar con un espacio suficientemente plano, esto para aportar a la estructura una mayor estabilidad. El segundo, paso fue transportar la base de la estructura al punto seleccionado, esto se realizó sujetando tres flotadores a la estructura para luego desplazarlo hasta el sitio elegido, una vez estando ahí, lo siguiente fue desamarrar los flotadores y asegurarse de que la estructura quedara bien asentada en el fondo del sitio. El

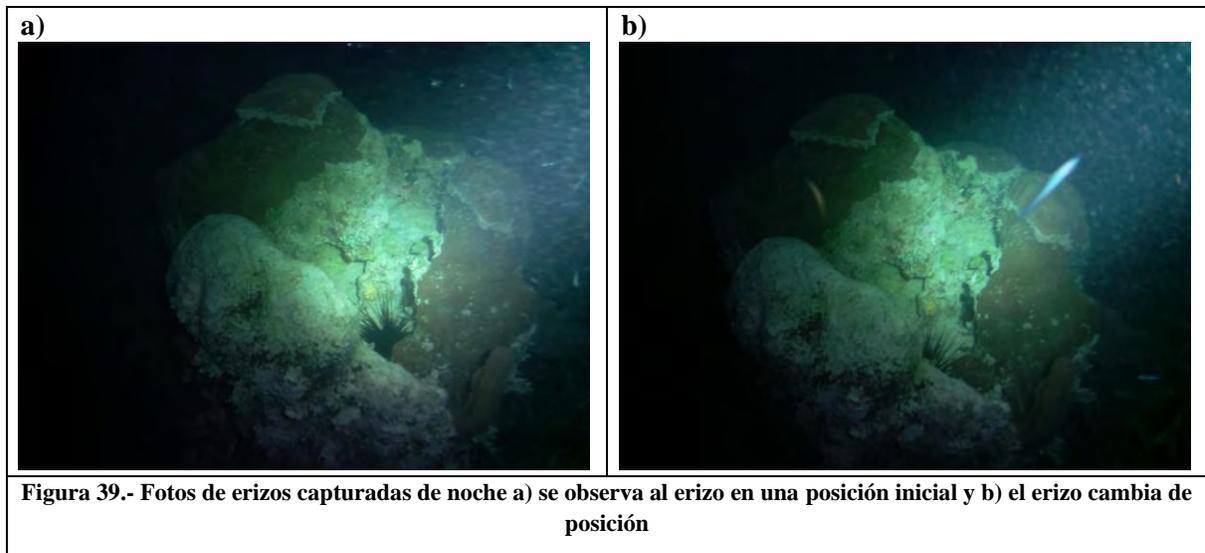
tercer paso fue ensamblar la cámara con la base, para finalmente ajustar la dirección hacia donde la cámara apuntaría y el ángulo de inclinación.



**Figura 38.- Dispositivo montado a una profundidad de 2 m**

Fue durante esta prueba que se confirmó que la luz infrarroja no era la mejor opción para utilizar bajo el agua ya que no se alcanzaba a apreciar nada, esto puede atribuirse a la poca potencia de los leds, la cantidad utilizada de estos, o el espectro infrarrojo utilizado. Para solucionar este problema se optó por utilizar luz visible blanca de 20W, la cual no se ha reportado que modifique el comportamiento de los erizos al utilizar en un corto periodo de tiempo.[27]

Se obtuvo una notoria mejoría al momento de visualizar las imágenes obtenidas:



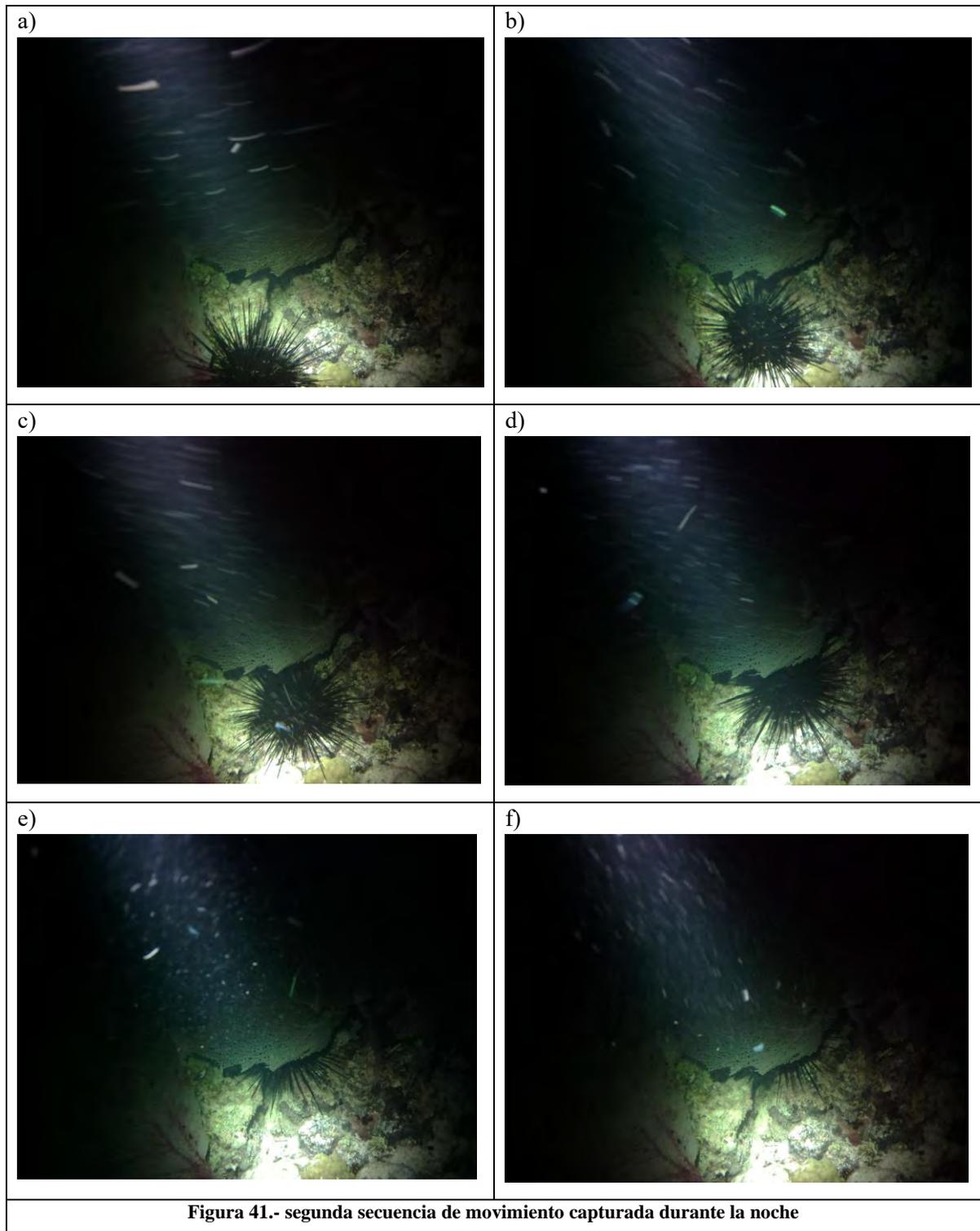
Como se puede apreciar en la figura, durante la prueba nocturna se logra captar el movimiento del erizo, lo cual es importante para un correcto monitoreo y seguimiento de sus movimientos, esta prueba se realizó a una profundidad de dos metros, se asume que el movimiento no fue significativo ya que al día siguiente se pudo observar que el erizo permaneció en el mismo lugar.

Ahora bien, pese a tener unos resultados favorables, se realizó una segunda y última prueba a una profundidad menor y en un lugar distinto al seleccionado la primera vez, pero dentro de la laguna arrecifal de Xahuayxol, esto con la finalidad de obtener más datos útiles, los resultados obtenidos fueron los siguientes:



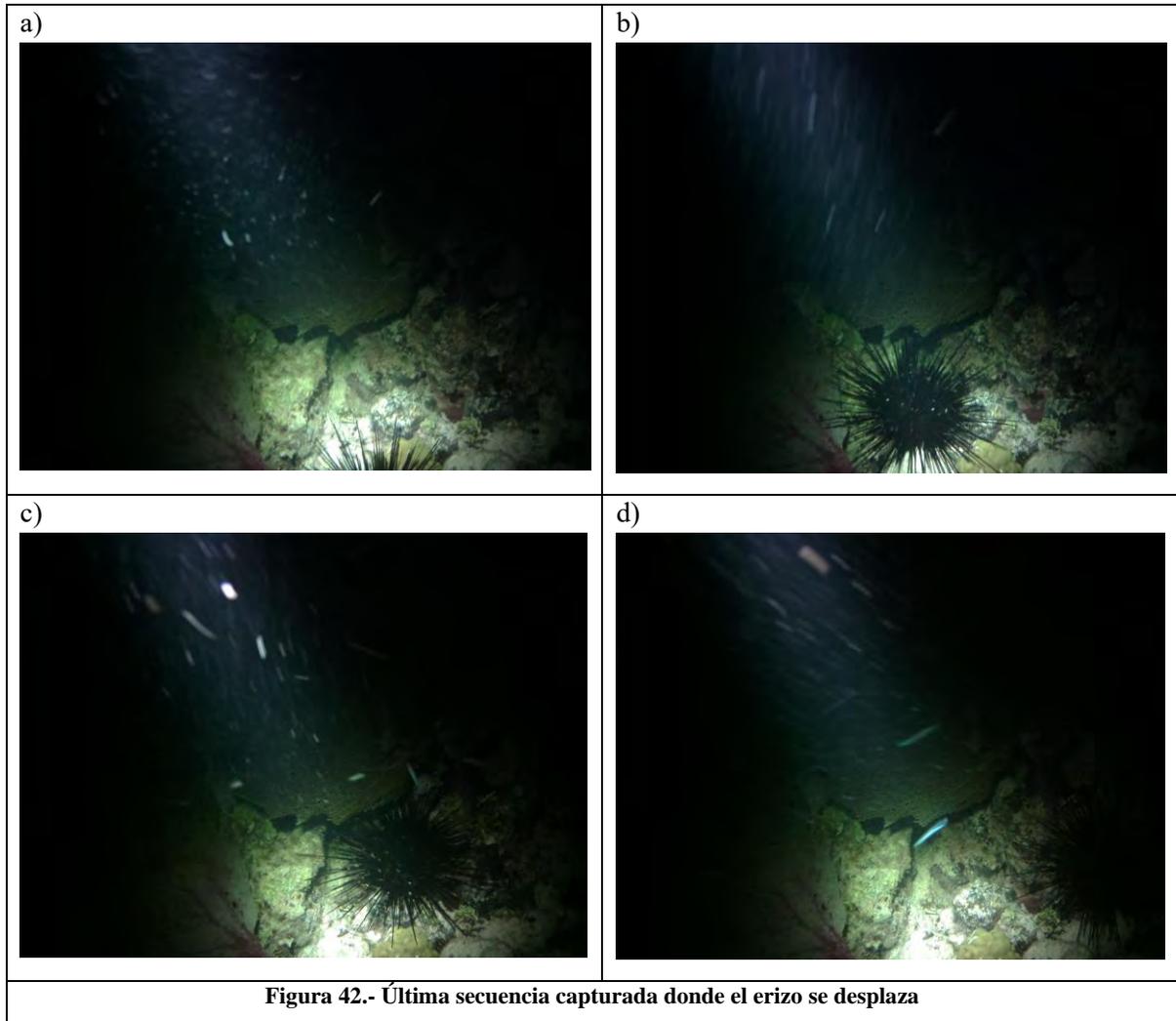
**Figura 40.- secuencia de movimiento del erizo.**

Como se observa en la Figura 40, se logra capturar una secuencia de movimiento, en esta segunda prueba el equipo funcionó por 15 horas continuas, además de esta primera secuencia se lograron capturar dos más en el transcurso de toda la noche:



En esta segunda secuencia podemos ver en la figura 41 como el erizo aparece nuevamente en escena para seguidamente desaparecer del cuadro.

Como último, se captó una tercera secuencia donde se aprecia cómo reaparece el erizo y de la misma forma toma otra ruta, por lo que no volvió a detectarse en el resto de la noche, posiblemente refugiándose en otra roca cercana.



Tal como se ve en la figura 42, el erizo cambia de dirección para desaparecer de la toma de forma definida.

# CAPÍTULO V.

# CONCLUSIONES

Se trabajó en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de erizos de mar, energizado mediante un panel fotovoltaico flexible de bajo costo.

El sistema consume un total de energía de 25.8 Wh durante su tiempo activo de operación gracias a reducir al mínimo necesario las funciones del sistema, esto permite al único panel tener la capacidad necesaria para poder recargarlas sin la necesidad de tantos paneles fotovoltaicos que eleven el costo del sistema.

El sistema de monitoreo es capaz de adquirir imágenes continuas por hasta 12h sin una fuente externa que pueda recargar las baterías, este tiempo es suficiente para adquirir una gran cantidad de imágenes según se requiera y conforme se configure el tiempo de captura.

De igual manera, a pesar de estar enfocado para la actividad nocturna, se cuenta con la opción de cambiar los parámetros de la cámara adquisidora de imágenes, haciendo posible el obtener fotos de forma diurna y nocturna.

En contraste con una cámara convencional, este sistema ofrece una gran variedad de posibilidades, como se observa en el diagrama de flujo del capítulo 3, en la sección de desarrollo de código de Raspberry, en la figura 18, se puede, por ejemplo: Tener control de forma remota, configurar distintos parámetros que se ajusten a diferentes necesidades y poder activarlos al momento que se necesite, además de poder tomar capturas de forma continua durante la noche por el tiempo que sea necesario sin preocuparse por la falta de batería gracias al panel solar que recarga las baterías durante el día.

De las pruebas de campo se concluye que el sistema trabajó adecuadamente en aguas someras, se tuvo una buena estabilidad con la base permitiendo una imagen estable y sin movimiento, la visión que la cámara ofrece para apreciar a detalle lo que aparece es de al menos 5 m de distancia según la claridad del agua, lo cual viene bien para el propósito de esta tesis ya que los erizos se mueven muy poco al poder encontrar su alimento cerca de sus cuevas y no tener problemas de competencia por su comida estos no cuentan con la necesidad de arriesgarse a toparse con depredadores al alejarse grandes distancias en búsqueda de hogar y alimento.

### **Trabajo a futuro.**

Se implementará código de reconocimiento de objetos dentro del algoritmo del microprocesador con el fin de llevar a la autonomía este sistema de monitoreo.

La base podría diseñarse de tal manera que pueda desarmarse en piezas más compactas para un fácil transporte, la carcasa de la cámara puede hacerse con plástico inyectado, en un molde diseñado de tal manera que permita la posibilidad de agregar más cámaras, distribuidas de manera que incremente el rango de imagen disponible, y poder incluir una raspberry con mayor poder de procesamiento, incluir distintos sensores para capturar distintos datos a la

vez, además se puede emplear una mejor forma de iluminar el entorno por las noches de manera que se pueda iluminar más área y así percibir más información del área al momento de capturar imágenes, se podría hacer un compartimiento donde vaya la iluminación que permita intercambiar las lámparas que se utilicen para así observar el comportamiento de la vida marina bajo distintos haces de luz, entre otras mejoras.

## Bibliografía

[1]	M. Fingas, C.E. Brown, Chapter 5 - Oil Spill Remote Sensing, Editor(s): Mervin Fingas, Oil Spill Science and Technology (Second Edition), Gulf Professional Publishing, 2017, Pages 305-385, ISBN 9780128094136, DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809413-6.00005-9">10.1016/B978-0-12-809413-6.00005-9</a>
[2]	Montes GM, López MDMS, Gámez MDCR, Ondina AM. An overview of renewable energy in Spain. The small hydro-power case. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> 2005; 9:521–34.
[3]	Yusaf T, Goh S, Borserio JA. Potential of renewable energy alternatives in Australia. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> 2011;15:2214–21.
[4]	Kelly G. History and potential of renewable energy development in New Zealand. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> 2011; 15:2501–9.
[5]	Milbrandt AR, Heimiller DM, Perry AD, Field CB. Renewable energy potential on marginal lands in the United States. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> 2014;29:473–81.
[6]	Nematollahi O, Hoghooghi H, Rasti M, Sedaghat A. Energy demands and renewable energy resources in the Middle East. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> 2016; 54:1172–81.
[7]	Iyer AS, Couch SJ, Harrison GP, Wallace AR. Variability, and phasing of tidal current energy around the United Kingdom. <i>Renew Energy</i> 2013; 51:343–57
[8]	BUN-CA. (2020). Manuales sobre energía renovable: Solar Térmica (1ª ed.). <a href="https://bun-ca.org/wp-content/uploads/2020/11/SOLAR.pdf">https://bun-ca.org/wp-content/uploads/2020/11/SOLAR.pdf</a>
[9]	Reyes, J. A., & Pascual, R. D. (2012). DISEÑO Y APLICACIÓN DE COLECTORES SOLARES TIPO PARABÓLICO.

[10]	Rodríguez Rosales K., Moure Flores F. J. y Quiñones Galvan J. G. (julio-septiembre, 2020) Energía solar fotovoltaica. CIENCIA, (71), 3. <a href="https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-antteriores/articulos-fuera-de-los-volumenes-publicados-online/798-energia-solar-fotovoltaica">https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-antteriores/articulos-fuera-de-los-volumenes-publicados-online/798-energia-solar-fotovoltaica</a>
[11]	Solar, E. (2017). Energía Solar. Recopilado de: <a href="https://autosolar.es/bateriasagm/bateria-agm-12v-220ah-victron-energy.El">https://autosolar.es/bateriasagm/bateria-agm-12v-220ah-victron-energy.El</a> , 20.[Online]. <a href="https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica)/2_Solar/Solar_Resumen.pdf">https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica)/2_Solar/Solar_Resumen.pdf</a>
[12]	Mañas Torres, A. J. (2019). Desarrollo e implementación de un invernadero inteligente controlado con Arduino.[online] <a href="http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/14003/1/MEMORIA%20TFG%20ANTONIO%20JESUS%20MANAS.pdf">http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/14003/1/MEMORIA%20TFG%20ANTONIO%20JESUS%20MANAS.pdf</a>
[13]	García Valladares O. y Pilatowsky Figueroa I. (2019). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. Universidad Nacional Autónoma de México. <a href="https://anes.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/Aplicaciones_Termicas_De_La_Energia_Solar_En_Los_Sectores_Residencial_Servicios_e_Industrial.pdf">https://anes.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/Aplicaciones_Termicas_De_La_Energia_Solar_En_Los_Sectores_Residencial_Servicios_e_Industrial.pdf</a>
[14]	Hart, Emma E., Fennessy, Julian, Rasmussen, Henrik B., Butler-Brown, Michael, Muneza, Arthur B., et al, Precision and performance of an 180g solar-powered GPS device for tracking medium to large-bodied terrestrial mammals, <i>BioOne Complete, Wildlife Biology</i> , 2020(3), DOI: 10.2981/wlb.00669
[15]	González-Reolid, I., Molina-Molina, J. C., Guerrero-González, A., Ortiz, F. J., & Alonso, D. (2018). An autonomous solar-powered marine robotic observatory for permanent monitoring of large areas of shallow water. <i>Sensors</i> , 18(10), 3497.
[16]	Castillo, A. A., Calva, H. A. G., & Aguilar, J. V. C. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN ROBOT ACUÁTICO PARA MONITOREO DE ARRECIFES.
[17]	Díaz Silva, P. A., Macías Rueda, J. A., & Álvarez Higuera, J. M. (2020). Diseño de Robot Submarino Operado Remotamente (ROV) con Interfaz de Transmisión de Datos para aplicaciones de monitoreo Submarinas orientado a la Industria 4.0.
[18]	Casco, S. (2014). Raspberry Pi, Arduino y Beaglebone Black Comparación y Aplicaciones. vol., 1, 4-8. [online] <a href="https://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/MiniPCs.pdf">https://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/MiniPCs.pdf</a>

[19]	Aldea, E. L. (2017). Raspberry Pi Fundamentos y Aplicaciones. Grupo Editorial RA-MA. [libro]
[20]	Via Echezarreta, G. (2017). Entorno de desarrollo para la realización de prácticas de sistemas empujados basado en Raspberry Pi. [online] <a href="https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12611/Via%20Echezarreta%20Gabriel.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12611/Via%20Echezarreta%20Gabriel.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a>
[21]	Araujo Mena, E. M. (2015). Implementación de un sistema de video vigilancia para los exteriores de la UPS, mediante minicomputadores y cámaras Raspberry PI (Bachelor's thesis). [online] <a href="https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10379/1/UPS-GT001404.pdf">https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10379/1/UPS-GT001404.pdf</a>
[22]	Kastillo Estévez, I. A., & Nasimba Tipán, G. S. (2017). Diseño e implementación del controlador de carga y descarga de una batería dentro de un sistema autónomo de iluminación pública a partir de fuentes de energía renovable (Bachelor's thesis, Quito, 2017.).
[23]	González Salcedo, J. A., & Vidales Hincapie, B. F. (2019). SISTEMA DE AJUSTE DIGITAL DE VOLTAJE PARA UN CONVERTIDOR DC/DC.[online] <a href="http://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8510#page=1">http://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8510#page=1</a>
[24]	Saucedo, M. Á. B. (2019). MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD PRÁCTICA DE BATERÍAS RECARGABLES DE LI-ION TIPO 18650 (PRACTICAL CAPACITY MEASUREMENT FOR 18650 TYPE LI-ION RECHARGEABLE BATTERIES). Pistas Educativas, 41(134). [online] <a href="http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/2078/1617">http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/2078/1617</a>
[25]	Shulman, M. J. (2020). Echinometra sea urchins on Caribbean coral reefs: Diel and lunar cycles of movement and feeding, densities, and morphology. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 530, 151430. [online] <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022098120301192">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022098120301192</a>
[26]	Robayo, C., & Serna, S. (2015). Sistema para caracterización de paneles fotovoltaicos. Avances en Ingeniería, 220. [online] <a href="https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/331385300_Avances_en_Ingenieria/links/5c76e2d8299b1268d2b0152/Avances-en-Ingenieria.pdf#page=221">https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/331385300_Avances_en_Ingenieria/links/5c76e2d8299b1268d2b0152/Avances-en-Ingenieria.pdf#page=221</a>
[27]	Yang, M., Chen, Z., Hu, F., Sun, J., Ding, J., Chang, Y., & Zhao, C. (2020). Light spectra regulated foraging and feeding behaviors shed light on stock enhancement of the sea urchin <i>Strongylocentrotus intermedius</i> . Aquaculture Reports, 18, 100480.

