

**Centro de Enseñanza Técnica y Superior, CETYS  
Universidad**



**Maestría en ingeniería e innovación con orientación en  
Diseño y Sistemas de Manufactura: Ingeniería de Diseño**

---

**Generación de Prototipo de Célula Foto-Electrolítica para Agua  
de Mar**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**Maestro en ingeniería**

Presenta:

**Estefania Lara Romero**

Tijuana, Baja California, México  
2020

Resumen de la tesis que presenta **Gloria Estefania Lara Romero** como requisito parcial para la obtención del grado de **Maestro en Ingeniería e Innovación con orientación en Diseño y Sistemas de Manufactura: Ingeniería de Diseño**.

### **Generación de Prototipo de Célula Foto-Electrolítica para Agua de Mar**

El ciclo del hidrógeno ofrece una fuente de energía renovable tentadora. Actualmente la producción de hidrógeno se basa en la extracción de combustibles fósiles por medio de proceso químicos, pues los costos y eficiencia de otros medios no logran equipararse. La foto-electrólisis de agua para la producción de hidrógeno no es un proceso comercial y aún está en exploración y desarrollo, y el uso de agua de mar podría resolver el uso de fuentes de agua fresca o la desalinización de agua para el proceso de electrólisis. Usando agua de mar y con el diseño de electrodos y electro-catalizadores a bajo costo que puedan resistir la corrosión implícita pudieran proveer una solución para las barreras actualmente presentes. En este proyecto se presenta el uso de un cátodo a base de Ni espuma y un ánodo de Acero 316SL, ambos recubiertos con una capa de níquel electrolítico, para un prototipo de foto-electrólisis. Se utiliza un prototipo flotante para sostener los electrodos operando por debajo de 5V y con una pérdida constante al incrementar o disminuir el voltaje aplicado. La producción de hidrógeno se consiguió, mientras que la oxidación en el ánodo fue constante sin lograr la producción del gas. La corrosión del ánodo fue consistente con el voltaje aplicado por lo que mejoras en la conexión del circuito para corregir el sobrepotencial requerido para la reacción evolutiva del hidrógeno y minimizar las pérdidas de voltaje aplicado.

**Palabras clave: Foto-electrólisis de Agua de Mar, Producción de Hidrógeno, Cátodo de Níquel Espuma, Electroquímica, Combustibles Solares**

Abstract of the thesis presented by **Gloria Estefania Lara Romero** as a partial requirement to obtain the **Master of Innovation and Engineering** with orientation in **Design and Manufacturing Systems: Design Engineering**.

### **Development of a Photo-electrolysis Cell Prototype for Seawater**

The hydrogen cycle offers a tentative source of renewable energy. Current hydrogen production processes include its extraction from fossil fuels using chemical processes, since costs and efficiency from other means cannot equate current commercial costs. Water photo-electrolysis for hydrogen production is currently not a commercial process and is still under investigation and development, and the use of seawater could resolve the use of fresh water supplies and desalination processes required for electrolysis. Using seawater and the design of electrodes and electrocatalysts at a low cost that could resist the implicit corrosion could provide a solution to the currently present obstacles. In this project a Ni-foam cathode and a 316SL Steel anode, layered with electrolytic nickel, are used for a photo-electrolysis prototype. A floating prototype printed device is used to hold the electrodes operating under a 5V applied voltage and a constant loss when increasing or decreasing power. The production of hydrogen was achieved, while oxidation of the anode was constant without achieving the production of oxygen gas. Corrosion of the anode was consistent with the applied voltage for which improvement to correct the required overpotential for the evolutive reaction of hydrogen and minimize applied power loss.

**Keywords: Photo-electrolysis, Hydrogen Production, Nickel Foam Cathode, Electrochemistry, Solar Fuels**

## Dedicatoria

A Nessie & la Manada,  
porque no se comieron mi proyecto.

## Agradecimientos

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecer a mi madre, por haberme apoyado y motivado para seguir adelante y cumplir con cada una de mis metas que han conllevado a mi superación académica y profesional.

Agradezco también al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme brindado el apoyo y patrocinio para llevar a cabo y culminar mis estudios de Maestría y llevar a cabo este proyecto bajo el número (CV/Becario) 897857/640623, correspondiente a la convocatoria titulada: "Convocatoria Para Posgrados Con La Industria 2018, Segundo Periodo". Así como al Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad) y a Industrias Electrónicas del Pacifico SA. De CV (Schneider Electric Tijuana), por haberme brindado la confianza para participar en su programa de Becados Industria.

Me gustaría también agradecer a mis profesores y compañeros durante este periodo ya que todos han sido parte de mi formación y continuo aprendizaje. Agradezco sinceramente sus consejos y el haber compartido conmigo sus conocimientos.

Un especial agradecimiento al Ing. Daniel Esposito de la Universidad de Columbia por compartir su trabajo e investigación relacionados con el desarrollo de combustibles solares.

Agradezco a mi familia y amigos, quienes han sido partícipes, motivación y alivio durante esta experiencia académica, en quienes he podido confiar y sin su contribución, muy particular de cada uno, no habría sido posible.

Finalmente, a mi mejor amigo por acompañarme en esta aventura de principio a fin y creer en mi y en el propósito de este proyecto. Gracias por retarme y apoyarme, por tu cariño y paciencia, no fue un camino sencillo, pero lo logramos.

Gracias a todos!

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>Capítulo 1. Introducción</b> .....                                  | 1  |
| <b>1.1 Antecedentes</b> .....  | 1  |
| <b>1.2 Preguntas de Investigación</b> .....                            | 4  |
| <b>1.3 Propuesta de Trabajo</b> .....                                  | 4  |
| <b>1.4 Hipótesis</b> .....   | 4  |
| <b>1.5 Objetivos</b> .....   | 4  |
| <b>1.5.1 Objetivo general</b> .....                                    | 4  |
| <b>1.5.2. Objetivos específicos</b> .....                              | 4  |
| <b>1.6 Materiales y Métodos de Trabajo</b> .....                       | 5  |
| <b>1.7 Cronograma</b> .....  | 5  |
| <b>Capítulo 2. Marco Teórico</b> .....                                 | 6  |
| <b>2.1 Foelectroquímica</b> .....                                      | 6  |
| <b>2.1.1 Teoría de Bandas</b> .....                                    | 7  |
| <b>2.2 Foto-Electrólisis</b> .....                                     | 8  |
| <b>2.3 Agua de Mar y sus Propiedades Corrosivas</b> .....              | 11 |
| <b>2.4 Materiales Anticorrosivos</b> .....                             | 12 |
| <b>Capítulo 3. Metodología</b> .....                                   | 15 |
| <b>3.1 Esquema y Construcción General.</b> .....                       | 15 |
| <b>3.2 Conexión y Funcionamiento</b> .....                             | 18 |
| <b>3.3 Experimento y Medición</b> .....                                | 19 |
| <b>3.4 Ensamble de Impresión</b> .....                                 | 20 |
| <b>3.5 Ensamble Operacional</b> .....                                  | 27 |
| <b>Capítulo 4. Resultados</b> .....                                    | 29 |
| <b>4.2 Salinidad &amp; Temperatura del Agua.</b> .....                 | 29 |
| <b>4.2.1 Resultados de Mediciones de Salinidad y Temperatura</b> ..... | 29 |
| <b>4.3 Operación del Prototipo</b> .....                               | 31 |
| <b>4.3.2 Eficiencia del Prototipo</b> .....                            | 32 |
| <b>4.3.3 Producto</b> .....  | 32 |
| <b>4.3.4 Agua Residual</b> .....                                       | 33 |
| <b>4.4 Medición de Desgaste</b> .....                                  | 34 |
| <b>Capítulo 5. Discusión</b> .....                                     | 36 |
| <b>5.1 Análisis de Muestras de Agua.</b> .....                         | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1.1 Muestras Tomadas en Sitio.....               | 36 |
| 5.1.2 Muestras Tomadas Durante el Experimento..... | 37 |
| 5.2 Análisis de Operación del Prototipo.....       | 38 |
| 5.3 Análisis de Desgaste.....                      | 39 |
| Capítulo 6. Conclusiones.....                      | 41 |
| Literatura Citada.....                             | 43 |
| Anexos.....  | a  |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 ESQUEMÁTICA DEL ENSAMBLE Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE LA PLATAFORMA MARINA CONSTRUIDA POR EL EQUIPO DE LA UNIVERSIDAD DE COLUMBIA. ....   | 2  |
| FIGURA 2 FORMACIÓN DE BANDAS ENERGÉTICAS EN N ÁTOMOS INTERACTUANTES DE LI (IZQUIERDA) Y SOBREPOSICIÓN DE BANDAS EN UN CONDUCTOR METÁLICO NA (DERECHA). [23] .....  | 8  |
| FIGURA 3 ELECTROLISIS DE AGUA EN UN ELECTROLIZADOR ALCALINO.....   | 9  |
| FIGURA 4 REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE FOTO-ELECTRÓLISIS. ....   | 10 |
| FIGURA 5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LA FOTO-ELECTRÓLISIS SOLAR; (1) FOTO-ELECTRODO; (2) CONTRAELECTRODO CATÓDICO; (3) VOLTÍMETRO; Y (4) RESISTENCIA DE CARGA. [11] .....   | 14 |
| FIGURA 6 ESQUEMA GENERAL DE ENSAMBLE DE LA CELDA FOTO-ELECTROLÍCA. EL ESQUEMA MUESTRA LAS CONEXIONES GENERALES DONDE SE TIENE LA CELDA FLOTANDO SOBRE LA SOLUCIÓN (AGUA DE MAR) CONECTADA A TRAVÉS DE DOS MULTÍMETROS HACIA LA CELDA FOTOVOLTAICA CONECTADA FINALMENTE AL REGULADOR. ....  | 15 |
| FIGURA 7 MODELADO E IMPRESIÓN DE ESTRUCTURA. 7.1 MODELADO DE ESTRUCTURA BASE (IZQUIERDA SUPERIOR); 7.2 MODELADO DE ESTRUCTURA SUPERIOR (DERECHA SUPERIOR); 7.3 IMPRESIÓN 3D DE ESTRUCTURA BASE, CON ORIFICIOS DE 6.5 MM PARA LA INSERCIÓN DE ELECTRODOS (IZQUIERDA INFERIOR); 7.4 IMPRESIÓN 3D DE ESTRUCTURA SUPERIOR CON ORIFICIOS DE 6.5 MM PARA LA INSERCIÓN DE CONEXIÓN A ELECTRODOS (MEDIO INFERIOR); 7.5 ENSAMBLE DE ESTRUCTURA GENERAL (DERECHA INFERIOR). .... | 16 |
| FIGURA 8 ELECTRODOS. 8.1 MATERIA PRIMA PARA MANUFACTURA DE ELECTRODOS A BASE DE ESPUMA NÍQUEL (IZQUIERDA). 8.2 ELECTRODOS A BASE DE ESPUMA NÍQUEL, RECUBIERTOS DE NÍQUEL ELECTROLÍTICO Y NÍQUEL-ZINC (MEDIO); 8.3 ELECTRODOS DE ACERO 316SL ELECTRONIQUELADO. ....   | 17 |
| FIGURA 9 EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS PARA LA VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE CORRIENTE Y VOLTAJE (9.1 LADO IZQUIERDO). HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN PARA SALINIDAD (9.2) Y TEMPERATURA (9.3) DEL AGUA (DERECHA). ....   | 18 |
| FIGURA 10 DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA FOTO-ELECTROLÍTICA. ....  | 18 |
| FIGURA 11 CIRCUITO ELÉCTRICO ILUSTRADO CON LOS COMPONENTES REPRESENTATIVOS.....  | 19 |
| FIGURA 12 CIRCUITO ELÉCTRICO CON COMPONENTES REPRESENTATIVOS, SE DENOTAN LOS PUNTOS DE VALIDACIÓN CON EL MULTÍMETRO DE GANCHO. ....  | 20 |
| FIGURA 13 VISTA SUPERIOR (IZQUIERDA) E INFERIOR (DERECHA) DE LA BASE DEL BARCO.....  | 21 |
| FIGURA 14 VISTAS LATERAL DEL BARCO. ....   | 21 |
| FIGURA 15 VISTA FRONTAL (IZQUIERDA) Y TRASERA (DERECHA) DE LA BASE DEL BARCO. ....   | 21 |
| FIGURA 16 VISTA INTERIOR DEL BARCO. SE MUESTRAN LOS ESPACIOS PARA INSERTAR LAS BARRAS DE ENSAMBLE.....   | 21 |
| FIGURA 17 VISTAS LATERALES (IZQUIERDA) Y SUPERIOR E INFERIOR (DERECHA) DE BARRAS DE ENSAMBLE. ....   | 22 |
| FIGURA 18 VISTAS SUPERIOR (IZQUIERDA) E INFERIOR (DERECHA) DE LA PARTE SUPERIOR DEL BARCO.....   | 22 |
| FIGURA 19 VISTA LATERAL DE LA PARTE SUPERIOR DEL BARCO. ....   | 22 |
| FIGURA 20 PARTE TRASERA (IZQUIERDA) E FRONTAL (DERECHA) DE LA PARTE SUPERIOR DEL BARCO.....  | 23 |
| FIGURA 21 VISTA DE LOS TRES ESPACIOS DE ENSAMBLE DE LA PARTE SUPERIOR DEL BARCO.....   | 23 |
| FIGURA 22 ENSAMBLE DE BARRAS DE UNIÓN. 22.1 VISTA SUPERIOR (SUPERIOR). 22.2 Y 22.3 VISTAS ESQUINADAS CON BARRAS DE ENSAMBLE EN LA PARTE INFERIOR DEL BARCO. ....   | 24 |
| FIGURA 23 MODO DE ENSAMBLE DE BARCO. CONSISTE EN CONECTAR LOS ESPACIOS DE INSERCIÓN ENTRE AMBAS PARTES CON LAS BARRAS DE ENSAMBLE.....   | 24 |
| FIGURA 24 DEFECTOS DE DEFORMACIÓN EN LAS ESQUINAS DE LA BASE Y PARTE SUPERIOR DEL BARCO. SE MUESTRAN LAS TRES ESQUINAS DEL MISMO MOSTRANDO LA DEFORMACIÓN. ....  | 25 |
| FIGURA 25 VISTA DE 3 ÁGULOS DE ENSAMBLE (LATERAL, FRONTAL Y TRASERA).....  | 25 |
| FIGURA 26 PRUEBA DE MODELO EN UN RECIPIENTE DE AGUA DE 2 LITROS. 26.1 RECIPIENTE DE AGUA PARA PRUEBA DE MODELO (IZQUIERDA SUPERIOR); 26.2 VISTA SUPERIOR DE BARCO ENSAMBLADO FLOTANDO EN RECIPIENTE (DERECHA SUPERIOR); 26.3 VISTA LATERAL DE BARCO FLOTANDO EN RECIPIENTE COMPROBANDO EL NO INGRESO DE AGUA (IZQUIERDA INFERIOR); 26.4 VISTA SUPERIOR DE BASE DEL BARCO DEMOSTRANDO EL NO INGRESO DE AGUA (DERECHA INFERIOR). ....                                    | 26 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 27.1 NÍQUEL ESPUMA CORTADO DEL ROLLO CON MEDIDAS DE 1.5 X 5 X 25 MM, APROXIMADAMENTE DEBIDO A CONSISTENCIA DEL MATERIAL (IZQUIERDA). 27.2 ELECTRODOS CON VARIACIÓN EN LA COLORACIÓN POSTERIOR AL TRATAMIENTO DE NÍQUEL ELECTROLÍTICO (DERECHA). | 26 |
| FIGURA 28 CELDA FOTOVOLTAICA EN OPERACIÓN CONECTADA A REGULADOR (IZQUIERDA) Y ACERCAMIENTO AL REGULADOR OPERANDO (DERECHA).  | 27 |
| FIGURA 29 REGULADOR DE CELDA FOTOVOLTAICA CON CAÍDA DE VOLTAJE AL SER CONECTADO A LOS ELECTRODOS. ESTOS COMIENZAN A OPERAR CON UN VOLTAJE DE 3V.   | 27 |
| FIGURA 30 ELECTRODOS EN PROCESO DE ELECTRÓLISIS A UN VOLTAJE DE 3V.  | 28 |
| FIGURA 31 COMPONENTES DE LA CELDA FOTO-ELECTROLÍTICA.  | 28 |
| FIGURA 32 GRÁFICO CON RELACIÓN DE SALINIDAD Y TEMPERATURAS ENTRE LOS DIFERENTES SITIOS MUESTREADOS.  | 29 |
| FIGURA 33 GRÁFICO DE RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD DE LAS MUESTRAS, TOMADAS EN TIJUANA, BC. PREVIO AL EXPERIMENTO.   | 30 |
| FIGURA 34 MUESTRAS DE PH CON PAPEL DE PRUEBA COMPARADO CONTRA PATRÓN ESTÁNDAR. LAS MUESTRAS SE ENCUENTRAN CONSISTENTES.  | 30 |
| FIGURA 35 PRUEBA DE CALIDAD DE AGUA EN LA MUESTRA DE BAHIA.  | 31 |
| FIGURA 36 PRUEBA DE CALIDAD DE AGUA EN LA MUESTRA DE VALLE.  | 31 |
| FIGURA 37 PRUEBA DE CALIDAD DE AGUA EN LA MUESTRA DE MISIÓN.   | 31 |
| FIGURA 38 AGUA RESIDUAL TRAS EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS CON LA MUESTRA DE BAHÍA.   | 33 |
| FIGURA 39 AGUA RESIDUAL TRAS EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS CON LA MUESTRA DE VALLE.   | 33 |
| FIGURA 40 AGUA RESIDUAL TRAS EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS CON LA MUESTRA DE MISIÓN.  | 34 |
| FIGURA 41 IMAGEN TOMADA CON MICROSCOPIO PARA VISUALIZAR LA CALIDAD RESULTANTE DE LOS ELECTRODOS EN LA MUESTRA DE BAHIA, ACERO (IZQUIERDA) Y NI-ESPUMA (DERECHA).   | 34 |
| FIGURA 42 IMAGEN TOMADA CON MICROSCOPIO PARA VISUALIZAR LA CALIDAD RESULTANTE DE LOS ELECTRODOS EN LA MUESTRA DE VALLE, ACERO (IZQUIERDA) Y NI-ESPUMA (DERECHA).   | 35 |
| FIGURA 43 IMAGEN TOMADA CON MICROSCOPIO PARA VISUALIZAR LA CALIDAD RESULTANTE DE LOS ELECTRODOS EN LA MUESTRA DE MISIÓN, ACERO (IZQUIERDA) Y NI-ESPUMA (DERECHA).  | 35 |
| FIGURA 44 PRUEBA DE PH EN AGUA RESIDUAL.   | 38 |
| FIGURA 45 VISTAS LATERALES DE LOS EFECTOS DE CORROSIÓN EN LOS ELECTRODOS DE LA MUESTRA DE MISIÓN.  | 39 |
| FIGURA 46 COMPARACIÓN DEL CÁTODO PREVIO Y POST EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS.   | 40 |
| FIGURA 47 DIUJO ACOTADO DE LA PARTE SUPERIOR DEL BOTE.   | B  |
| FIGURA 48 DIUJO ACOTADO DE LA PARTE INFERIOR DEL BOTE.   | C  |
| FIGURA 49 DIUJO ACOTADO DE LAS BARRAS DE ENSAMBLE DEL BOTE.  | D  |
| FIGURA 50 TABLA COMPARATIVA PARA LOS RESULTADOS DE LAS TIRAS DE PRUEBA UTILIZADAS PARA PROBAR LA CALIDAD DE LAS MUESTRAS TOMADAS. IMAGEN INCLUIDA EN KIT DE PRUEBA TETRA STRIPS 6 EN 1.  | E  |
| FIGURA 51 CAPTURAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN EL CÁTODO.  | I  |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE UNA MUESTRA DE AGUA DE MAR, EN LA SUPERFICIE DE UN OCÉANO ABIERTO. NOTA: BR-, F-, SR <sup>2+</sup> , H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , TODOS < 0.01. .... | 11 |
| TABLA 2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.....  | 17 |
| TABLA 3 RESULTADOS DE PRUEBA DE CALIDAD DEL AGUA. ....   | 30 |
| TABLA 4 RESUMEN DE DATOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE TOMADOS DURANTE EL EXPERIMENTO. ....   | 32 |
| TABLA 5 DATOS DE PESO Y GROSOR INICIALES DE LOS DIFERENTES JUEGOS DE ELECTRODOS. ....  | 34 |
| TABLA 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN BAHÍA DE LOS ÁNGELES, ENSENADA, BC.....   | 36 |
| TABLA 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN VALLE TRANQUILO, ENSENADA, BC. ....   | 36 |
| TABLA 8 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN LA MISIÓN, ENSENADA, BC. ....   | 36 |
| TABLA 9 DATOS DE UBICACIÓN Y POBLACIONALES DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....   | 37 |
| TABLA 10 RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN BAHIA DE LOS ANGELES, ENSENADA, BC. ....   | F  |
| TABLA 11 RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN VALLE TRANQUILO, ENSENADA, BC.....   | G  |
| TABLA 12 RESULTADOS DE MEDICIONES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA EN LA MISIÓN, ENSENADA, BC.....   | H  |

## Capítulo 1. Introducción

El hidrógeno representa una alternativa a los medios de energía actualmente utilizados. Es un combustible no contaminante, así como uno de los elementos más abundantes en la Tierra. Desafortunadamente, la Tierra no cuenta con grandes depósitos de hidrógeno ya que comúnmente se encuentra mezclado con algún otro elemento, tal como el oxígeno o carbono. El proceso más común para obtener hidrógeno es la electrólisis o el uso de hidrocarburos. La electrólisis es un proceso a través del cual se emplea una corriente en una solución de agua, la cual producirá la separación del oxígeno e hidrógeno. Para su ejecución aún se emplea combustibles fósiles, ej. gasolina y diesel, y el agua utilizada proviene de aguas dulces, un recurso limitado. [5] Existe otro proceso, todavía en su etapa experimental, que consta del uso de energía solar para impulsar el proceso electroquímico para la electrólisis del agua, donde, idealmente, la luz solar se convierte directamente en hidrógeno y oxígeno [5], y el residuo de su uso sería oxígeno respirable o vapor de agua. Este proceso es conocido como foto-electrólisis, el mismo que se estará explorando para el diseño de un prototipo funcional a lo largo de este proyecto.

El enfoque de estudio del Profesor Fujishima trataba sobre la fotoelectroquímica de semiconductores y la aplicación de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). En este documento, se le dará seguimiento a esta, y otras investigaciones para la aplicación de foto-electrólisis en cuerpos de agua marina, llevando el enfoque sobre el análisis de diferentes semiconductores que pudieran contribuir a eficientizar el proceso; la principal barrera, los efectos de la reacción en un cuerpo de agua de mar. Al emplear agua de mar, en contraste con el agua alcalina usualmente utilizada, se presentan diferentes variables en el proceso, principalmente la selección de un material semiconductor que contrarrestar, o ser altamente resistente a, los efectos de corrosión, formaciones calcáreas y otras reacciones potenciales durante el tratamiento del agua.

La investigación se llevará a cabo en una zona costera en la región de Baja California Norte, de donde se tomarán las muestras para realizar el análisis teórico y experimental.

### 1.1 Antecedentes

La idea del proceso híbrido de foto-electrólisis nace en los 70's con investigaciones de Akira Fujishima y Kenichi Honda, con un artículo publicado en Julio de 1972 en la Revista Nature. [17] El uso de  $\text{TiO}_2$ , propuesto por Fujishima y Kenichi como fotocatalizador para la división de agua en el proceso de electrólisis fue investigado hasta los años 80's, donde diferentes combinaciones, tales como:  $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ ,  $\text{K}_2\text{La}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ,  $\text{ZrO}_2$ , y  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  fueron encontrados. El estudio de diferentes materiales, para lograr la mezcla de las celdas fotovoltaicas al proceso de electrolisis, continuaron con la manipulación y estudio de diferentes recubrimientos para la aplicación en los electrodos. En los 90's se desarrollaron diferentes fotocatalizadores responsivos a la luz ultravioleta (UV), tal

como el  $\text{NaTaO}_3$ . Más adelante, el uso de La y  $\text{RhCrO}/\text{Ga}_2\text{O}_3$  en compuestos de  $\text{NiO}/\text{NaTaO}_3$  dio pie a resultados donde se encontró una mayor reacción con la irradiación de UV. [12]

En el 2018, Esposito y un equipo de investigación de la Universidad de Columbia, llevaron la conceptualización de la foto-electrólisis un paso más allá al convertir su modelo en un diseño a escala de lo que podría ser una estación marina productora de oxígeno e hidrógeno, a base de agua de mar. En este diseño se emplean electrodos a base de Titanio con un recubierto de Platino, los cuales fueron incrustados en un diseño impreso en 3D para formar una celda de electrólisis. En su diseño los electrodos tienen un recubrimiento y ensamble asimétrico, es decir, estos se encuentran angulados en lugar de paralelos y a su vez, el recubrimiento no es igual en ambos electrodos. El dónde el hidrógeno es almacenado en una reserva mientras que el oxígeno es liberado a la atmósfera, simulando un proceso de fotosíntesis. [22]

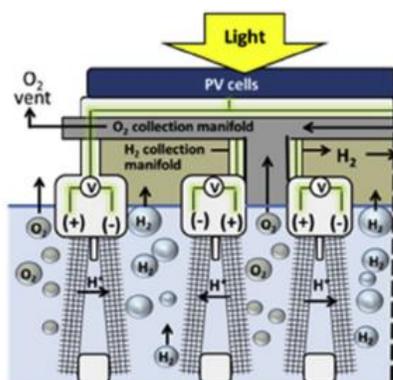


Figura 1 Esquemática del ensamblaje y funcionamiento del modelo de la plataforma marina construida por el equipo de la Universidad de Columbia.

Entre los resultados del anterior estudio se discute que aún hay varios obstáculos para llevar a cabo un proceso de electrólisis de agua de mar, entre ellos el diseño de otros módulos o plataformas deben ser desarrollados para llegar a un modelo óptimo y estable. La Figura 1, es una representación del flujo de energía a través del sistema desarrollado y muestra el funcionamiento básico del modelo con un arreglo de electrolizadores alternados para la recolección del hidrógeno y desagüe del oxígeno. El diseño debe considerar el riesgo de bioincrustación, corrosión, y eficiencia en los electrodos por largos periodos de tiempo. Se demuestra que el uso de membranas para separar los gases puede ser obsoleto al implementar asimetría en los ángulos y recubrimientos de los electrodos. Se descubrió también que la asimetría en el recubrimiento reducía considerablemente la cruza entre los gases producidos, llegando a ser de tan solo 1%. [22]

El primer estudio referido, a principios del 2019, Koper y un grupo de investigadores, proponen el uso de agua marina como una ventaja al limitar la competencia y demanda de agua dulce. En

dicha publicación de emplean compuestos de  $\text{IrO}_x$  y  $\text{MnO}_x$  para la evolución de cloro y oxígeno, respectivamente. Se investiga la selección química de la reacción de evolución del oxígeno (OER) por encima de la reacción de evolución del cloro (CER) en los ánodos a base de  $\text{MnO}_x$  en soluciones acídicas de agua salada. Entre las conclusiones, el equipo denota que al incluir una capa de  $\text{MnO}_x$  sobre una superficie de  $\text{IrO}_x$  la actividad catalítica disminuye la producción de cloro. Los resultados muestran como la difusión de materiales afecta la selección del elemento reactivo en la sustancia dentro del proceso de electrólisis. Esta investigación da un aporte al proceso de electrólisis de la salmuera, más que encontrar un mejor catalizador para la OER. [21]

Yu y Ren de la Universidad de Houston, y un equipo de colaboradores, se estudió el uso de metales nítridos no-nobles para su aplicación en electro-catalizadores de alto rendimiento en el proceso de electrólisis de agua de mar. En su investigación se emplea un catalizador de tres capas, comenzando con NiFeN, nanopartículas de NiMoN y Ni, que provee una alta actividad y durabilidad contra la reacción del oxígeno. Dentro del proceso, se combina con un catalizador de NiMoN para la obtención del hidrógeno a bajos voltajes. El equipo desarrolló un catalizador para la OER de NiMoN@NiFeN para la división de agua de mar alcalina. La capa interior de NiMoN es altamente conductiva mientras que la capa externa de NiFeN protege el material de la corrosión de los aniones de cloro. Para la OER se requieren tan solo 369 y 398 mV con una densidad de corriente de 500 y 1000  $\text{mAcm}^{-2}$  a una temperatura de 25°C. Para la HER se necesita una densidad de corriente de 500 y 1000  $\text{mAcm}^{-2}$  a voltajes de 1.608 y 1.709 V, respectivamente. [19]

Hongjie Dai y un grupo de estudiantes de la Universidad de Stanford proponen el uso de electrodos a base de hidróxido de níquel y hierro (NiFe), uniformemente recubiertos con una capa de sustrato de níquel ( $\text{NiS}_x$ ), para llevar a cabo el proceso de electrólisis de agua salada. Esta es una solución eficiente y barata, en comparación, que provee un uso de aproximadamente 1,000 horas continuas de funcionamiento en aplicaciones industriales. En esta investigación se logra una electrólisis de agua salada activa y estable. El electrodo a base de NiFe fue altamente selectivo para la OER, mientras que la capa de  $\text{NiS}_x$  fue altamente efectiva para la conductividad y protección contra la corrosión. Se concluye que el electrolizador podría alcanzar una densidad de corriente de 400  $\text{mAcm}^2$  a 2.1 V en agua de mar o agua altamente cargada con sal a temperatura ambiente, mientras que a una temperatura de 80°C se logró un voltaje de 1.72 V. Uno de los puntos más característicos de esta investigación fue la durabilidad de los electrodos, pues se encontró una actividad estable por encima de las 1,000 horas de uso. [20]

## 1.2 Preguntas de Investigación

En la siguiente investigación se pretende responder las siguientes interrogantes:

1. ¿Cómo afecta el posicionamiento angular y asimetría de diseño en la eficiencia de electrodos a base de Ni?
2. ¿Cuál es el beneficio o desventaja de la recolección del oxígeno?
3. ¿Cuál punto de la costa sería el más adecuado para la producción de O y H?

## 1.3 Propuesta de Trabajo

La metodología en el Capítulo 3 presentará de forma detallada los pasos seguidos para conseguir el entregable de este trabajo, el cual consistirá en un prototipo a escala de una unidad para la producción de combustibles solares.

1. Diseño de Célula de Electrólisis
2. Diseño de Plataforma
3. Adquisición de Material
4. Construcción de Modelo
5. Prueba de funcionalidad del modelo con tres muestras de la costa de Baja California

## 1.4 Hipótesis

Utilizar electrodos a base de compuestos de níquel y hierro en una celda foto-electrolítica de agua de mar para producir combustibles solares es más eficiente con una baja tasa de corrosión de  $<1.6\text{g/año}$  y eliminando la producción de gas de cloro.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Desarrollo de un prototipo de una célula foto-electrolítica que funcione a un voltaje  $< 5\text{V}$  por medio de celdas fotovoltaicas para la reacción de evolución del hidrógeno (HER) en agua de mar, por medio de electrodos asimétricos compuestos de Ni.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar el prototipo utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD).
- Seleccionar los elementos necesarios que conlleven a la construcción de una celda electrolítica, acorde a la literatura citada.
- Diseñar electrodos de baja corrosión y bajo precio en comparación a los actualmente utilizados (Pt/Ti y Aceros).

- Describir el proceso de foto-electrólisis sin membrana.
- Investigar y evaluar los beneficios del uso de agua de mar en el proceso de electrólisis.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo mediante la metodología de diseño de experimentos.

## 1.6 Materiales y Métodos de Trabajo

Para la ejecución de este proyecto será necesaria la utilización de programas de Diseño Asistido por Computadora, tales como Autodesk Sketchbook e Inventor para el diseño de la celda foto-electrolítica. Para el diseño de la celda se pretende imprimir la base para sujetar los electrodos utilizando impresión 3D. Los electrodos serán manufacturados por un tercero. Para el diseño del circuito eléctrico se utilizará un simulador, mientras que físicamente se llevará a cabo la validación del circuito midiendo la fotocorriente utilizando la metodología de Eficiencia de Conversión de Foton Incidente a Corriente (IPCE), descrito por Granados, en el libro Principio de Fotoelectroquímica y eficiencia de voltajes aplicados.

## 1.7 Cronograma

| #          | Tarea  | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto |
|------------|--|-------|------|-------|-------|--------|
| <b>1</b>   | <b>Anteproyecto</b>  |       |      |       |       |        |
| 1.1        | Título, Índice, Marco Teórico  |       |      |       |       |        |
| 1.2        | Antecedentes, Preguntas de Investigación, Propuesta de Trabajo       |       |      |       |       |        |
| 1.3        | Hipótesis, Objetivos, Materiales y Métodos, Cronograma, Bibliografía |       |      |       |       |        |
| 1.4        | Correcciones Finales   |       |      |       |       |        |
| <b>2</b>   | <b>Metodología</b>   |       |      |       |       |        |
| 2.1        | Definición de Especificaciones Técnicas                              |       |      |       |       |        |
| 2.2        | Diseño de Modelo Físico  |       |      |       |       |        |
| 2.3        | Diseño del Circuito  |       |      |       |       |        |
| <b>2.4</b> | <b>Compra de Material</b>  |       |      |       |       |        |
| 2.4.1      | Fabricación de Electroodos   |       |      |       |       |        |
| 2.4.2      | Impresión 3D del Modelo  |       |      |       |       |        |
| 2.4.3      | Orden de Celda Fotovoltaica  |       |      |       |       |        |
| <b>2.5</b> | <b>Construcción del Prototipo</b>                                    |       |      |       |       |        |
| 2.5.1      | Conexión del Circuito  |       |      |       |       |        |
| 2.5.2      | Ensamble del Modelo  |       |      |       |       |        |
| <b>2.6</b> | <b>Resultados</b>  |       |      |       |       |        |
| 2.6.1      | Prueba de Prototipo  |       |      |       |       |        |
| 2.6.2      | Evaluación de Prototipo  |       |      |       |       |        |
| 2.6.3      | Comparación de Funcionamiento  |       |      |       |       |        |

## Capítulo 2. Marco Teórico

### 2.1 Foelectroquímica

La fotoelectroquímica hace referencia al estudio de los procesos que ocurren bajo la influencia de la iluminación sobre un electrodo funcionando inmerso en un electrolito. En una economía basada en la energía solar, la extracción de hidrógeno a partir del agua debe obtenerse sin expulsar CO<sub>2</sub>. Acorde al autor, una opción más económica para los procesos de electrólisis actual, es foto-electrolizar directamente el agua irradiando fotocatalizadores con luz solar, generando hidrógeno directamente en una planta. [23]

Teniendo en cuenta la distribución espectral de la luz solar (Ultravioleta (UV), Luz Visible, e Infrarrojo (IR)), Granados ha determinado que la energía óptima de la banda prohibida de un semiconductor para la conversión de fotones solares en electrones está entre 1.1 y 1.7 eV. Estos valores corresponden a la absorción de todos los fotones cuya longitud de onda es inferior a 1 μm aproximadamente, es decir, la región entre la luz UV, luz visible, y parte de la luz IR. Para determinar la longitud de onda, λ, de los fotones y su energía, E, se utiliza la siguiente fórmula:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde v es la frecuencia, h es la constante de Plank (6.626x10<sup>-34</sup> Js), y c es la velocidad de la luz en el vacío (3x10<sup>8</sup> ms<sup>-1</sup>). [23]

Las celdas fotoelectroquímicas son dispositivos simples que constan de dos electrodos, uno metálico y otro semiconductor, inmersos en un electrolito e expuestos a la luz solar. Actualmente, existen tres métodos para convertir la luz solar en fuentes de energía: fotosíntesis, celdas fotovoltaicas, y celdas fotoelectroquímicas. En este documento se revisarán dos procesos cuya conceptualización es clave para el desarrollo del prototipo a generar. [23]

Una celda fotovoltaica consiste en dos tipos de sólidos inorgánicos, normalmente dopadas de silicio cristalino o amorfo, conectados a través de una unión. Esta unión proporciona a la celda la habilidad de dirigir el flujo de corriente en una dirección hacia el circuito externo y generar potencia eléctrica. Estas celdas utilizan un gradiente de energía libre para separar las cargas fotogeneradas. El propósito del gradiente de energía es dirigir cargas (electrones y huecos) a través del sólido, y enviarlas en direcciones opuestas. [23]

Las celdas fotoelectroquímicas son recientes y en los últimos 30 años se han desarrollado con una eficiencia de conversión de energía solar superior al 10%. Operacionalmente, una celda fotoelectroquímica puede producir electricidad, combustibles químicos o ambos. El proceso que ocurre en estas celdas depende de las reacciones electroquímicas de los electrodos. Es decir, considerando que uno de los electrodos efectúe la oxidación del agua (reacción de evolución de

oxígeno (OER)), para producir O<sub>2</sub>, el mecanismo a partir del cual se puede producir esta reacción es recogiendo el exceso de energía de electrones fotogenerados. La extracción de energía puede realizarse forzando las cargas a través de una carga resistiva en el circuito eléctrico. [23]

Alternativamente, si se dispone de suficiente energía de los electrones se puede reducir el agua (reacción de evolución de hidrógeno (HER)) para producir H<sub>2</sub>. En este proceso el agua se electroliza para producir O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. De esta manera, se producen combustibles a partir de la energía de un fotón incidente. [23]

### 2.1.1 Teoría de Bandas

La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para dejar circular libremente la corriente eléctrica. De acuerdo a la teoría de bandas, los átomos tienen niveles de energía discretos cuando están aislados unos de otros. En una molécula, los orbitales de los átomos que la conforman se solapan y producen un número discreto de orbitales moleculares. En estructuras sólidas la cantidad de átomos incrementa. Como resultado, las diferencias energéticas entre orbitales adyacentes dentro de una banda de energía determinada son tan pequeñas que la banda puede considerarse como un continuo de niveles de energía, en lugar de formar niveles de energía discretos. [23]

Debido a que algunos intervalos de energía no contienen orbitales se crean brechas energéticas entre las diferentes bandas (bandas prohibidas y barreras energéticas). La banda correspondiente a la capa externa atómica, ocupada por los electrones de valencia, los cuales permiten los enlaces entre los átomos, puede presentarse en tres estados: si la banda más externa no está ocupada completamente, se denomina banda de conducción; si esta banda externa está llena, se denomina banda de valencia; si la banda vacía queda inmediatamente encima de la banda externa, es la banda de conducción. Es decir, la banda de valencia es la banda ocupada por mayor cantidad de energía y la banda de conducción es la banda vacía de mayor energía. [23]

La conductividad eléctrica de un material sólido requiere que los electrones ocupen orbitales llenas parcialmente. Esto se logra ocupando la banda de conducción. Los materiales conductores tienen una estructura electrónica que les permite conducir la corriente eléctrica a bajas temperaturas o a temperatura ambiente. Según la teoría de bandas, estos materiales son aquellos cuyas bandas de valencia y de conducción se encuentren próximos entre sí, o inclusive solapadas. [23]

En la figura 2 (izquierda) se ejemplifica la configuración electrónica del metal Li, 1s<sup>2</sup>2s. En esta figura se ve la capacidad de los orbitales en un átomo aislado. Cuando se tienen N átomos se aislados, los estados disponibles se ven multiplicados por N, aunque los niveles energéticos

permanecen estables. Cuanto  $N$  átomos se encuentran muy cercanos, la capacidad electrónica del material se ve multiplicada por  $N$ , cada nivel energético se divide entre  $N$  niveles con energías diferentes, lo que hace que estos se expandan y se formen bandas de energía. Dentro de una misma banda de energía, los niveles están separados continuamente. Las regiones entre las bandas energéticas disponibles son zonas que no pueden ser ocupadas por los electrones.

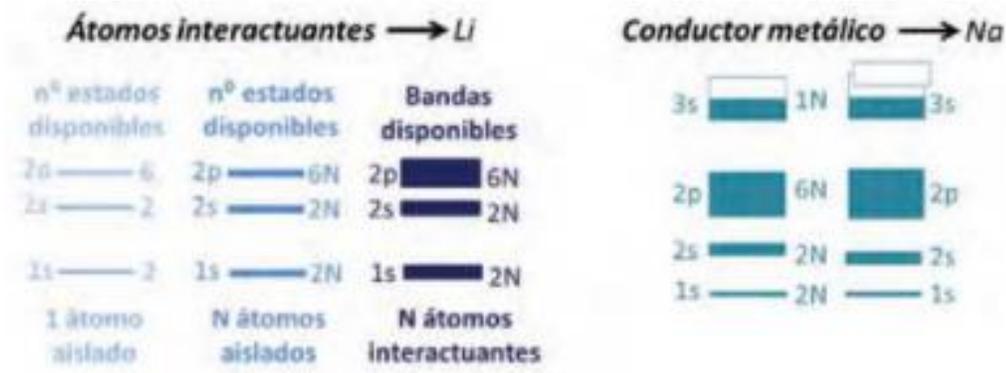


Figura 2 Formación de bandas energéticas en  $N$  átomos interactuantes de Li (izquierda) y superposición de bandas en un conductor metálico Na (derecha). [23]

En el átomo de Li, el orbital 1s contiene dos electrones; la banda 2s consiste de un electrón (parcialmente ocupado) y los orbitales 2p se encuentran vacíos. Entonces, la banda 2s constituye la banda de valencia, mientras que la banda 2p es la banda de conducción. La figura 2 (derecha) muestra la estructura del metal Na, cuya banda de valencia 3s se encuentra superpuesta con la banda adyacente 3p, lo que hace del metal Na altamente conductor.

Los materiales semiconductores pueden conducir electricidad a temperaturas bajas, mientras que a temperaturas actúan como aislantes. En los semiconductores, las bandas de conducción y valencia se encuentran separadas por una barrera de energía o una banda prohibida más pequeña que aquella de los materiales aislantes. La banda prohibida (o *band gap*,  $E_g$ ) refiere a esta diferencia en energía en el extremo superior de la banda de valencia y el extremo inferior de la banda de conducción, y determina las propiedades electrónicas del material. [23]

## 2.2 Foto-Electrólisis

Electrólisis es, acorde al *Dictionary of Science (6th Edition)*, la producción de una reacción química al pasar una corriente eléctrica a través de un electrolito. Se utilizan dos electrodos, los cuales funcionan como cátodo y ánodo. En el proceso de electrólisis, iones positivos viajan al cátodo e iones negativos hacia el ánodo. Las reacciones que ocurren dependen de la transferencia de electrones entre los electrodos y, por lo tanto, de las reacciones redox (reducción y oxidación). En el ánodo, los iones negativos en la solución pueden perder electrones para formar especies neutras. Alternativamente, los átomos del electrodo pueden perder electrones y entrar en la solución como iones positivos. En cualquier caso, la reacción es una oxidación. En el

cátodo, los iones positivos en la solución pueden ganar electrones, formando especies neutras. Por ende, las reacciones catódicas son reducciones. [1] La Figura 3 representa una celda electrolítica:

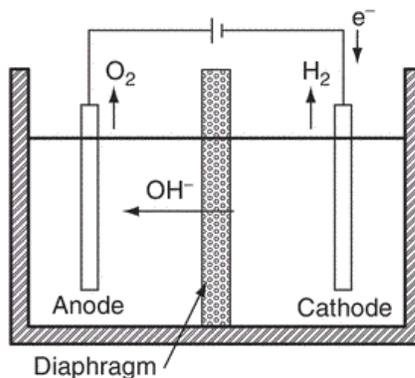


Figura 3 Electrólisis de agua en un electrolizador alcalino.

En la electrólisis del agua se produce hidrógeno y oxígeno en su estado gaseoso. Actualmente, este es un proceso maduro y eficiente. El hidrógeno y oxígeno son producidos por medio del cátodo y ánodo, respectivamente. Para mantener los gases separados se utiliza un diafragma conductor de iones. A continuación, se observan las ecuaciones químicas generales del proceso de electrólisis: [2]



Reacción en el ánodo:



Reacción en el cátodo:



En condiciones estándar, con presión de 1 atmósfera y a 25°C, el potencial de descomposición reversible es de 1.229V. Sin embargo, el total teórico del potencial de descomposición reversible es de 1.480 V, el cual corresponde a la entalpía del hidrógeno. El potencial real típicamente se encuentra entre 1.75 y 2.05V debido a la irreversibilidad y la resistencia interna, donde la eficiencia es de un 80% aproximadamente. [2]

Ahora bien, no es imposible imaginar la integración de energía renovable a este proceso para la generación de hidrógeno y oxígeno. La foto-electrólisis es un proceso híbrido que combina el proceso fotovoltaico para la generación de electricidad, generación fotoeléctrica, y el proceso de electrólisis. [3] La foto-electrólisis es descrita como una celda de combustible funcionando en reversa, y aunque todavía está bajo investigación es considerada como el “Santo Grial de la producción de hidrógeno”, según Kutz, pues convertiría luz solar en hidrógeno.[4] La Figura 4 representa esquemáticamente el proceso fotoeléctrico. En esta representación, la luz solar produce huecos de electrones en el semiconductor en contacto con la sustancia. Los electrones

se combinan con protones para producir hidrógeno en el electrodo contrario, mientras que los huecos oxidan el agua en oxígeno en el electrodo semiconductor. [6]

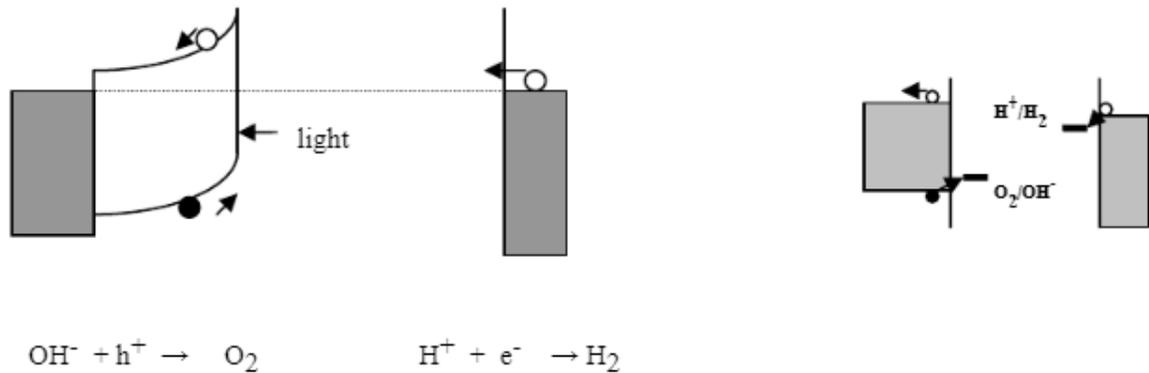


Figura 4 Representación del proceso de foto-electrólisis.

Para una celda de foto-electrólisis con semiconductores, existen tres procesos principales para su funcionamiento: la absorción de fotones de energía, la conversión de los fotones en carga eléctrica, y la utilización de la carga para la descomposición de la molécula  $\text{H}_2\text{O}$ . La eficiencia de la conversión de energía solar,  $\varphi_0$ , puede describirse como el producto de las eficiencias de la celda para cada uno de los tres procesos. [23]

$$\varphi_0 = \varphi_g \eta \varphi_c$$

Donde,  $\varphi_g$  es la eficiencia de irradiación solar y  $\varphi_c$  es la eficiencia química.  $\varphi_g$  se define como la fracción de la irradiación solar incidente con energía fotónica  $E \geq E_g$ , según:

El máximo valor para la eficiencia de irradiación solar corresponde a semiconductores con  $1.0 \leq E_g \leq 1.4$  eV.

El rendimiento interno,  $\eta$ , viene dado por:

$$\eta = \frac{N_E}{N_T}$$

Donde  $N_E$  es el número de fotones utilizado para la generación de pares, electrón-hueco, y  $N_T$  es el número total de fotones absorbidos. En el caso ideal en el que todos los fotones de energía sean utilizados,  $\eta=1$ . La relación de la eficiencia se puede evaluar con la cantidad de corriente que producirá la célula cuando se expone a la luz solar. La relación entre este valor de producción de energía y el valor más alto posible de producción de energía para la celda proporciona el valor de eficiencia de conversión de energía general de la celda.

La búsqueda de un proceso de foto-electrólisis eficiente, como se comentó previamente, aún sigue bajo investigación, donde uno de los mayores obstáculos es el encontrar un material semiconductor estable en agua y a un costo comercial.

## 2.3 Agua de Mar y sus Propiedades Corrosivas

El agua de mar es una solución de especie iónica, predominante en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , y contiene una cantidad variable de oxígeno y dióxido de carbono. El contenido de oxígeno es particularmente importante debido a que es el despolarizador de las reacciones anódicas corrosivas en el agua de mar. Su valor de pH es de  $8.2 \pm 0.1$  y es ligeramente alcalina. [7] La siguiente tabla muestra la composición de una muestra de agua de mar:

*Tabla 1 Composición química típica de una muestra de agua de mar, en la superficie de un océano abierto. Nota:  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , todos  $< 0.01$ .*

| Especies | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{HO}_3^-$ | $\text{Na}^+$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{K}^+$ |
|----------|---------------|--------------------|-----------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| Masa %   | 1.90          | 0.26               | 0.01            | 1.05          | 0.13             | 0.04             | 0.04         |

Se puede decir, entonces, que el agua de mar es una solución acuosa compuesta de sales y gases, que contiene material orgánico y vivo, así como partículas insolubles. En relación con procesos corrosivos, es importante conocer la siguiente información: [8]

- Las sales disueltas generan una baja resistividad, por lo que es un buen electrolito. La tasa de corrosión es determinada primordialmente por la tasa de procesos electroquímicos en la superficie del metal y la transportación activa en la fase de la solución (difusión/convección); cuando ocurra corrosión local, su tasa incrementará debido a la existencia de una mayor superficie disponible para la reacción anódica en el sitio de corrosión.
- El dióxido de carbono disuelto causa la formación de ácido carbónico, el cual es sometido a ionización resultando en iones de bicarbonato y carbonato. El resultado del sistema, más la presencia de ácido bórico, provee un pH constante y relativamente elevado.
- Debido a la alta concentración de pH y consecuentemente baja disponibilidad de iones de hidrógeno las especies principales, oxígeno disuelto es reducido en la superficie del metal; sin embargo, en grietas y otras áreas la concentración de oxígeno puede ser tan pequeña que otras especies en oxidación se pueden ver involucradas, por ejemplo, iones de hidrógeno y componentes bacteriológicos.
- La alta concentración clorídica incrementará la corrosión, por ejemplo, al incrementar la tasa de oxidación del metal o al provocar la descomposición de capas pasivas.
- Los componentes orgánicos generalmente serán perjudiciales en el incremento de la tasa de corrosión debido a sus propiedades complejantes.
- Compuestos de calcio y manganeso pueden verse involucrados en la formación de capas calcáreas las cuales pueden ser ventajosas si se pretende reducir la fuente de oxígeno en la superficie y, por ende, reduciendo la tasa de corrosión; estos compuestos pueden

ser también perjudiciales al reducir la tasa de intercambio de calor por deposición sobre la superficie metálica.

- Una alta cantidad de organismos biológicos tenderá a acumularse y crecer en las superficies expuestas; a parte del incremento en peso y resistencia al flujo de productos decadentes que pudieran producir componentes tales como amonio y compuestos de sulfuro, los cuales provocarían actividad corrosiva; debido a la oxidación bioquímica, la concentración de oxígeno en la superficie del metal puede resultar baja, dando pie a procesos bacteriológicos, por ejemplo, involucrando sulfatos reduciendo bacterias, lo cual puede incrementar el proceso de corrosión, aún en la ausencia de oxígeno disuelto.

La composición del agua de mar en los mares y océanos es notablemente constante con respecto a la mayoría de sus componentes. Sin embargo, se pueden presentar algunas desviaciones más notables en cuerpos que tengan una alta evaporación o aquellos que reciban una alta afluencia de agua dulce. Generalmente, los procesos corrosivos son influenciados por componentes menores y gases disueltos que tienden a fluctuar mucho más, particularmente en zonas costeras. La concentración de oxígeno, por ejemplo, depende de la temperatura y salinidad, pero también en procesos químicos como la fotosíntesis (producción de oxígeno) y la descomposición bioquímica (consumo de oxígeno). Como resultado, la concentración de oxígeno puede variar con la temperatura, profundidad y temporada en que es tomada la muestra. En sitios costeros la salinidad puede ser menor debido a la baja dilución con aguas dulces, contenidos orgánicos y materiales biológicos, así como el factor de contaminación debido a productos industriales y domésticos. Como resultado de estos factores, la corrosividad del agua de mar en aguas costeras puede variar con los compuestos de un agua limpia que pudiera obtenerse de aguas abiertas. [8]

## 2.4 Materiales Anticorrosivos

Como se revisó en los antecedentes, se han intentado diferentes combinaciones y aleaciones para la creación de electrodos resistentes a la corrosión a la que estos son sometidos durante el proceso de electrólisis y las propiedades corrosivas del agua de mar. Entre las diferentes composiciones se encuentran los siguientes materiales, de los cuales se comentará un resumen de sus comportamientos y degradación al ser sometidos al agua de mar: [9]

- Aleaciones de Cu – buena en general, bajo rendimiento con agua contaminada (sulfuro), tiene una mejor fatiga por corrosión que los aceros inoxidables
- Ti – altamente resistente, se puede agrietar o debilitar con el hidrógeno
- Bases de Ni – resistente, pero usualmente costoso para su uso
- Acero Suave / Hierro Fundido – depende del oxígeno

- Acero Inoxidable 300 – bueno con agua de mar fluyendo, tiende a agrietarse con el agua estancada
- Aceros Inoxidables Super-austeníticos – mejor resistencia en corrosión general y localizada, en comparación con los aceros inoxidables 300
- Aceros Inoxidables Ferríticos – mejor que los super-austeníticos, pero pueden ser difíciles de producir
- Aceros Inoxidables en general – previenen agrietamientos, necesitan oxígeno, propensos a la fatiga por corrosión, necesitan protección catódica

La corrosión de los metales en agua de mar depende de varios factores, incluyendo los siguientes:

[9]

- Temperatura. La tasa de corrosión incrementa con un aumento de temperatura, si ningún otro factor cambia. Sin embargo, esto pudiera resultar en una baja solubilidad del oxígeno, formando calcáreas. En estos casos una temperatura más alta podría reducir la corrosión.
- Oxígeno disuelto. Alto contenido de oxígeno incrementa la corrosión en aceros al carbono. A su vez, altos contenidos de oxígeno reducen la corrosión en aceros inoxidables y aluminios.
- Presión. El efecto del cambio de presión principalmente afecta a los gases disueltos. Por ejemplo, agua de mar está al vacío, su corrosividad es casi completamente reducida.
- Salinidad. Si esta incrementa, los ataques localizados incrementan. Bioincrustación y formaciones calcáreas son más prominentes.
- Sulfuros. Son producidos por bacterias reductoras de sulfato (SRB), por ejemplo, incremento en la corrosión de aceros, aleaciones de cobre, aceros inoxidables, y aluminio.
- Metales pesados. La presencia de iones de cobre causa picaduras en el aluminio.

En el proceso de foto-electrólisis uno de los electrodos está conformado por material semiconductor. El electrodo expuesto a la luz solar, llamado foto-electrodo, genera, en un estado ideal, suficiente energía eléctrica para causar las reacciones de evolución de oxígeno e hidrógeno respectivamente en las interfaces del foto-ánodo y el cátodo, dentro del electrolito. La Figura 5 presenta un ejemplo de esta reacción y el funcionamiento general del foto-electrodo en el proceso de foto-electrólisis. [11]

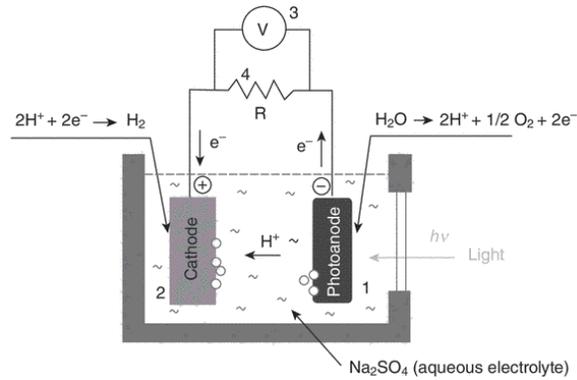


Figura 5 Diagrama esquemático la foto-electrólisis solar; (1) foto-electrodo; (2) contraelectrodo catódico; (3) voltímetro; y (4) resistencia de carga. [11]

Una de las condiciones necesarias para que funcione este proceso es que la banda de conducción del semiconductor debe estar más inclinada hacia una posición negativa. Por lo contrario, la banda de valencia debería ser más positiva que el potencial de oxidación. Debido a que la foto-electrólisis funciona a base de un solo foto-electrodo, no se requiere de un generador de energía. Por ende, una vez que los fotones sean absorbidos, se formaran fotoelectrones y foto-huecos. Termodinámicamente, el nivel de energía de la banda de conducción es una medida de la reducción de fuerza de los electrones en el semiconductor, mientras que la banda de valencia es una medida de la energía de oxidación de los huecos en el semiconductor. [11]

Para que un semiconductor funcione adecuadamente como foto-ánodos en la foto-electrólisis solar del agua debe contar con las siguientes propiedades: [11]

- Estabilidad química en la iluminación y oscuridad.
- Brecha energética de aproximadamente 2.0eV para absorber la máxima radiación solar.
- Escasez de recombinación de carga de electrones/huecos para prevenir la recombinación de los portadores de carga fotogenerada
- Posición adecuada de bandas con respecto a la reducción potencial de  $\text{H}^+/\text{H}_2$  y oxidación potencial de  $\text{O}_2/\text{O}^-$

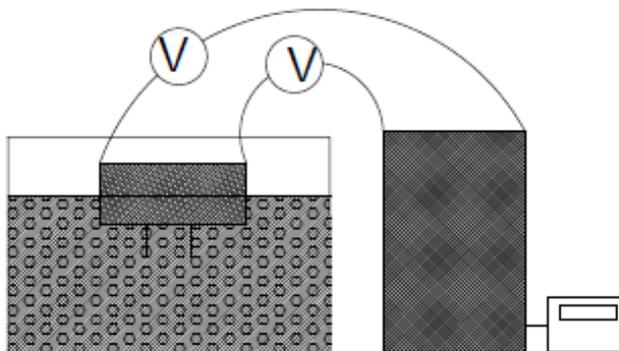
La protección catódica es uno de los métodos más comunes para mitigar la corrosión e involucra el cambiar el potencial del metal corrosivo al cargarlo con electrones. Existen dos métodos principales para llevar a cabo esta protección catódica: la técnica de impresión de corriente en la cual se conduce un voltaje directo; la técnica de sacrificio de ánodo usa la diferencia de potencial natural entre una estructura y un metal secundario en el mismo ambiente para proveer el voltaje conductor. [11]

## Capítulo 3. Metodología

En este apartado se muestran las técnicas y elementos utilizados para la generación del prototipo de una celda foto-electrolítica para su aplicación experimental en la electrólisis de agua de mar. Dicha celda fue construida a base de elementos tanto comerciales como de manufacturados utilizando la tecnología de impresión 3D. De igual manera, las herramientas de control y medición se constituyen de artículos disponibles en el mercado.

### 3.1 Esquema y Construcción General.

El principio general del prototipo consta de una celda electrolítica flotante en un tanque de 14.5L, y medidas de 24.74 x 36.8 x 22.2 cm. Dicha celda está conectada a la celda fotovoltaica a través de dos multímetros los cuales miden la corriente y voltaje utilizados en el sistema para lograr el proceso de foto-electrólisis. Adicionalmente, el tanque deberá estar equipado con el termómetro para confirmar la temperatura del agua. La salinidad del agua es medida con un hidrómetro, que a su vez es tabulado en conjunto con la temperatura y valores requeridos para la operación del proceso.

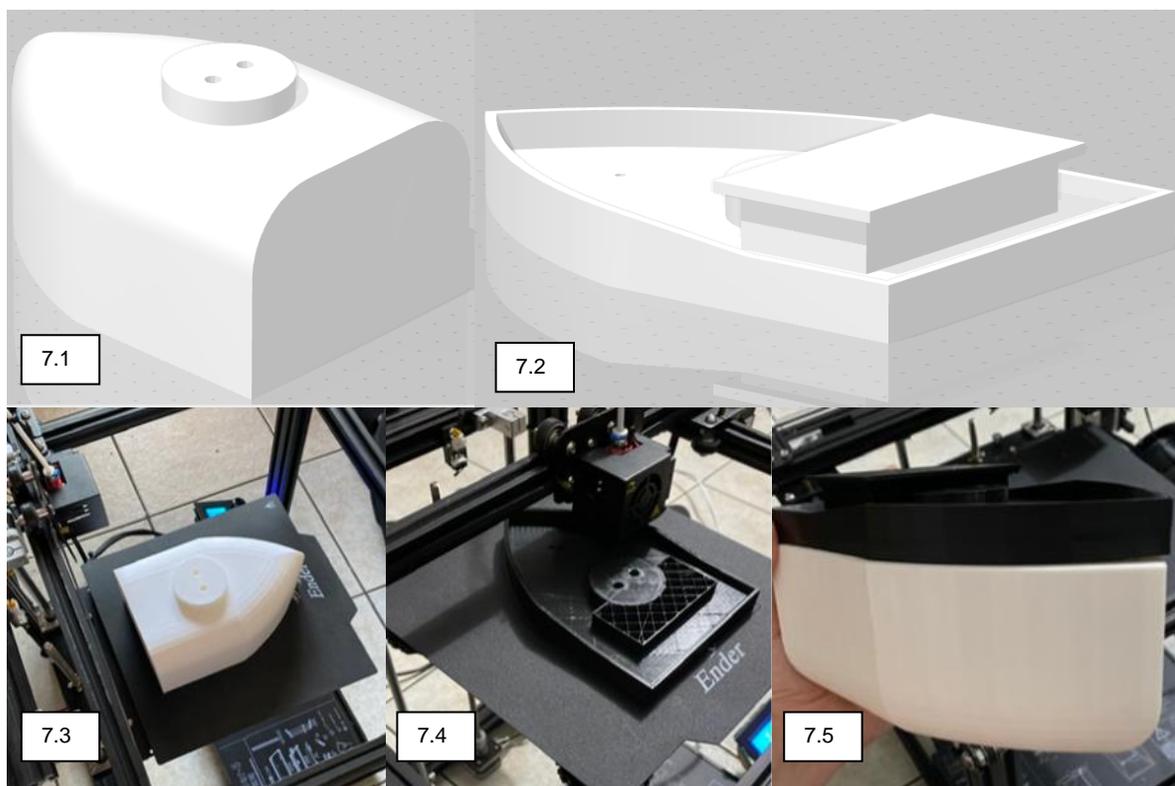


*Figura 6 Esquema general de ensamblaje de la celda foto-electrolítica. El esquema muestra las conexiones generales donde se tiene la celda flotando sobre la solución (agua de mar) conectada a través de dos multímetros hacia la celda fotovoltaica conectada finalmente al regulador.*

Para la generación de la celda se ideó una figura que pudiese mantenerse a flote en el agua, a esta se le dio la forma de un barco en cuya base se colocaron orificios para sostener los electrodos. Se utilizó Inventor AutoDesk Professional versión Estudiante 2020 para la generación del modelo y tecnología 3D para la fabricación del mismo. El modelo consta de cinco piezas fabricadas de PLA blanco y negro, constando de la base, la parte superior que funje como tapa, y tres pines de sujeción, cuya función es unir y desmontar la parte superior con la base, permitiendo así el intercambio de electrodos.

La parte inferior del barco tiene unas medidas generales de 120 x 180 x 90 mm, donde la parte frontal es triangular, simulando una proa, y forma un arco para unirse a la parte rectangular al resto del barco. La parte superior tiene medidas de 120 x 180 x 28 mm, donde comparte la forma

perpendicular de la parte inferior y en la orilla tiene una extrusión de 3 mm que simula la orilla del barco y en la extrusión para la inserción de las conexiones a los electrodos simula una cabina. De igual manera, en la proa de la parte superior tiene un orificio para insertar un banderín. En la parte interior de ambos modelos se tienen los espacios donde se deslizan las barras sujetadoras. Estas tienen forma trapezoidal y se extienden 20 mm.



*Figura 7 Modelado e Impresión de Estructura. 7.1 Modelado de estructura base (izquierda superior); 7.2 Modelado de estructura superior (derecha superior); 7.3 Impresión 3D de estructura base, con orificios de 6.5 mm para la inserción de electrodos (izquierda inferior); 7.4 Impresión 3D de estructura superior con orificios de 6.5 mm para la inserción de conexión a electrodos (medio inferior); 7.5 Ensamble de estructura general (derecha inferior).*

Los electrodos utilizados en el experimento difieren de la propuesta original, sin embargo, se mantienen los materiales principales, espuma níquel y recubrimientos a base de níquel. Se optó también por la utilización de lámina de acero 316SL electrolíquela para llevar a cabo una segunda ronda de experimentos. Los electrodos a base de espuma níquel fueron recubiertos con níquel electrolítico sulfurado y una segunda capa de níquel-zinc.

Para el desarrollo de los electrodos fue necesario cotizar con diversas platinadoras de la zona local en Tijuana. La espuma níquel está clasificada como un material superconductor y es utilizado usualmente para baterías. Se hicieron cinco pares de electrodos a base de espuma níquel, adquirida a través de Amazon México del manufacturero Yodaoke. Este fue adquirido en rollo con medidas de 1.5 x 250 x 500 mm, que fue dividido a lo largo para obtener piezas de 1.5 x 25 x 5 mm para su procesado.

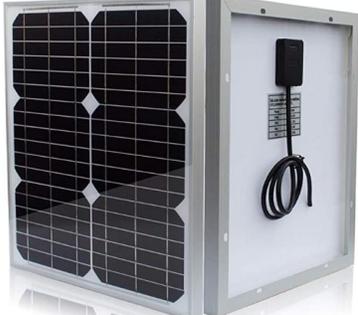
Los electrodos a base de acero 316SL están compuestos primordialmente de Fe (59.8-72%), Cr (16-19%), Ni (10-15%), y compuestos menores al 3% de Mn, Mo, Si, N, P, C, y S. Estos están electro niquelados para asistir en su corrosión, pues el bajo contenido de carbón en este material (0.03%) lo hace susceptible a corrosión intergranular.



Figura 8 Electrodo. 8.1 Materia prima para manufactura de electrodos a base de espuma níquel (izquierda). 8.2 Electrodo a base de espuma níquel, recubiertos de níquel electrolítico y níquel-zinc (medio); 8.3 Electrodo de acero 316SL electrolítico.

La celda utilizada en el prototipo fue adquirida en Amazon México modelo TP-solar Solar Panel Kit 20W/12V, la cual incluye un control de carga y extensiones para su conexión. La tabla 2 muestra las especificaciones técnicas de dichos equipos, obtenidos a través del sitio web.

Tabla 2 Especificaciones Técnicas de la Celda Fotovoltaica.

| Imagen del Artículo   | Descripción  | Especificaciones Técnicas   |
|---|--|---|
|  | Celda Soldar Monocristalina con Vidrio Templado Reforzado y Estructura de Aluminio | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Capacidad Máxima: 20W</li> <li>2. Máximo Voltaje: 1000V DC</li> <li>3. Voltaje Operacional Optimo (Vmp): 18V</li> <li>4. Corriente Operacional Optima (Imp): 1.11A</li> <li>5. Peso: 4.8lbs</li> <li>6. Dimensiones: 18.9 x 13.4 x 0.7 in</li> </ol>  |
|  | Control de Carga con Modo de Carga PWM y Pantalla LCD                              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corriente de Descarga: 10A</li> <li>2. Voltaje de Batería: 12V/24V</li> <li>3. 2 salidas de Voltaje USB: 5V/2.5A</li> <li>4. Valores de Entrada: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Batería 12V-23V</li> <li>o Batería de 24V-46V</li> <li>o 100W /12V</li> <li>o 200W/24V</li> </ul> </li> </ol> |

Los equipos de medición utilizados para el desarrollo de este prototipo se muestran en la figura 9 e incluyen 3 multímetros, de los cuales 2 fueron conectados al cátodo y ánodo de la celda fotoelectrolítica, un tercer multímetro de gancho, amperímetro, es utilizado para la validación y

registro de las lecturas. Para el control de salinidad y temperatura del tanque se utiliza un hidrómetro y un termómetro de cristal. La compra de estos artículos se realizó en tiendas locales: los multímetros fueron adquiridos en Steren México, mientras que el hidrómetro y termómetro fueron comprados en Petco México.



Figura 9 Equipos de medición utilizados para la verificación de parámetros de corriente y voltaje (9.1 lado izquierdo). Herramientas de medición para salinidad (9.2) y temperatura (9.3) del agua (derecha).

El hidrómetro tiene una exactitud de  $\pm 0.001$  y mide la salinidad del agua por medio de partes por trillón (PPT) o gravedad específica. Las mediciones de temperatura se llevarán a cabo en Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) y serán validadas con el amperímetro.

Adicional a estas mediciones se tomaron las medidas de la calidad del agua por medio de tiras de papel de prueba adquiridas de manera comercial en Amazon México y Petco México. Se utilizaron dos juegos diferentes de manera que se puedan medir diferentes valores y finalmente confirmar sus resultados. Para la lectura e interpretación de estos valores se debe consultar el patrón proveído por el manufacturero, posteriormente se comparan los resultados entre sí.

### 3.2 Conexión y Funcionamiento

La conexión de la celda consiste en la conexión de la celda fotovoltaica a un regulador, representado en el siguiente esquema, el cual está conectado a dos multímetros, donde se están tomando mediciones de corriente y voltaje. A través de estos se tiene la conexión a los electrodos. Las conexiones se llevaron a cabo con la utilización de caimanes de manera que se pudieran desmontar los diferentes juegos de electrodos, como se observa en la figura 10.

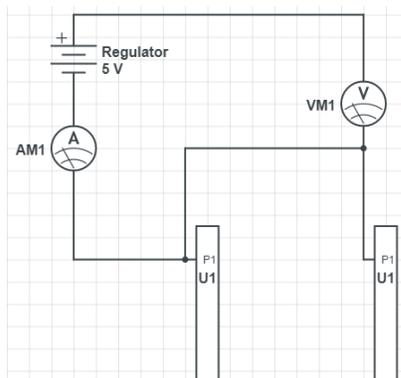


Figura 10 Diagrama del circuito eléctrico para el funcionamiento de la celda foto-electrolítica.

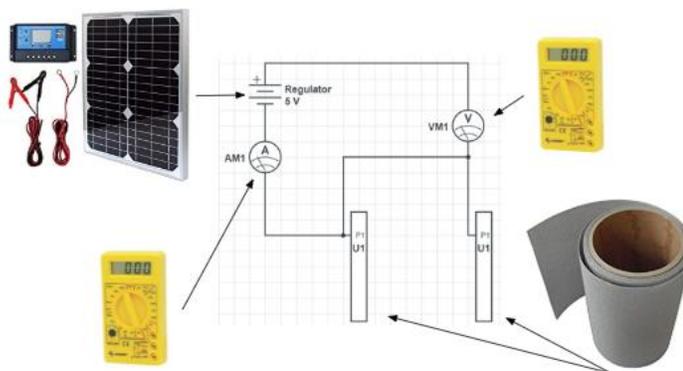


Figura 11 Circuito eléctrico ilustrado con los componentes representativos.

El ensamble de los electrodos con el circuito es a través del barco, donde los electrodos y su conexión a la fuente quedan dentro del barco, y solo se permite la salida de la parte inferior de los mismos, de manera que se pueda validar que la electrólisis este llevándose a cabo.

Con la conexión de la celda foto-electrolítica solo se coloca el barco en el cuerpo de agua. En este caso, el tanque que se está utilizando es de 14.5L, de los cuales cada muestra tomada fue de 20L. El experimento se lleva a cabo con 8-10L de manera que se puedan realizar repeticiones de ser necesario.

Como se vio en la Figura 6, el barco queda a flote, con solo la parte inferior lo suficientemente sumergida de manera que los electrodos queden completamente bajo el agua. El barco se probó inicialmente a flote en una cubeta de agua doméstica de menor capacidad, para confirmar que en un mayor cuerpo de agua este se mantendría a flote y no se volcaría sobre sus ejes.

### 3.3 Experimento y Medición

Para llevar a cabo el experimento fue necesario la recolección de agua en tres puntos de la región de Baja California Norte. Los puntos seleccionados para el proyecto fueron: La Misión, en playas de Rosarito; Ejido Valle Tranquilo, en playas de Ensenada, y en la Bahía de Los Ángeles, en Ensenada del lado del Golfo de California. La finalidad de esta selección fue tomar diferentes puntos de referencia distanciados uno del otro y que difirieran en su popularidad, habitación, y turismo.

En la toma de estas muestras se llevó a cabo la medición de salinidad del agua por medio del hidrómetro, tomando las lecturas por ambas partes por trillón (PPT) y de gravedad específica. El método para este proceso consistió en adentrarse aproximadamente 10-15 metros hacia el mar de manera que se obtuviera la menor cantidad de arena o suciedad en la medición. Una vez en posición se sumerge el hidrómetro y se extrae del agua. Este contiene una pluma que se mueve hasta llegar a un nivel fijo que es donde se toma la lectura. El dispositivo debe colocarse en posición fija, para lo cual se utilizó un nivel, y la lectura tomarse a nivel del ojo.

Se llevo también a cabo la toma de temperatura del agua y del ambiente donde se adquirió la muestra. Para esto, el termómetro se adhirió al hidrómetro, de manera que se pudieran tomar tantas muestras y lecturas juntas a la vez. Este método impediría la influencia del calor humano sobre la medición. Para el ambiente el termómetro se dejó al exterior en tres tiempos, previo a comenzar las mediciones del agua, un momento durante las mediciones, y al final de las mismas. Puesto a que el experimento sería llevado a cabo en Tijuana las horas de medición también variaron en los diferentes puntos. Es decir, se realizaron las mediciones en un rango de entre 60-80° F, de manera que las mediciones a medio ambiente se asimilaran a las temperaturas que se tienen en la ciudad, teniendo así una comparación en aproximadamente las mismas condiciones. Para todas las mediciones se tomaron treinta repeticiones para analizar, las cuales serán comparadas contra las mediciones de los mismos valores una vez ejecutado el experimento, de manera que se pueda analizar la variación entre las diferentes aguas y su afectación durante el proceso de foto-electrólisis. Esto permitió analizar la mejor opción para llevar a cabo este proceso. Para la medición del circuito y su desempeño se lleva a cabo con su construcción en sí. El primer filtro es a través de la pantalla LCD del regulador conectado a la celda fotovoltaica. Los multímetros conectados actúan como un segundo filtro ya que están midiendo tanto amperaje como voltaje del circuito. Estas conexiones se llevaron a cabo de tal manera que se pueda validar la información que se muestra en el regulador. Como último filtro se utiliza un multímetro de gancho de mayor precisión que se estará colocando en diferentes puntos del circuito de manera. La Figura 12 muestra los puntos seleccionados para esta última medición.

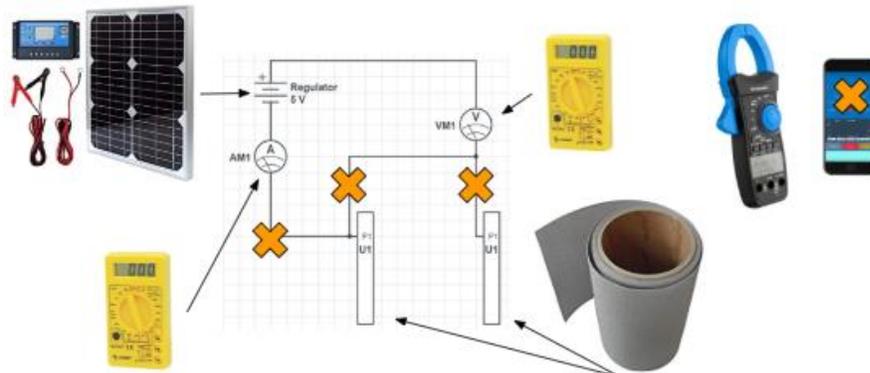


Figura 12 Circuito eléctrico con componentes representativos, se denotan los puntos de validación con el multímetro de gancho.

### 3.4 Ensamble de Impresión

Tras la impresión del barco modelo, este es inspeccionado para validar su calidad y funcionamiento durante el ensamble. Para ello se realiza una inspección visual de las seis caras del prototipo. Las figuras 13 a 21 muestran el detalle de la impresión.

En la figura 13 izquierda se aprecia un ligero defecto de textura en la parte interior del barco, el cual no implica ninguna falla en el funcionamiento de este, solo un defecto visual.

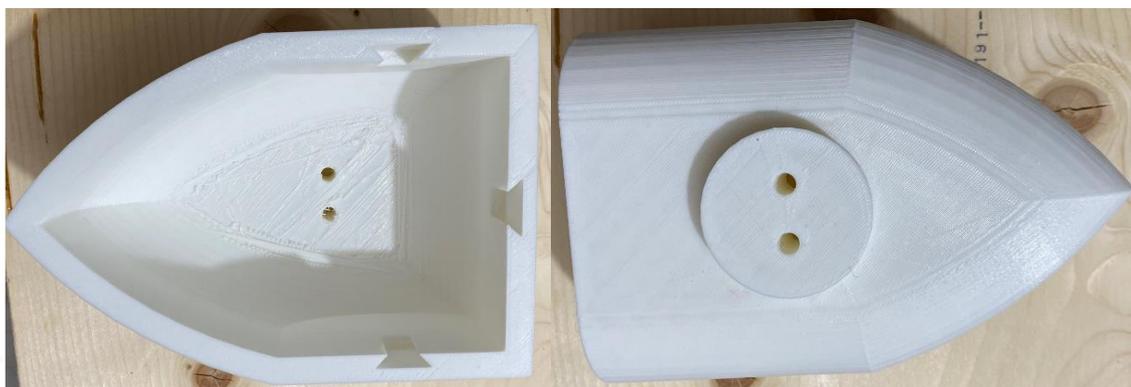


Figura 13 Vista superior (izquierda) e inferior (derecha) de la base del barco.



Figura 14 Vistas lateral del barco.



Figura 15 Vista frontal (izquierda) y trasera (derecha) de la base del barco.

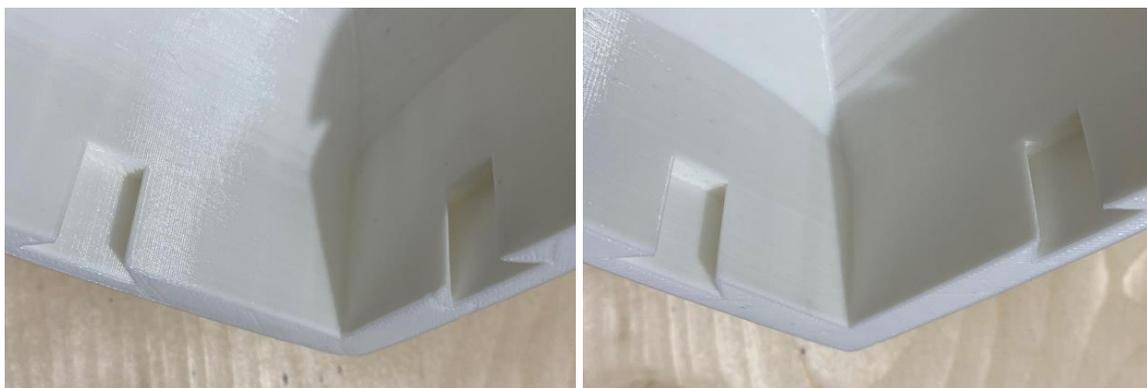
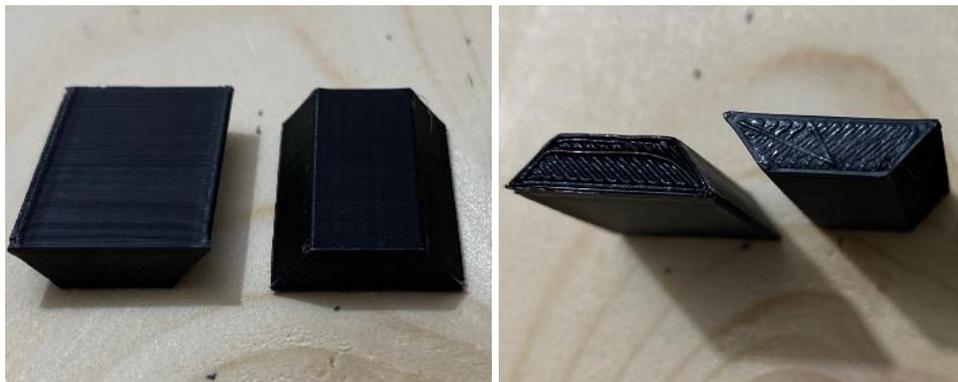


Figura 16 Vista interior del barco. Se muestran los espacios para insertar las barras de ensamble.

Las barras de ensamble fueron diseñadas acorde al diseño y dimensiones del modelo 3D, sin embargo, durante la prueba funcional estas no pudieron insertarse con facilidad. Se rediseñan las barras en base a las dimensiones obtenidas de la base inferior del barco.



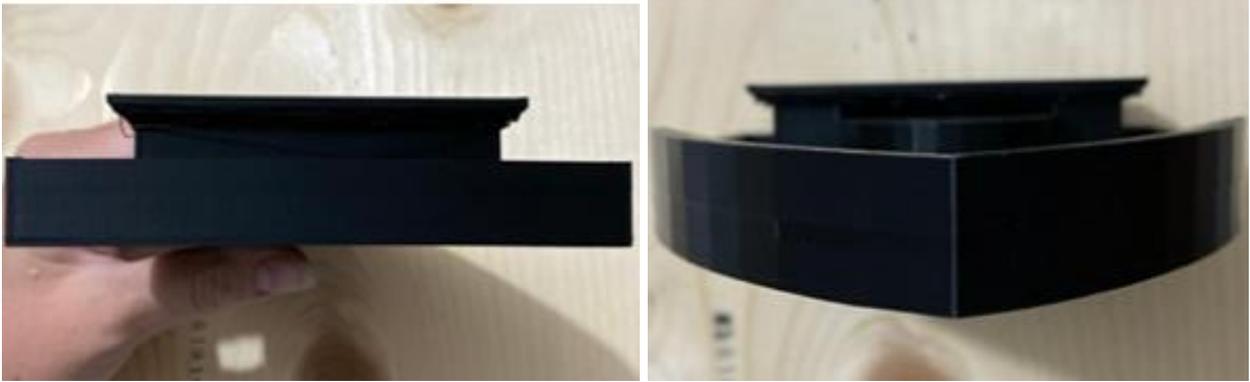
*Figura 17 Vistas laterales (izquierda) y superior e inferior (derecha) de barras de ensamble.*



*Figura 18 Vistas superior (izquierda) e inferior (derecha) de la parte superior del barco.*



*Figura 19 Vista lateral de la parte superior del barco.*



*Figura 20 Parte trasera (izquierda) e frontal (derecha) de la parte superior del barco.*



*Figura 21 Vista de los tres espacios de ensamble de la parte superior del barco.*

Corregido el defecto encontrado en las barras de ensamble, se procede a realizar una nueva impresión de las mismas, las cuales serán probadas de manera funcional. La figura 22 muestra el ensamble de las barras en la base inferior del barco, mientras que la figura 23 muestra el ensamble de las cinco piezas.

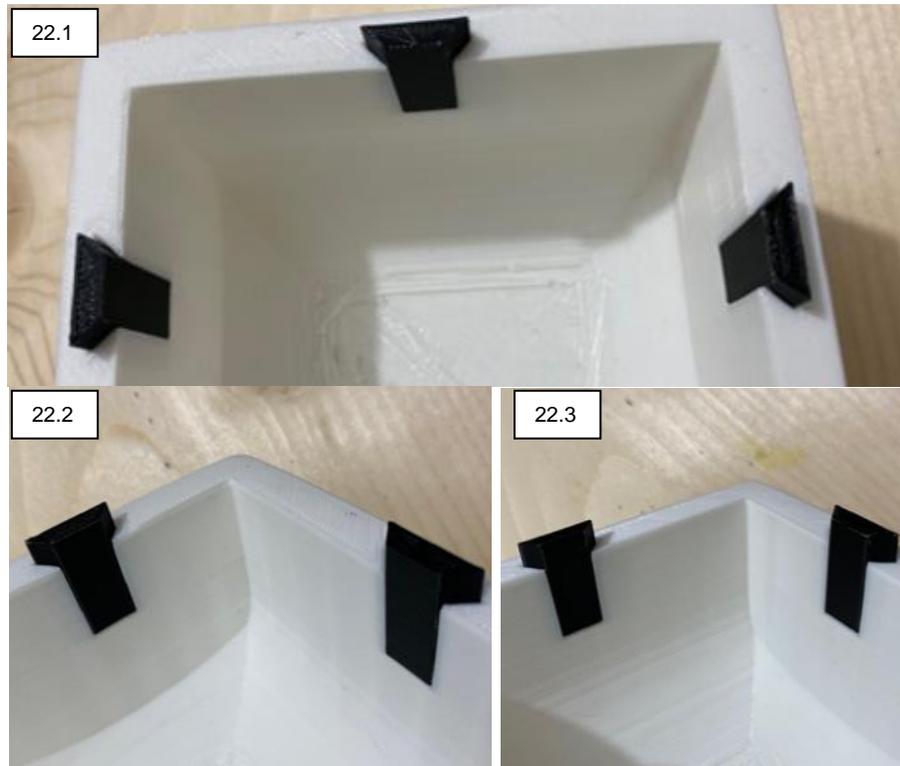


Figura 22 Ensamble de barras de unión. 22.1 Vista superior (superior). 22.2 y 22.3 Vistas esquinadas con barras de ensamble en la parte inferior del barco.

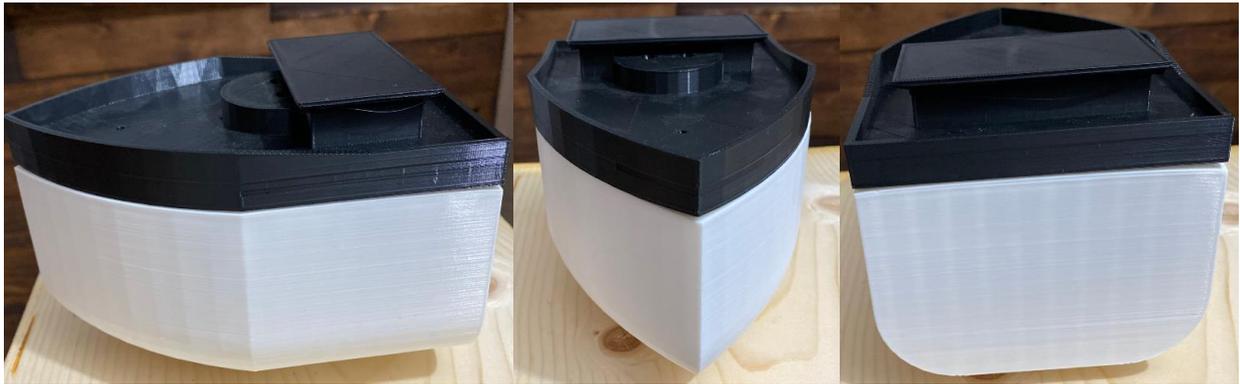


Figura 23 Modo de ensamble de barco. Consiste en conectar los espacios de inserción entre ambas partes con las barras de ensamble.

Una vez que el modelo fue ensamblado se encuentran algunos defectos de formado en las piezas superior e inferior del ensamble. La figura 24 muestra los defectos de deformación debido a encogimiento de las esquinas durante el enfriado. Se asume que este defecto visual no impacta el ensamble o funcionamiento de la célula. La figura 25 muestra las vistas laterales, frontal, y trasera del barco. Los defectos de deformación no son apreciables desde este ángulo.



*Figura 24 Defectos de deformación en las esquinas de la base y parte superior del barco. Se muestran las tres esquinas del mismo mostrando la deformación.*



*Figura 25 Vista de 3 ángulos de ensamble (lateral, frontal y trasera)..*

Finalmente, se debe comprobar la capacidad del barco para mantenerse a flote, para lo cual es probado en una cubeta de agua de llave con un volumen menor al cual el barco será sometido para la realización del experimento. En este caso se utiliza un recipiente de 34.6 x 21 x 12.4 cm y con una capacidad de 5.7 L. Para la prueba de flote se utiliza una cantidad de 2 litros. La figura 26 muestra el proceso llevado a cabo para la prueba de flote, donde primero se ingresa el ensamble completo y se mueve de un lado a otro para demostrar que este no se volteará. Después, se debe verificar que el bote se sumerja lo suficiente para ingresar los electrodos al agua, sin ingreso de agua por medio de los agujeros de la parte inferior y las deformaciones que causan aperturas entre la base y parte superior del barco. Se muestra una vista lateral donde se aprecia que el barco solo se sumerge a partir de la curvatura. De igual manera, se remueve la parte superior de manera que se pueda validar que el ensamble no tuvo ingreso de agua. El ingreso de agua se valida de manera visual y táctil no hubo ingreso de agua.

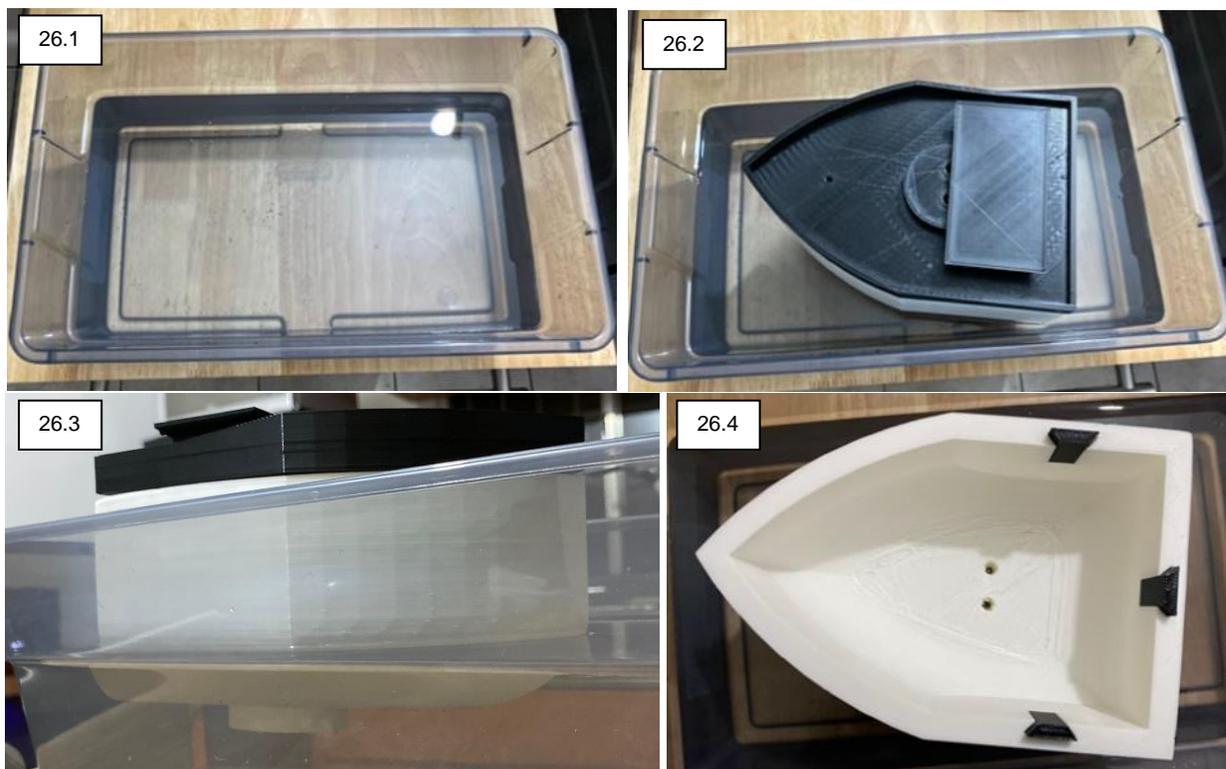


Figura 26 Prueba de modelo en un recipiente de agua de 2 Litros. 26.1 Recipiente de agua para prueba de modelo (izquierda superior); 26.2 Vista superior de barco ensamblado flotando en recipiente (derecha superior); 26.3 Vista lateral de barco flotando en recipiente comprobando el no ingreso de agua (izquierda inferior); 26.4 Vista superior de base del barco demostrando el no ingreso de agua (derecha inferior).

Finalmente, los electrodos se cortan a partir de un rollo de níquel espuma, debido a la flexibilidad del material las medidas no son exactas y estos toman una forma con curvaturas debido a su previo estado de empaque. Las figuras 27.1 y 27.2 representan el material cortado previo y posterior al proceso de níquel electrolítico. Los electrodos mantienen sus propiedades flexibles y debido a que el tratamiento en micras, este no sufre un cambio dimensional, solo se logra distinguir el cambio en su coloración, la cual adquiere un tono más brillante y azulado a comparación del gris opaco original.



Figura 27.1 Níquel espuma cortado del rollo con medidas de 1.5 x 5 x 25 mm, aproximadamente debido a consistencia del material (izquierda). 27.2 Electrodo con variación en la coloración posterior al tratamiento de níquel electrolítico (derecha).

### 3.5 Ensamble Operacional

Previo a ensamblar la celda foto-electrolítica se prueba la celda solar para validar su funcionamiento y proceder a hacer las conexiones necesarias. Para ello se pone la celda al sol, recargada sobre una superficie. Para las conexiones se utilizan los accesorios originales y jumpers genéricos del mercado. Se conecta la celda a al regulador, como se aprecia en la figura 27, se obtiene un voltaje ligeramente variable entre los 13 y 17V.



Figura 28 Celda fotovoltaica en operación conectada a regulador (izquierda) y acercamiento al regulador operando (derecha).

Rectificando las mediciones, se procede al ensamble del prototipo.

Se procede a conectar el regulador directamente a los electrodos utilizando jumpers y caimanes genéricos. El regulador tiene tres puertos, de los cuales uno pertenece a la entrada y dos de salida, una para la batería y otra para el dispositivo a encender. En este caso los electrodos estarían actuando tanto como la batería como el dispositivo, se apaga la salida del dispositivo y conecta directamente al puerto de la batería. Para esta corrida inicial solo se utilizan 3 litros de agua de una muestra al azar, los cuales no fueron caracterizados. La figura 28 muestra el acercamiento al regulador ya conectado.



Figura 29 Regulador de celda fotovoltaica con caída de voltaje al ser conectado a los electrodos. Estos comienzan a operar con un voltaje de 3V.

Conectados los electrodos se observa como el proceso de electrólisis comienza a fluir.



Figura 30 Electrodo en proceso de electrólisis a un voltaje de 3V.



Figura 31 Componentes de la celda foto-electrolítica.

## Capítulo 4. Resultados

El presente proyecto tuvo como objetivo el desarrollo del prototipo de una celda foto-electrolítica para agua de mar. En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología para el desarrollo y métodos de medición previamente definida en el Capítulo 3. Estos resultados pretenden evidenciar las variables de cada uno de los factores que afectan directamente el funcionamiento del prototipo.

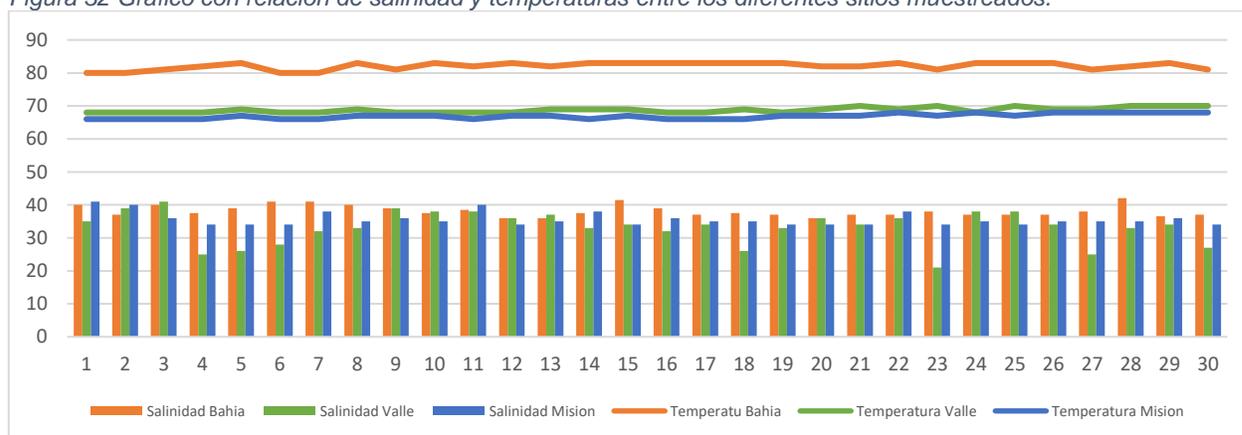
### 4.2 Salinidad & Temperatura del Agua.

El principio general del prototipo consta de una celda electrolítica flotante en un tanque de 14.5L, y medidas de 24.74 x 36.8 x 22.2 cm. Dicha celda está conectada a la celda fotovoltaica a través de dos multímetros los cuales miden la corriente y voltaje utilizados en el sistema para lograr el proceso de foto-electrólisis. Adicionalmente, el tanque deberá estar equipado con un termómetro para confirmar la temperatura del agua. Uno de los factores resultantes de este proceso de foto-electrólisis es la corrosión de los electrodos, la cual es directamente influenciada por la salinidad y temperatura ambiente de operación. Para realizar estas mediciones se captura la salinidad del agua es medida con un hidrómetro, que a su vez es tabulado en conjunto con la temperatura y valores requeridos para la operación del proceso.

#### 4.2.1 Resultados de Mediciones de Salinidad y Temperatura

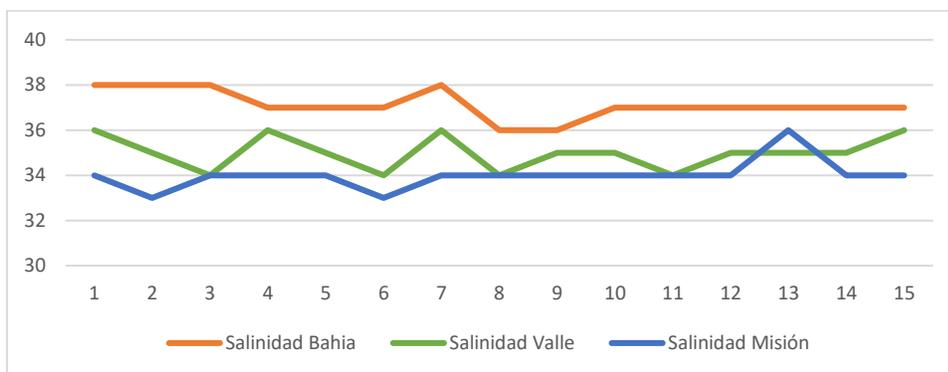
A continuación, la Figura 32 presenta los resultados de las mediciones de salinidad en partes por mil (ppt), salinidad por gravedad específica y temperatura en Fahrenheit (°F) en las tres muestras de agua tomadas. Las tablas 3 a 5 muestran los resultados de las mediciones tomadas en sitio. Se toman también treinta mediciones de las muestras previo a ser sometidas a prueba, estos resultados se muestran en las tablas 6 a 8.

Figura 32 Gráfico con relación de salinidad y temperaturas entre los diferentes sitios muestreados.



La Figura 33 muestra los resultados de las mediciones de salinidad tomadas previa al experimento. Estas mediciones fueron tomadas en la ciudad de Tijuana, Baja California, donde fue llevado a cabo el experimento de la celda foto-electrolítica.

Figura 33 Gráfico de resultados de mediciones de salinidad de las muestras, tomadas en Tijuana, BC. previo al experimento.



Para complementar los datos de salinidad de las muestras se toman también los datos de acidez con papel de prueba con un rango de pH de 1-14. La Figura 34 muestra la comparativa de acidez entre las diferentes muestras con el patrón estándar incluido por el proveedor. La primera muestra en la izquierda, de Bahía, de la Figura 34 muestra un poco más de claridad en comparación con el resto de las muestras, sin embargo, se consideran consistentes con un pH 8 ya que el patrón de color no logra escalar al siguiente nivel.



Figura 34 Muestras de pH con papel de prueba comparado contra patrón estándar. Las muestras se encuentran consistentes.

De igual manera se toman los datos del contenido de nitrato, nitrito, alcalinos, y pH. Las Figuras 35 a 37 muestran los resultados obtenidos en las diferentes muestras de agua probadas, los valores se ven reflejados en la Tabla 3. Estos datos fueron obtenidos al compararlos con la Figura 50, encontrada en los Anexos.

Tabla 3 Resultados de prueba de calidad del agua.

| Muestra | Nitrato (mg/L) | Nitrito (mg/L) | Alcalinos (KN) ppm | pH  |
|---------|----------------|----------------|--------------------|-----|
| Bahía   | 0              | 1.0            | 350                | 8.4 |
| Valle   | 20             | 3.0            | 350                | 7.4 |
| Misión  | 0              | 0              | 80                 | 7.4 |



*Figura 35 Prueba de calidad de agua en la muestra de Bahía.*



*Figura 36 Prueba de calidad de agua en la muestra de Valle.*



*Figura 37 Prueba de calidad de agua en la muestra de Misión.*

### **4.3 Operación del Prototipo.**

Los resultados de este experimento difieren del objetivo inicial ya que durante las diferentes pruebas que se realizaron durante este proyecto el ánodo tuvo que ser sacrificado, pues este no duró más de la hora en funcionamiento. El material fue reemplazado por los juegos previamente mencionados de Acero 316SL recubiertos con níquel electrolítico. Por ende, los resultados a continuación no son los ideales para confirmar o descartar la hipótesis propuesta.

### 4.3.2 Eficiencia del Prototipo

Durante las pruebas del experimento se monitoreo el voltaje y corriente de operación, dentro de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4 Resumen de datos de corriente y voltaje tomados durante el experimento.

| Muestra | Voltaje Celda Foto <sub>v</sub> (V) | Rango de Voltaje (v) | Rango de Corriente (A) |
|---------|-------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Bahía   | 19.2                                | 1.517-2.023          | 0.09-0.21              |
| Valle   | 18.0-20.0                           | 1.181-3.219          | 0.02-0.56              |
| Misión  | 16.98-18.0                          | 1.613-2.989          | 0.10-0.33              |

Para el cálculo de la eficiencia de la celda fotovoltaica se considera la capacidad máxima de la misma ( $V_T$ ) contra el voltaje medido ( $V_{in}$ ), mostrado en la tabla 4.

$$\eta = V_{in}/V_T$$

Utilizando el valor más bajo y el más alto, puesto a que el sitio no fue una variable para esta medición de voltaje, se obtiene un rango de eficiencia de entre un 70.75-83.33%.

Utilizando la misma fórmula de eficiencia se valida la eficiencia de voltaje para analizar las pérdidas entre la conexión de la celda al regulador y la conexión del regulador a los electrodos. Se distingue inmediatamente una pérdida constante de 2V, es decir, conforme se fue reduciendo el voltaje por medio del regulador, la pérdida comparando el voltaje de entrada y operacional se mantenía. Se obtiene una eficiencia de 54.7-72.5%.

Con respecto a la celda foto-electrolítica, se considera un sobrepotencial de 1.23V, a 25°C, como el valor nominal para la descomposición del agua [24]. Para calcular la eficiencia del voltaje se considera la siguiente fórmula, descartando el factor de temperatura y asumiendo un estado ideal [25]:

$$\text{Eficiencia de Voltaje} = \frac{\text{Voltaje Tensión Térmica Neutra (E)}}{\text{Voltaje Operacional de la Celda (V)}}$$

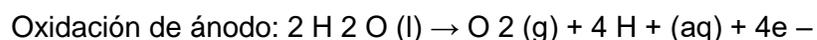
Aplicando la fórmula utilizando los rangos mínimos de operación se obtiene una eficiencia de voltaje del 81.08-101.14%. Utilizando los valores máximos, se obtiene una eficiencia de voltaje de 38.21-49.43%.

### 4.3.3 Producto

En el agua el cátodo es cargado negativamente, una reducción de la reacción se lleva a cabo, con los electrones ( $e^-$ ) desde el cátodo está dando a los cationes de hidrógeno para formar gas hidrógeno (la semirreacción balanceada con ácido):



En el ánodo cargado positivamente, una oxidación produce la reacción, la generación de gases de oxígeno y dando electrones hacia el ánodo para completar el circuito:



En el caso de los tres experimentos no se logró la OER en el ánodo por lo cual este se cedió a la oxidación y fue sacrificado para continuar con el experimento y la toma de datos.

Entre otra de las observaciones, al utilizar el ensamble completo este comenzó a hundirse ya que dentro de el se comenzó a formar agua. Este fue el indicador de que el proceso de electrólisis para la obtención de hidrógeno había sido exitoso. Para continuar con el experimento se dejó de utilizar la cubierta del bote.

Para comprobar la presencia de hidrógeno se utiliza un tubo, tapado, conectado al ánodo para recolectar una muestra de gas resultante y hacer la reacción inversa a la electrólisis del agua: la síntesis del agua. Se destapa el extremo expuesto del tubo que contiene el gas y se acerca una chispa de una flama. Lo que se espera es que el hidrógeno reaccione ante su exposición con el oxígeno del aire, para lo cual se produce un estallido peculiar.

#### 4.3.4 Agua Residual

Tras el sacrificio del ánodo a la oxidación, el material resulto en contaminación del agua con óxido de níquel. Los resultados de contaminación y oxidación fueron variantes entre las diferentes pruebas, como se aprecia en las imágenes 38 a 40.



Figura 38 Agua residual tras el proceso de electrólisis con la muestra de Bahía.

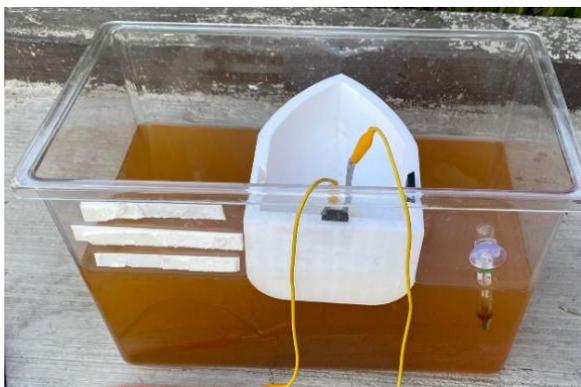


Figura 39 Agua residual tras el proceso de electrólisis con la muestra de Valle.



Figura 40 Agua residual tras el proceso de electrólisis con la muestra de Misión.

En las tres muestras se aprecia la contaminación del agua con un residuo que logra sentarse al fondo de la pecera el dejarse descansar por la noche. En el caso de la última muestra este residuo incremento formando un sedimento sobre el piso del recipiente.

#### 4.4 Medición de Desgaste.

El desgaste de los electrodos no fue uniforme a lo largo de las pruebas, para medición del desgaste se midieron los diferentes juegos de electrodos, ya que el cambio en peso fue despreciable.

Tabla 5 Datos de peso y grosor iniciales de los diferentes juegos de electrodos.

| Muestra | Ni-Espuma (mm <sub>in</sub> ) | A-316SL (mm <sub>in</sub> ) | Ni-Espuma (mm <sub>out</sub> ) | A-316SL (mm <sub>out</sub> ) |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Bahía   | 5.43                          | 5.91                        | 6.23                           | 5.49                         |
| Valle   | 5.50                          | 4.81                        | 5.54                           | 4.79                         |
| Misión  | 5.65                          | 5.42                        | 6.07                           | 2.86-3.88                    |

Las Figuras 41 a 43 muestra las condiciones resultantes de los diferentes juegos de electrodos, se observa una clara diferencia entre los diferentes electrodos, donde las peores condiciones se pueden observar en la muestra de Misión.



Figura 41 Imagen tomada con microscopio para visualizar la calidad resultante de los electrodos en la muestra de Bahía, acero (izquierda) y Ni-espuma (derecha).



Figura 42 Imagen tomada con microscopio para visualizar la calidad resultante de los electrodos en la muestra de Valle, acero (izquierda) y Ni-espuma (derecha).



Figura 43 Imagen tomada con microscopio para visualizar la calidad resultante de los electrodos en la muestra de Misión, acero (izquierda) y Ni-espuma (derecha).

## Capítulo 5. Discusión

Para comprobar que ambos gases son realmente esos gasees que se supone forman el agua, el método tradicional es este:

En el tubo conectado en el electrodo del polo positivo se recoge oxígeno. Para comprobarlo podemos acercar la ascua de un palillo plano. Veremos como el oxígeno aviva la llama e incluso a veces se vuelve a encender. En el tubo conectado en el electrodo del polo negativo se recoge hidrógeno. Para comprobarlo proponemos hacer la reacción inversa a la electrólisis del agua: la síntesis del agua. Se abre la llave del tubo que contiene el hidrogeno y se recoge con un tubo de ensayo invertido. Se acerca una chispa de un mechero de mano (energía de activación) y el hidrógeno reacciona con el oxígeno del aire produciendo un estallido peculiar

### 5.1 Análisis de Muestras de Agua.

En esta sección se realizará el análisis y comparativa de las muestras de agua tomadas para discutir su afectación en la operación y productos resultantes del prototipo.

#### 5.1.1 Muestras Tomadas en Sitio

Con los resultados obtenidos en la sección 4.2.1 se definen las medianas y promedios de los datos, las Tablas 6 a 8 muestran los resultados obtenidos de este análisis.

*Tabla 6 Análisis de resultados de mediciones de salinidad y temperatura en Bahía de los Ángeles, Ensenada, BC.*

|                 | Salinidad (PPT) | Salinidad (SG) | Temperatura (°F) |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| <b>Mediana</b>  | 37.5            | 1.028          | 82.5             |
| <b>Promedio</b> | 38.15           | 1.028          | 82.07            |

*Tabla 7 Análisis de resultados de mediciones de salinidad y temperatura en Valle Tranquilo, Ensenada, BC.*

|                 | Salinidad (PPT) | Salinidad (SG) | Temperatura (°F) |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| <b>Mediana</b>  | 34              | 1.025          | 69               |
| <b>Promedio</b> | 33.17           | 1.025          | 68.73            |

*Tabla 8 Análisis de resultados de mediciones de salinidad y temperatura en La Misión, Ensenada, BC.*

|                 | Salinidad (PPT) | Salinidad (SG) | Temperatura (°F) |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| <b>Mediana</b>  | 35              | 1.026          | 67               |
| <b>Promedio</b> | 35.6            | 1.026          | 66.87            |

Con esta información se hacen las siguientes deducciones:

- Bahía de los Ángeles presenta una mayor salinidad, con las temperaturas más altas.
- Valle Tranquilo presenta la menor salinidad, con temperaturas medias.
- La Misión presenta una salinidad media, con las temperaturas más bajas.

Haciendo referencia a la sección 2.3 de este documento, se consideran diferentes factores para la concentración de oxígeno en aguas costeras, tales como la temperatura y salinidad, procesos químicos, descomposición bioquímica, profundidad y temporada en que es tomada la muestra. Para añadir un factor adicional al análisis de datos proporcionado por las mediciones obtenidas, se toman los datos poblacionales del censo de la INEGI 2010, obtenidos a través de una requisición particular. Se utilizan los datos de la tabla 9 para realizar las siguientes deducciones:

- Bahía de los Ángeles, una zona pesquera, presenta una cantidad poblacional media, con la salinidad y temperaturas más altas.
- Valle Tranquilo, un ejido habitacional, cuenta con la menor cantidad poblacional, con la menor salinidad y temperaturas medias.
- La Misión, zona habitacional y turística, cuenta con la mayor cantidad poblacional, con una salinidad media y temperaturas más bajas. Sin embargo, la zona costera turística cuenta con la menor cantidad poblacional.

*Tabla 9 Datos de ubicación y poblacionales de los puntos seleccionados para la toma de muestras.*

| LOC  | NOM_LOC                     | LONGITUD | LATITUD | ALTITUD | POBLACION TOTAL |
|------|-----------------------------|----------|---------|---------|-----------------|
| 0046 | Bahía de los Ángeles        | 1133337  | 285712  | 0008    | 590             |
| 0151 | La Misión                   | 1165108  | 320534  | 0013    | 920             |
| 3344 | La Misión [Campo Turístico] | 1165237  | 320520  | 0029    | 25              |
| 1946 | Ejido Valle Tranquilo       | 1154815  | 301722  | 0020    | 84              |

### 5.1.2 Muestras Tomadas Durante el Experimento

Los resultados en la Figura 33 muestran que la muestra tomada de Bahía de los Ángeles aún cuenta con la mayor salinidad, mientras que las muestras de Valle Tranquilo y La Misión muestran rangos iguales, promediando los datos. Sin embargo, la mayoría de las mediciones en La Misión se encuentran en el rango bajo, por lo cual esta queda identificada como la muestra con menos salinidad.

Como se logra apreciar en las Figuras 38 a 40, las aguas residuales tras la electrólisis variaron en su coloración en cada una de las muestras. La primera hipótesis de esto se atribuye a la calidad del agua, puesto que al observar las Figuras 41 a 43 el desgaste de los electrodos no es consistente con la salinidad. Se realiza una prueba de pH nuevamente al agua residual para observar el siguiente resultado mostrado en la Figura 44. El resultado fue consistente en las muestras de agua utilizadas.



Figura 44 Prueba de pH en agua residual.

En la sustancia utilizada se tienen los componentes de la Tabla 1, donde se denota la concentración de Na y Cl. Para lo cual, tras el resultado de agua alcalina se asume que se obtuvo hidróxido de sodio. El cloro se forma por descomposición de la sal que contiene el agua de mar, NaCl, esta se descompone como parte “paralela” a la descomposición del agua, la misma energía que se usa para descomponer el agua afecta el enlace molecular de la sal, pero en menor proporción, por eso el cloro es en concentración menor a los dos gases H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

## 5.2 Análisis de Operación del Prototipo

La Figura 50 en los anexos muestra capturas de un video donde se aprecian las burbujas de gas formándose en el cátodo.

Con los datos registrados en la sección 4.3.2 solo evalúan la eficiencia del voltaje al comparar los datos medidos durante el experimento del circuito abierto, obteniendo resultados de eficiencia en la celda fotovoltaica, las conexiones del regulador y finalmente el voltaje operacional en los electrodos. Tomando estos como mera referencia se atribuye entre las pérdidas a la extensión de los cables del circuito puesto a que no son recortados pese a las recomendaciones del fabricante.

Siguiendo la línea de estudio del agua residual, se encuentra una relación entre los voltajes operacionales y los residuos. A pesar de que en la muestra de Valle Tránsito se encontró un pico por encima de los 3V, los valores operacionales en la muestra de la Misión son los más altos. Unos de los factores observados durante el experimento fue la calidad de luz obtenida. Los experimentos fueron realizados durante las mismas horas y periodo de tiempo, sin embargo, durante diferentes días. Pese a que las condiciones de temperatura fueron relativamente constantes entre los 80-85°C, el cielo no presentó las mismas condiciones de luz. En este caso una de las suposiciones es que al requerir una mayor entrada de energía para compensar las pérdidas la descomposición del agua terminase en residuos adicionales.

A su vez, la liberación de iones de hidrógeno produce un efecto adverso en el pH. Es decir, entre más iones de hidrógeno, menor será el pH; mientras que, a menor cantidad de iones de

hidrógeno, mayor será el pH del agua. La Figura 44 muestra un nivel de pH elevado tras someter la muestra de agua al proceso de electrólisis.

Se repite el experimento utilizando la muestra de agua que resulto como la menos contaminada, comparando la claridad del agua, esta vez se utilizó un mayor voltaje de entrada. Este vario entre los 3-5V, presentando la misma pérdida previamente mencionada. Se pudo reproducir el resultado durante la prueba del experimento de la Misión. Sin embargo, la afectación en los electrodos no fue consistente.

### 5.3 Análisis de Desgaste

El efecto de corrosión más notorio fueron picaduras, apreciables en las Figuras 41 y 42. En la Figura 43 se muestran los resultados más agresivos de la corrosión durante las pruebas funcionales del prototipo. La Figura 45 muestra vistas laterales, bajo el microscopio, del mismo ánodo mostrado en la Figura 43. La corrosión electroquímica en este caso se asume es debido a la oxidación que ocurre en el ánodo. Durante el experimento se logra apreciar un flujo que surge desde el ánodo y fluye hacia el fondo de la pecera.



*Figura 45 Vistas laterales de los efectos de corrosión en los electrodos de la muestra de Misión.*

En base a la literatura citada en el marco teórico los tres principales factores en la corrosión electroquímica son el oxígeno, temperatura y salinidad. En el caso que se muestra en la Figura 45, la salinidad presente era de los valores más bajos, la temperatura y el voltaje operacional mostraron los valores más altos. Descartando el factor de la temperatura, el voltaje operacional afecta directamente la cantidad de oxígeno. Pese a que la OER no haya sido conseguida, el ánodo continuaba realizando su labora de oxidación. Una observación adicional durante el experimento es que al incrementar o reducir el voltaje, la producción de burbujas presente en el cátodo es proporcional. En este caso los voltajes fueron más altos, a lo cual puede atribuirse la condición resultante del ánodo.

Los cátodos, como se aprecia en la Tabla 5, sufrieron una expansión en el ancho. Entre uno de los factores a esta afectación es el residuo recolectado durante la electrólisis. La coloración que

varía de blanco a verde, apreciado en las Figuras 41 a 43 son los residuos de la oxidación del agua y el ánodo. La Figura 46 muestra los electrodos utilizados para el cátodo, donde la imagen de la izquierda presenta una coloración dorada tras el platinado, mientras que la imagen de la derecha muestra el resultado del electrodo tras el proceso de electrólisis, donde los residuos se acumulan en los espacios vacíos de la espuma.



*Figura 46 Comparación del cátodo previo y post el proceso de electrólisis.*

## Capítulo 6. Conclusiones

El resultado de este proyecto de tesis fue satisfactorio tras la reevaluación de las variables tras la selección de materiales. La tesis fue comprobada parcialmente, pues el prototipo funciono y logró reproducir el proceso de electrólisis, sin embargo, no se logró la OER. Entre las lecturas obtenidas, el prototipo logró funcionar por debajo de los 5V, trabajando entre 1.1 a 3.3 V, con un voltaje aplicado de entre 3-5V. La tasa de corrosión no fue medible para los cátodos ya que no fue apreciable, sin embargo, la corrosión del ánodo sacrificado fue consistente con el censo poblacional de las zonas muestreadas y voltajes aplicados. Con lo que respecta a los factores de salinidad, no fue consistente con el desempeño de la celda.

Retomando las preguntas de investigación, el posicionamiento angular de los electrodos no afectó el funcionamiento de la celda. De igual manera, la asimetría de los materiales si tuvo un efecto en el desempeño. Al utilizar ambos electrodos de níquel espuma el ánodo debió ser reemplazado por un electrodo de acero, el cual cedió a la oxidación, finalmente se optó por sacrificar el ánodo alterando las condiciones iniciales del experimento.

Al no lograr la OER se concluye que la recolección del oxígeno puede descartarse al no fungir directamente como un combustible, usos alternos para recolección de oxígeno permitiría diferentes aplicaciones submarinas para la obtención de este sin la necesidad de tanques, en condiciones alternas esta sería una idea por explorar para el funcionamiento de la celda en sitio. Zonas con menor población y contaminación permitieron un menor desgaste en los electrodos y contaminación por residuos, de las muestras tomadas la primera en Bahía de los Ángeles muestra menos contaminación tras la oxidación del ánodo.

El diseño actual del prototipo se plantea para la generación de un dispositivo de mayor tamaño que pueda sostener el peso de la celda fotovoltaica y la recolección de los combustibles resultantes. El espacio actual permite una recolección mínima, tras denotar la generación de agua en el espacio cerrado. En general este cumplió con su cometido y logro llevar a cabo el proceso controlando la posición de los electrodos.

Los objetivos tanto generales y específicos fueron logrados. El prototipo se presenta como fácil de implementar y reproducir para ampliar el campo de investigación sobre la generación de combustibles solares a base de cuerpos de agua de mar. A su vez, el uso de herramientas de uso común facilitó el desarrollo del prototipo de la celda. Se presentan algunas oportunidades de mejora que con las habilidades y conocimientos aprendidos durante el proyecto serán clave para la continuación de la investigación.

Como oportunidades de mejora se plantea el rediseño y evaluación del ánodo para la OER utilizando el mismo material base, níquel espuma, pues no hubo residuos considerables durante las primeras horas del experimento. Los platinados considerados para mejorar el desempeño de

los mismo es níquel, zinc y hierro. A su vez, el contacto con casas platinadoras para cumplir con las especificaciones de diseño en el extranjero es recomendado tras las limitantes de la región. De igual manera, el recortar los cables de las conexiones y utilizar un mejor calibre pudiera incrementar la eficiencia del voltaje y minimizar las pérdidas.

Durante la investigación analítica para la discusión de los resultados obtenidos se concluye que no es posible hacer una comparación directa con los dispositivos utilizados actualmente para el proceso de electrólisis de agua fresca, pues no se puede tratar con mismos agentes corrosivos. Sin embargo, los beneficios concluidos de esta investigación recaen en el uso de fuentes alternativas de agua, el mínimo tratamiento y los bajos requerimientos de operación. El acero y hierro son de los materiales más comunes en los procesos actuales, los cuales son sacrificados en el ánodo, como se presentó en este experimento. Para el cátodo se utilizan materiales porosos, tales como el grafito, sin embargo, materiales con pérdidas mínimas y con un sobrepotencial menor. Entre otras investigaciones se encuentran aleaciones sulfuro de molibdeno, puntos cuánticos de grafeno, nanotubos de carbono, perovskita, y níquel/óxido de níquel.

Para el seguimiento y evolución de experimento se propone repetir el experimento con algunas mejoras al prototipo y probándolo sobre la muestra seleccionada para comprobar el desgaste en condiciones óptimas. Entre los factores a modificar en el prototipo se propone agregar cápsulas de recolección e incrementar las horas de prueba. Entre las mejoras, desarrollar un mecanismo para la celda fotovoltaica de manera que esta funcione la mayor cantidad de horas posibles. Dando así continuación al prototipo para generar un dispositivo autónomo que pudiera funcionar con la mínima intervención y contaminación de las aguas residuales.

## Literatura Citada

1. Daintith, John Martin, Elizabeth. (2010). *Dictionary of Science (6th Edition) - electromagnetic induction*. Oxford University Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007X6143/dictionary-science-6th/electromagnetic-induction>
2. Kutz, Myer. (2014). *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 4 - Energy and Power (4th Edition) - 29.2.5.2 Solid Polymer Electrolyte Electrolyzer*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011URFY2/mechanical-engineers/solid-polymer-electrolyte>
3. Larminie, James Dicks, Andrew. (2003). *Fuel Cell Systems Explained (2nd Edition) - 8.7.4 Generating at High Pressure*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003O5TI3/fuel-cell-systems-explained/generating-at-high-pressure>
4. Kutz, Myer. (2014). *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 4 - Energy and Power (4th Edition) - 22.4.2.2 Electrolysis*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011UR9B3/mechanical-engineers/electrolysis>
5. Archer, Mary D. Nozik, Arthur J.. (2008). *Nanostructured and Photoelectrochemical Systems for Solar Photon Conversion - 2.5.2 Photoelectrolysis of Water*. World Scientific. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006ATQT5/nanostructured-photoelectrochemical/photoelectrolysis-water>
6. Siripala, Withana. (2004). *Hydrogen Energy and Photoelectrolysis of Water*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/237549114\\_Hydrogen\\_Energy\\_and\\_Photoelectrolysis\\_of\\_Water](https://www.researchgate.net/publication/237549114_Hydrogen_Energy_and_Photoelectrolysis_of_Water)
7. Talbot, David E. J. Talbot, James D. R.. (2018). *Corrosion Science and Technology (3rd Edition) - 25.1.1.1 Composition of Seawaters*. CRC Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011MITL5/corrosion-science-technology/composition-seawaters>
8. Prepared by the Working Party on Marine Corrosion. (1990). *Illustrated Case Histories of Marine Corrosion: (EFC 5) - 1.4.1 Uniform Attack*. Maney Publishing. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003ZL8KA/illustrated-case-histories/uniform-attack>
9. Davies, Michael Scott, P.J.B.. (2003). *Guide to the Use of Materials in Waters - 2.3.11 Corrosion in Seawater*. NACE International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007T7C85/guide-use-materials-in/corrosion-in-seawater>
10. Ghosh, Srabanti. (2018). *Visible-Light-Active Photocatalysis - Nanostructured Catalyst Design, Mechanisms, and Applications - 3.7 Development of Photocatalysts for Solar-Driven Water Splitting*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011O7EO1/visible-light-active/development-photocatalysts>
11. Makhlof, Abdel Salam Hamdy. (2014). *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection - 18.4.1 Water Photo-Electrolysis Promoted by TiO<sub>2</sub>*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U7Y7U3/handbook-smart-coatings/water-photo-electrolysis>
12. Kamer, Paul C. J. Vogt, Dieter Thybaut, Joris W.. (2017). *Contemporary Catalysis - Science, Technology, and Applications - 14.4.1.2 Photocatalyst Systems with Visible Light (VIS) Response*. Royal Society of Chemistry. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011RKXT2/contemporary-catalysis/photocatalyst-systems>

13. Ginley, David S. Cahen, David. (2012). *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability - 47.4.9 Materials Science Needs for Catalytic O<sub>2</sub> Evolution*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009BS9Y8/fundamentals-materials/materials-science-needs>
14. Kakaei, Karim Esrafil, Mehdi D. Ehsani, Ali. (2019). *Graphene Surfaces - Particles and Catalysts - 7.3.3.1 Metal-Free Heteroatom-Doped Graphene as Electrocatalyst*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011Y33E7/graphene-surfaces-particles/metal-free-heteroatom>
15. Brett, Christopher M. A. Oliveira Brett, Ana Maria. (1993). *Electrochemistry - Principles, Methods, and Applications - 12.7 Photoelectrochemistry*. Oxford University Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00ATXC52/electrochemistry-principles/photoelectrochemistry>
16. Lin, Zhiquan Ye, Meidan Wang, Mengye. (2018). *Multifunctional Photocatalytic Materials for Energy - 4.4.2.1 TiO<sub>2</sub>*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PSS91/multifunctional-photocatalytic/tio2>
17. *ACS Energy Lett.* 2017, 2, 7, 1586-1587. Publication Date: June 13, 2017. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00483>
18. University of Houston. (2019, November 11). New catalyst efficiently produces hydrogen from seawater: Holds promise for large-scale hydrogen production, desalination. *ScienceDaily*. Retrieved May 3, 2020 from [www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191111180111.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191111180111.htm)
19. Yu, L., Zhu, Q., Song, S. *et al.* Non-noble metal-nitride based electrocatalysts for high-performance alkaline seawater electrolysis. *Nat Commun* **10**, 5106 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13092-7>
20. Yun Kuang, Michael J. Kenney, Yongtao Meng, *et al.* Solar-driven, highly sustained splitting of seawater into hydrogen and oxygen fuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Apr 2019, 116 (14) 6624-6629; DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1900556116>
21. Johannes G. Vos, Tim A. Wezendonk, Adriaan W. Jeremiasse, and Marc T. M. *MnOx/IrOx as Selective Oxygen Evolution Electrocatalyst in Acidic Chloride Solution* *KoperJournal of the American Chemical Society* **2018** 140 (32), 10270-10281 DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.8b05382>
22. Davis, J., Qi, J., Fan, X., Bui, J., & Esposito, D. (2018). Floating membraneless PV-electrolyzer based on buoyancy-driven product separation. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 43(3), 1224-1238. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.086
23. Lucas Granados, B. Fernández Domene, R. M. y Lucas Granados, B. (2018). Principios de fotoelectroquímica. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://elibro.net/en/ereader/cetys/57463?page=1>
24. Hen Dotan, Nripan Mathews, Takashi Hisatomi, Michael Grätzel, and Avner Rothschild. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2014 5 (19), 3330-3334; DOI: 10.1021/jz501716g
25. Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries. (2010). National Renewable Energy Laboratory, (NREL/CP-550-47302). Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>

## Anexos

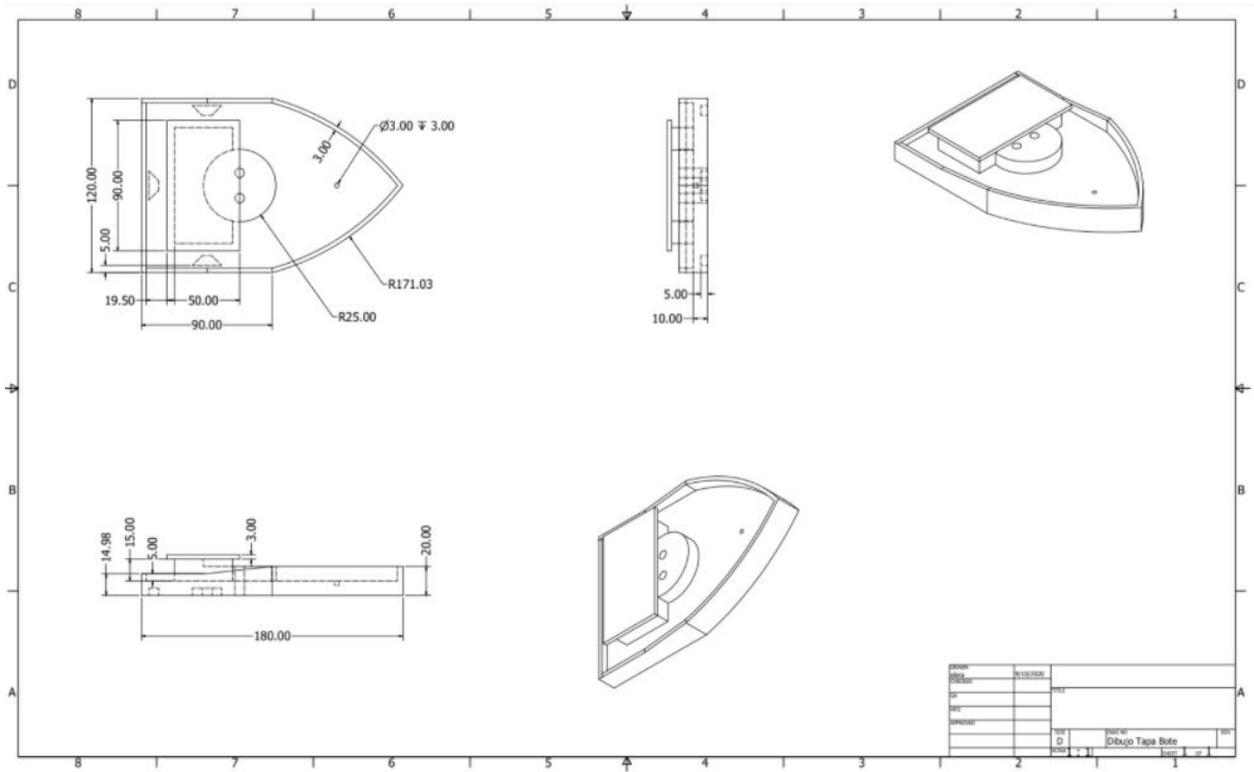


Figura 47 Diujo acotado de la parte superior del bote.

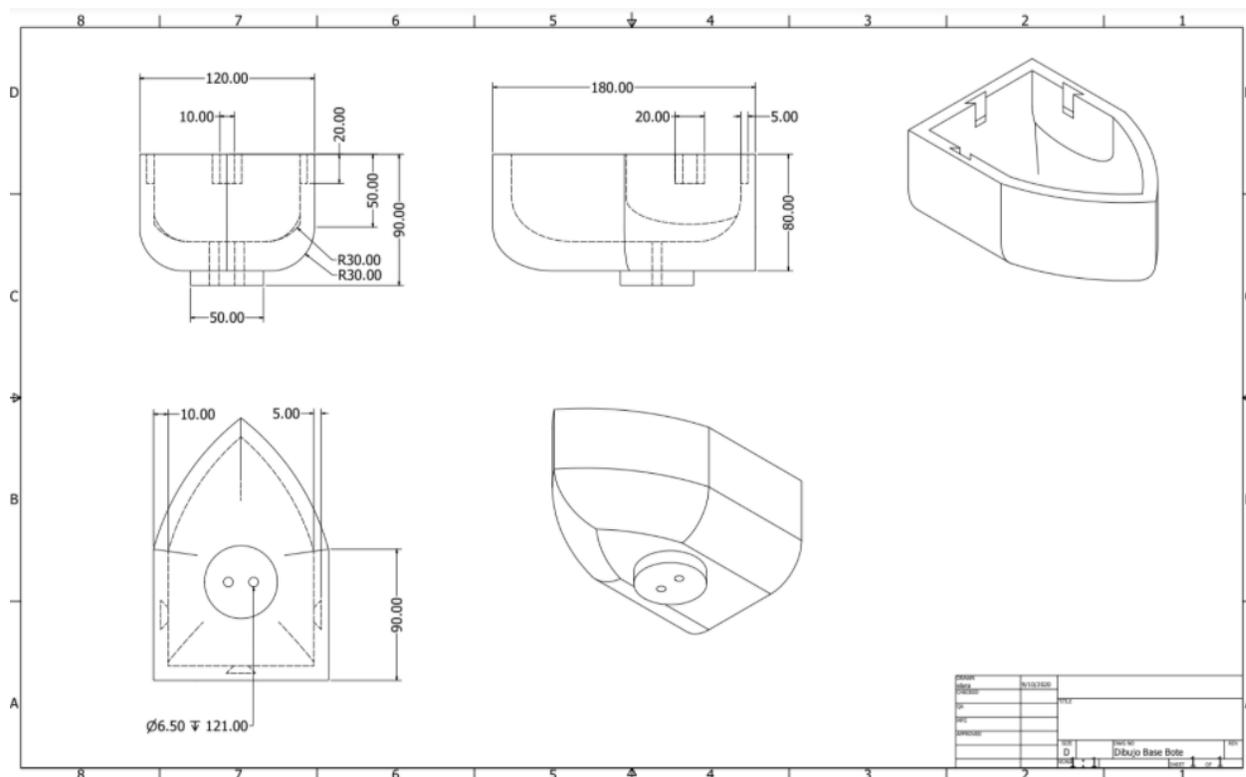


Figura 48 Diujo acotado de la parte inferior del bote.

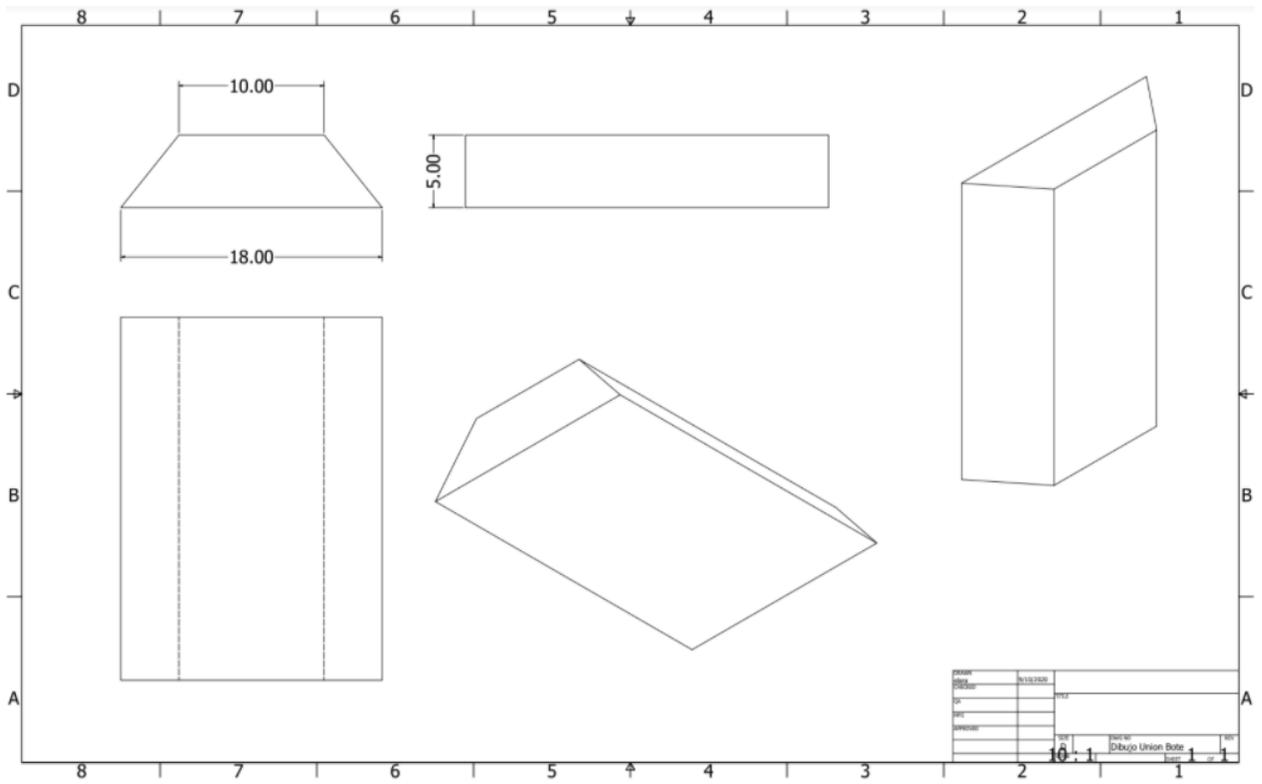


Figura 49 Dibujo acotado de las barras de ensamble del bote.

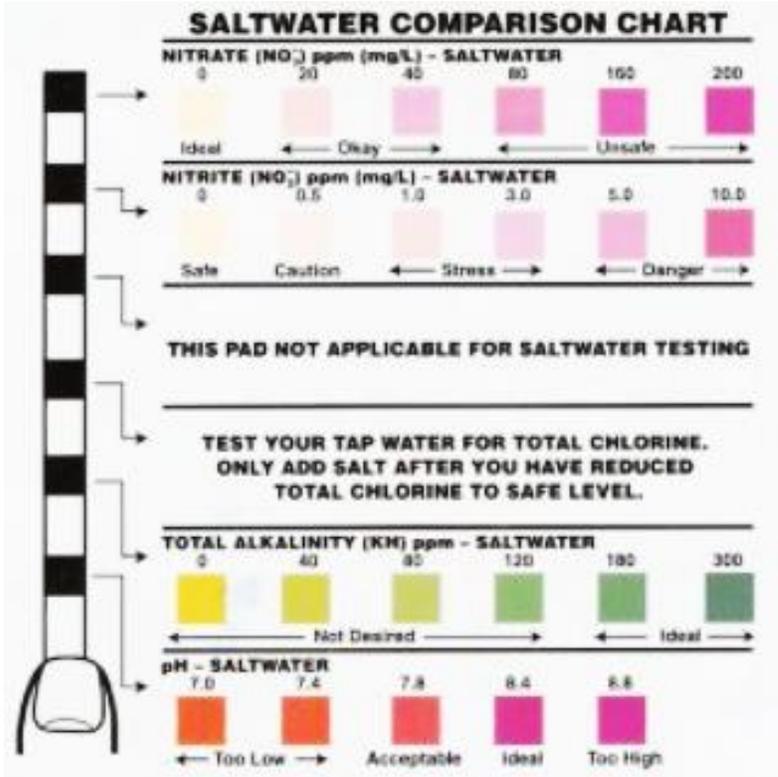


Figura 50 Tabla comparativa para los resultados de las tiras de prueba utilizadas para probar la calidad de las muestras tomadas. Imagen incluida en kit de prueba Tetra Strips 6 en 1.

Tabla 10 Resultados de mediciones de salinidad y temperatura en Bahía de los Angeles, Ensenada, BC.

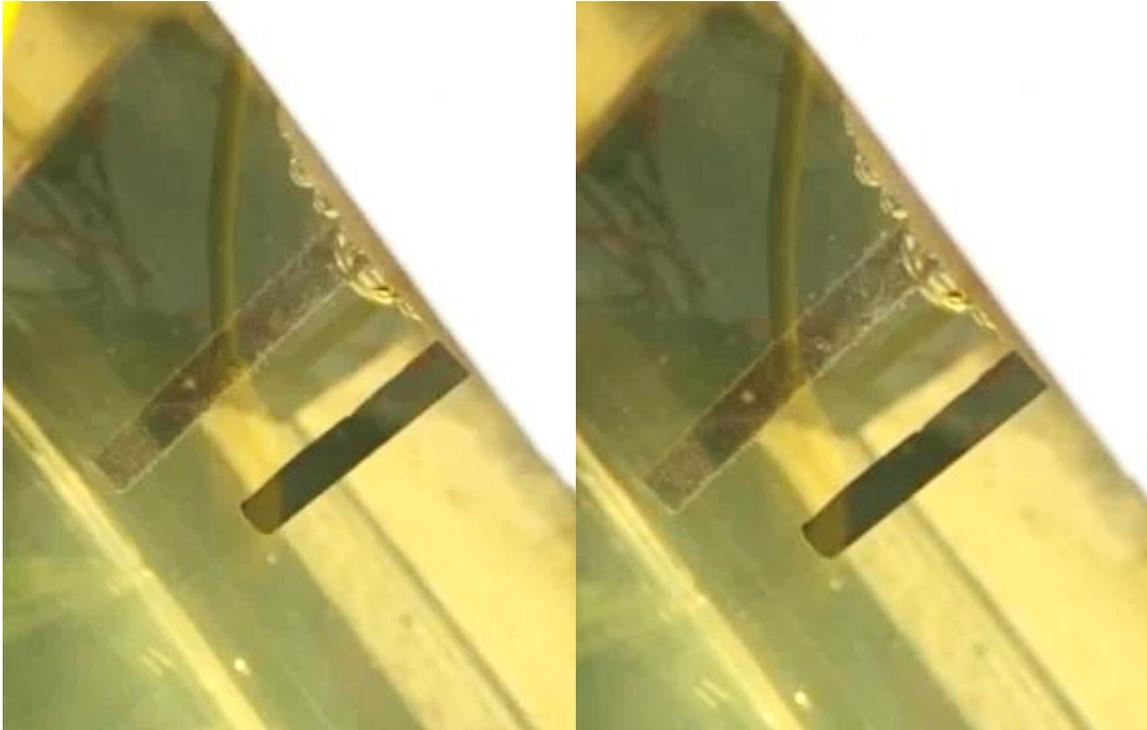
| <b>Muestra</b> | <b>Salinidad (PPT)</b> | <b>Salinidad (SG)</b> | <b>Temperatura (°F)</b> |
|----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1              | 40                     | 1.030                 | 80                      |
| 2              | 37                     | 1.027                 | 80                      |
| 3              | 40                     | 1.030                 | 81                      |
| 4              | 37.5                   | 1.028                 | 82                      |
| 5              | 39                     | 1.029                 | 83                      |
| 6              | 41                     | 1.031                 | 80                      |
| 7              | 41                     | 1.031                 | 80                      |
| 8              | 40                     | 1.030                 | 83                      |
| 9              | 39                     | 1.029                 | 81                      |
| 10             | 37.5                   | 1.028                 | 83                      |
| 11             | 38.5                   | 1.0285                | 82                      |
| 12             | 36                     | 1.027                 | 83                      |
| 13             | 36                     | 1.027                 | 82                      |
| 14             | 37.5                   | 1.028                 | 83                      |
| 15             | 41.5                   | 1.0315                | 83                      |
| 16             | 39                     | 1.029                 | 83                      |
| 17             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 18             | 37.5                   | 1.028                 | 83                      |
| 19             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 20             | 36                     | 1.027                 | 82                      |
| 21             | 37                     | 1.027                 | 82                      |
| 22             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 23             | 38                     | 1.028                 | 81                      |
| 24             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 25             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 26             | 37                     | 1.027                 | 83                      |
| 27             | 38                     | 1.028                 | 81                      |
| 28             | 42                     | 1.032                 | 82                      |
| 29             | 36.5                   | 1.027                 | 83                      |
| 30             | 37                     | 1.027                 | 81                      |

Tabla 11 Resultados de mediciones de salinidad y temperatura en Valle Tranquilo, Ensenada, BC.

| <b>Muestra</b> | <b>Salinidad (PPT)</b> | <b>Salinidad (SG)</b> | <b>Temperatura (°F)</b> |
|----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1              | 35                     | 1.026                 | 68                      |
| 2              | 39                     | 1.029                 | 68                      |
| 3              | 41                     | 1.032                 | 68                      |
| 4              | 25                     | 1.0185                | 68                      |
| 5              | 26                     | 1.019                 | 69                      |
| 6              | 28                     | 1.0205                | 68                      |
| 7              | 32                     | 1.023                 | 68                      |
| 8              | 33                     | 1.0245                | 69                      |
| 9              | 39                     | 1.029                 | 68                      |
| 10             | 38                     | 1.028                 | 68                      |
| 11             | 38                     | 1.028                 | 68                      |
| 12             | 36                     | 1.027                 | 68                      |
| 13             | 37                     | 1.027                 | 69                      |
| 14             | 33                     | 1.0245                | 69                      |
| 15             | 34                     | 1.025                 | 69                      |
| 16             | 32                     | 1.0235                | 68                      |
| 17             | 34                     | 1.025                 | 68                      |
| 18             | 26                     | 1.019                 | 69                      |
| 19             | 33                     | 1.024                 | 68                      |
| 20             | 36                     | 1.027                 | 69                      |
| 21             | 34                     | 1.025                 | 70                      |
| 22             | 36                     | 1.027                 | 69                      |
| 23             | 21                     | 1.032                 | 70                      |
| 24             | 38                     | 1.028                 | 68                      |
| 25             | 38                     | 1.028                 | 70                      |
| 26             | 34                     | 1.025                 | 69                      |
| 27             | 25                     | 1.018                 | 69                      |
| 28             | 33                     | 1.024                 | 70                      |
| 29             | 34                     | 1.025                 | 70                      |
| 30             | 27                     | 1.020                 | 70                      |

Tabla 12 Resultados de mediciones de salinidad y temperatura en La Misión, Ensenada, BC.

| <b>Muestra</b> | <b>Salinidad (PPT)</b> | <b>Salinidad (SG)</b> | <b>Temperatura (°F)</b> |
|----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1              | 41                     | 1.031                 | 66                      |
| 2              | 40                     | 1.030                 | 66                      |
| 3              | 36                     | 1.027                 | 66                      |
| 4              | 34                     | 1.025                 | 66                      |
| 5              | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 6              | 34                     | 1.025                 | 66                      |
| 7              | 38                     | 1.028                 | 66                      |
| 8              | 35                     | 1.026                 | 67                      |
| 9              | 36                     | 1.027                 | 67                      |
| 10             | 35                     | 1.026                 | 67                      |
| 11             | 40                     | 1.030                 | 66                      |
| 12             | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 13             | 35                     | 1.026                 | 67                      |
| 14             | 38                     | 1.028                 | 66                      |
| 15             | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 16             | 36                     | 1.026                 | 66                      |
| 17             | 35                     | 1.026                 | 66                      |
| 18             | 35                     | 1.026                 | 66                      |
| 19             | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 20             | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 21             | 34                     | 1.025                 | 67                      |
| 22             | 38                     | 1.028                 | 68                      |
| 23             | 34                     | 1.026                 | 67                      |
| 24             | 35                     | 1.026                 | 68                      |
| 25             | 34                     | 1.026                 | 67                      |
| 26             | 35                     | 1.026                 | 68                      |
| 27             | 35                     | 1.026                 | 68                      |
| 28             | 35                     | 1.026                 | 68                      |
| 29             | 36                     | 1.027                 | 68                      |
| 30             | 34                     | 1.025                 | 68                      |



*Figura 51 Capturas de producción de hidrógeno en el cátodo.*