

Caso de Estudio: Análisis y Diseño de un Sistema de Batería con Agua de Mar

Alex E. Andrés Rosales¹, Ingeniero Mecatrónico, Alicia María Reyes Duke², Magister en Gestión de Energías Renovables, Walter Josué Fuentes² Licenciado en Física
^{1,2,3}Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, alexandres@unitec.edu, alicia.reyes@unitec.edu.hn, walter.fuentes@unitec.edu.hn

Abstract- Currently, the consumption of electrical energy is essential. Through the need and dependence on electrical energy, both in industrial processes and in daily activities, massive consumption of different types of batteries arises, the residues of which are highly polluting and even toxic, representing a risk both to the environment and as human integrity as well. This study focuses on the development of a battery system whose electrolytic medium is seawater and whose operation is carried out through redox reactions, to obtain a more environmentally friendly source of electricity. A spiral methodology was applied, which was adapted to the needs of the research project. It was concluded that the operation of the battery system becomes unstable when used at sea and the voltage it provides is close to 0.7V, being too low to be applied to a load.

Keywords- electrodes, seawater, voltage, amp-hour, copper, zinc.

I. INTRODUCCIÓN

Las pilas y baterías son dispositivos de generación y almacenamiento de electricidad de suma utilidad, en parte esto se debe al largo abanico de aparatos que requieren de energía eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, su amplia aplicabilidad ocasiona que sean dispositivos que generan miles de toneladas de residuos. El manejo de los residuos generados por estos dispositivos llega a ser tan complejo y específico que no es recomendado mezclar dichos residuos con otros tipos de basura.

Las pilas son los dispositivos de generación y almacenamiento de electricidad que solo tienen un ciclo de descarga. Es decir, una vez la reacción química finaliza por completo, la pila pasa a ser un deshecho. En el caso de las baterías, pueden tener múltiples ciclos de carga y descarga, dependiendo de la utilidad. Luego de pasar por cierta cantidad de ciclos de carga y descarga es que la batería pasa a ser un residuo. Las pilas más utilizadas en el mundo son las pilas alcalinas. En el caso de las baterías, son las de ion de litio, también conocidas como Li-Ion. Existen procesos de reciclaje tanto para las pilas alcalinas como para las de ion de litio. Sin embargo, en muchas sociedades el manejo correcto y clasificación de residuos no es una actividad que se enseñe a las personas desde cortas edades. Por ende, este tipo de desechos siempre termina mezclado con otros tipos de basura. Este es un

incidente que suele ocurrir comúnmente en países tercermundistas, donde en las comunidades y sociedades no existe una correcta educación ambiental para concientizar a las personas sobre los graves peligros de la contaminación. En el caso de las pilas más utilizadas a nivel global, las alcalinas, al ser introducidas en los procesos de incineración a los que se someten comúnmente los residuos en plantas de manejo de basura, los componentes que la conforman, en especial el zinc, lo que hacen es desprender grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Por otra parte, como su nombre lo indica, las baterías Li-Ion contienen litio que es un metal altamente tóxico, que de ser ingerido o aspirado representa un peligro para la salud humana, y de hacerse en exceso llega a ser letal.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad desarrollar un prototipo de un sistema de batería que genere electricidad utilizando el agua de mar. El proyecto se basa en un análisis teórico del funcionamiento químico del sistema para la generación de electricidad. La investigación se realiza con la finalidad de obtener una fuente de energía libre de elementos tóxicos y de emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en el proceso de generación de energía eléctrica como en el de manejo de residuos generados una vez sus elementos concluyan con su vida útil.

II. METODOLOGÍA

La metodología aplicada para llevar a cabo el presente proyecto de investigación es una metodología en espiral. Se adaptaron cuatro fases en la metodología para llevar a cabo por completo la investigación, desde su análisis teórico hasta la elaboración de pruebas y sus conclusiones. A través del desarrollo del proyecto se pretende concluir con un sistema de batería, que utilice como medio electrolítico el agua de mar, que tenga una tensión de salida de por lo menos 5 voltios. Esto requiere un proceso en el cual es necesario comprender el funcionamiento de una batería y sus respectivas partes. Es por esto por lo que la fase inicial en la metodología de estudio es el desarrollo de conceptos, donde se elabora una cama teórica que fundamenta el funcionamiento del sistema de batería, con la finalidad de comprender el fenómeno científico por el que se rige su comportamiento.

Una vez se comprende el funcionamiento del sistema junto con sus partes respectivas, será posible realizar un diseño inicial

para la elaboración de un prototipo que pueda ser sometido a pruebas de funcionamiento reales. Es por esto que la segunda fase de la metodología en espiral es el diseño y desarrollo del prototipo, que tiene como objetivo principal el diseño de un modelo que se adapte a las necesidades previstas en la fase anterior y también la adquisición de los materiales necesarios para llevar a cabo tanto el prototipo como las pruebas de experimentación.

La tercera fase de la metodología aplicada puede ser considerada la más crucial, dado a que en la tercera fase se pretende la realización de las pruebas de experimentación. Esta tercera fase tiene dos objetivos principales, siendo el primero de ellos validar que la generación de electricidad utilizando el agua de mar como medio electrolítico para el sistema de baterías sea posible y siendo el segundo objetivo poder determinar los electrodos que mejor desempeñen en el sistema de batería (se debe tener en consideración que la búsqueda de los electrodos se realizará tomando en consideración únicamente los metales que se encuentren en el mercado local).

La cuarta y última fase de la metodología de estudio será un simple análisis final, en donde se hará una recopilación de todos los datos obtenidos a lo largo de las fases anteriores y sobre todo a lo largo de las realizaciones de pruebas para concluir acerca del funcionamiento y la operación del sistema de batería. Será gracias a esta fase que se puedan realizar las conclusiones y verificar si la hipótesis de investigación, acerca de lograr generar 5 V con el prototipo final, se cumple o no.

A. Desarrollo de Conceptos

La mayor cantidad de personas puede llegar a pensar que el agua de mar es un recurso al que no se le puede brindar algún tipo de aprovechamiento debido a su nivel de salinidad. Al pensar en aplicaciones para el agua en general, se suele tener en consideración únicamente aplicaciones para el agua dulce o agua potable; como ser: zonas de riego, consumo humano, consumo animal e inclusive la generación de electricidad por medio de la energía hidroeléctrica. Sin embargo, al centrarse en el último punto, es posible exponer que el agua de mar también puede ser utilizada como un recurso para la generación de energía eléctrica; incluso sin tomar en consideración su energía mecánica, como lo hace la energía mareomotriz. Esto es posible a través de reacciones químicas, que es un concepto que se conoce desde el siglo XIX cuando Alessandro Volta inventa la primera pila eléctrica.

Se estima que el 70% de la superficie terrestre se encuentra cubierta en agua. De toda esa agua en existencia, el 97,5% es agua salada encontrada en mares y apenas un 2,5% es agua dulce que puede ser consumida para el desarrollo de la vida y aplicada en múltiples procesos y actividades de carácter humano. Esto permite elaborar un gráfico para poder comparar la distribución del agua en el planeta Tierra, que se muestra a continuación:

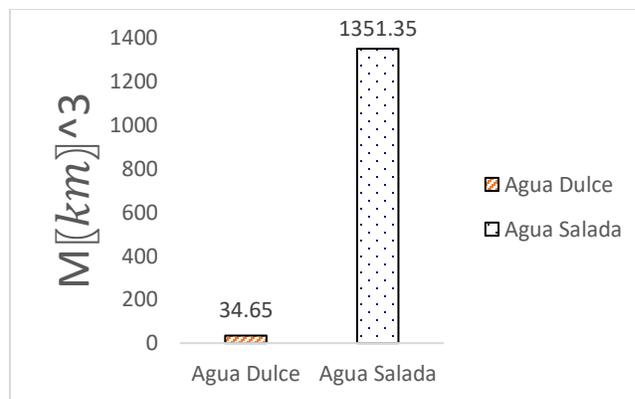


Fig. 1. Comparación de agua dulce vs salada

Fuente: Creación propia, con datos extraídos de Jumapam y USGS.

A través de los datos visualizados en la Fig. 1, se puede concluir que existen 39 veces más agua salada que agua dulce. Esto genera una crisis en cuanto al correcto manejo y uso del agua potable, sumando a dicha crisis la problemática de la contaminación y el desperdicio de agua causado directamente por el ser humano. La UNESCO afirma que en algunos sectores del mundo, como en el caso presente a lo largo de América Latina y el Caribe, el estrés hídrico en partes de la región ha alimentado una serie de conflictos, ya que varios sectores, incluidos la agricultura, la energía hidroeléctrica, la minería e incluso el agua potable y el saneamiento, compiten por los escasos recursos [1].

Es posible mencionar que la abundancia en el agua salada a través de los mares puede llegar a ser desfavorable para consumo y aplicaciones de carácter humano; sin embargo, es altamente favorable para ser empleada como un recurso para la obtención de energía eléctrica debido a su vasta existencia.

Como se ha mencionado previamente, la generación de electricidad a través del empleo del agua de mar como medio electrolítico se debe gracias a reacciones químicas, específicamente en el área de la electroquímica, por medio de reacciones redox. La electroquímica es una rama de la química que se enfoca en el estudio de la electricidad que surge por medio de reacciones químicas y los cambios químicos resultantes debido a la presencia de electricidad.

Una reacción redox es una reacción química en la cual un elemento pasa por un proceso de reducción (es decir, pérdida de electrones) y otro pasa por un proceso de oxidación (es decir, ganancia de electrones). Es debido al intercambio de electrones resultante en las reacciones redox que se genera electricidad. La reacción redox depende de los electrodos empleados y de la composición del medio electrolítico. Esto indica que para el presente caso de estudio en donde se plantea la elaboración de un sistema de batería que utiliza el agua de mar como su medio electrolítico, es importante tener en consideración desde un inicio la composición del agua de mar, o bien, los elementos presentes en esta misma. Es por esto que a continuación se presenta en la Tabla 1 los principales elementos encontrados en

el agua de mar alrededor del mundo, enlistándolos en base a su concentración expresada en gramos por litro de agua.

TABLA 1
COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR

| Elemento | Concentración (g/L) |
|----------|---------------------|
| Cloro | 19.0 |
| Sodio | 11.0 |
| Magnesio | 1.30 |
| Azufre | 1.00 |
| Calcio | 0.50 |
| Potasio | 0.40 |

Fuente: Creación propia, con datos extraídos de García (2002).

Al analizar los elementos enlistados en la tabla, no es de sorprender que el cloro y el sodio sean los elementos con más presencia en el agua de mar, dado a que son los elementos que conforman el cloruro de sodio, también conocido como la sal común. Dado a que el cloro y el sodio son los elementos más comunes en el agua de mar y con gran diferencia al resto, son los elementos que serán considerados en la reacción redox junto con los electrodos. Por otra parte, para tomar en consideración posibles metales que actúen como electrodos del sistema de batería, es necesario tomar en consideración las semirreacciones de los elementos, que para uso teórico se encuentran estandarizadas a 1atm y 25°C. La tabla de semirreacciones dicta cuales son los elementos que actúan de mejor manera como agentes oxidantes en comparación a otros elementos.

Encontrar un aparato que haga uso de una pila o batería es sumamente común hoy en día. Las pilas eléctricas también son conocidas como baterías primarias, estas son baterías que solo tienen un ciclo de descarga, es decir, cuando los reactivos se han transformado en productos, casi por completo, no se produce más electricidad y se dice que la batería se ha agotado [2]. Por otra parte, las baterías recargables se conocen como baterías secundarias. Estos son dispositivos en los que la reacción de la celda puede invertirse haciendo pasar electricidad a través de la batería (cargándola) [3].

Las pilas alcalinas son el tipo de pilas más utilizada alrededor del mundo, mientras que la batería Li-Ion es la batería recargable más utilizada en aparatos móviles. Es imprescindible el reciclado de las pilas, haciéndose tremendamente necesario depositarlas en los lugares adecuados para su recogida, y prestando especial atención a que nunca, en ninguna circunstancia, alguna de ellas sea alcanzada por el fuego o acabe en una fuente de agua, ya que una sola pila de botón puede contaminar por sí misma el agua de toda una piscina olímpica [4].

Dado a las altas necesidades de electricidad para el funcionamiento de aparatos eléctricos, existe una alta demanda para pilas y baterías. La posibilidad de utilizar el agua de mar como un recurso energético para la generación de energía eléctrica que sea libre de gases de efecto invernadero, tanto en

proceso de generación como en manejo de residuos, es una oportunidad que no debe dejarse pasar por alto. De ser diseñado de la manera correcta, el sistema de batería podría ser utilizado tanto fuera del agua en aplicaciones en las que sea posible sumergir el sistema en un recipiente que contenga agua de mar, como en aplicaciones donde directamente el sistema se encuentre sumergido en el mar. Hoy en día, muchos estudios se realizan en el mar con el objetivo de conservar los océanos y las costas, estos estudios muchas veces pueden llegar a poner en peligro la vida humana [5]. Es por esto que en amplias ocasiones se emplean robots submarinos con la finalidad de estudiar los ecosistemas marinos. Un sistema de batería que opere por medio del agua de mar beneficiaría a este tipo de proyectos en donde el prototipo se encuentra completamente sumergido en el mar.

B. Materiales

La selección de los materiales es en base a distintos factores a considerar. Primero, el modelo a ser utilizado será obtenido mediante impresión 3D utilizando PLA+, por el simple hecho de poder tener libertad en diseño sin tener que realizar un molde posteriormente para elaborar la carcasa de algún material específico.

Dado a que para realizar pruebas y visualizar el desempeño del sistema de batería, es importante considerar retroalimentación. Para esto, se utilizará un sensor de voltaje y corriente MAX471, un Arduino Uno para comunicarse con el sensor y también un módulo bluetooth HC-05 para poder obtener los datos desde el teléfono móvil. Por último, se hará uso de un multímetro para medir voltaje y corriente previo a la programación del sensor, sobre todo en las pruebas para seleccionar los electrodos. También se utilizará un sensor de temperatura digital a prueba de agua, el DS18B20, y un sensor de pH 4502C, con la finalidad de monitorear el medio electrolítico.

Para las pruebas de electrodos, se toma en consideración una chapa de cobre de 15x15 cm con 2mm de espesor. De igual forma, una barra de plomo de 33cm de largo con 2cm de ancho y un espesor de 1cm, con un peso total de 1lb. Por último, barras de zinc de 10cm de alto con 2.3cm de ancho y un espesor de 3mm.

III. RESULTADOS

A. Pruebas para Selección de Electrodos

Gracias al desarrollo y análisis de los conceptos, se han detectado tres metales a ser probados para la selección de los electrodos. Estos metales son: cobre, plomo y zinc. Los tres metales son ampliamente utilizados en aplicaciones para batería. Sin embargo, a través de las semirreacciones de los elementos se ha detectado que también pueden llegar a reaccionar con el sodio y el cloro para la generación de electricidad.

Se ha realizado el diseño de un modelo con la idea original de probar utilizar cobre tanto como cátodo como ánodo. Por

ende, el modelo tuvo la finalidad de sujetar las placas de cobre. Sin embargo, también fue utilizado para las pruebas realizadas con plomo. No es el modelo del prototipo final, pero en algún punto fue considerado para serlo y fue ampliamente utilizado durante las pruebas para la selección de electrodos. Se muestra a continuación:

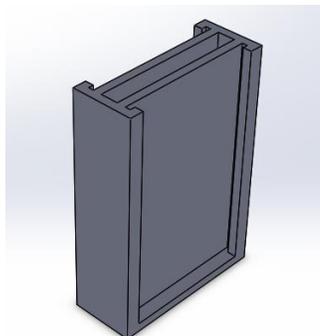


Fig. 2. Modelo utilizado en pruebas de electrodos

Fuente: Creación propia.

El modelo logra sujetar dos placas de cobre de 7.6cm de ancho, 15cm de alto y un espesor de 2mm. Sin embargo, debido a la ranura central con aperturas en ambos extremos, permitiendo el flujo del medio electrolítico, es posible también usar este mismo modelo para realizar pruebas con la barra de plomo insertando la barra en dicha ranura.

Para realizar las pruebas, se utilizó una mezcla de agua con la cantidad de sal real que contiene el agua de mar, con la finalidad de simular dicha agua de mar. Por cada 1.6L de agua se utilizaron 59.2g de sal de mesa, mezclados en un recipiente. Es importante considerar que los resultados obtenidos a través de estas pruebas realizadas en un ambiente de control pueden llegar a variar si se realizan con agua de mar en distintos sectores del mundo.

La primera consideración que se tomó para la combinación de electrodos fue la de Cobre-Cobre, es decir, un cátodo de cobre y un ánodo de cobre. Utilizar ambos electrodos de cobre resultó no ser la mejor opción dado a que únicamente generaron una tensión de salida que oscilaba entre 0.04 y 0.08V. Por ende, se descartó rápidamente. Sin embargo, funcionó para comprobar que, en efecto, es posible la generación de electricidad por medio de reacciones redox utilizando el agua de mar como medio electrolítico de un sistema de batería. El montaje se puede observar en la Fig. 3.



Fig. 3. Montaje Cobre-Cobre

Fuente: Creación propia.

La prueba usando Cobre-Cobre también fue positiva porque demostró que no hubo fallos en el diseño del primer modelo.

Los siguientes electrodos considerados fueron un cátodo de cobre y un ánodo de plomo. Los resultados obtenidos fueron mejores que el uso de cobre como ambos electrodos. En la primera prueba realizada, se obtuvo un voltaje inicial máximo de 0.42V (que, sin embargo, no se volvió a replicar en ninguna otra prueba). El comportamiento de la tensión de salida tomada a través de muestras a lo largo de 30 minutos se puede observar en la Fig. 4.

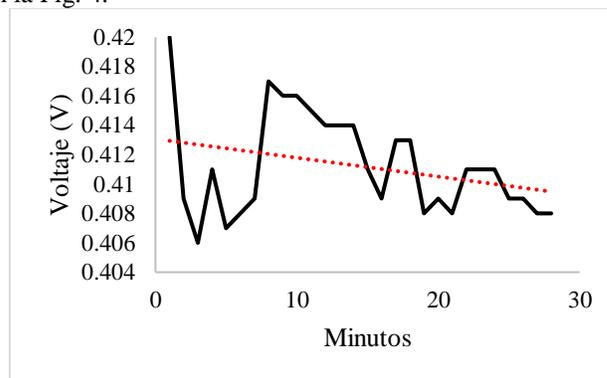
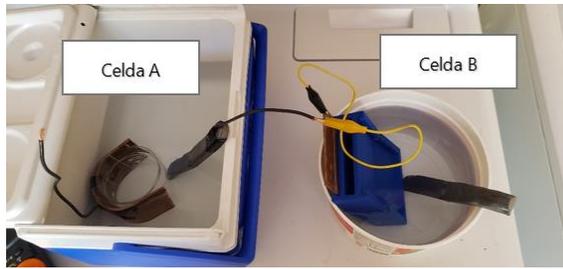


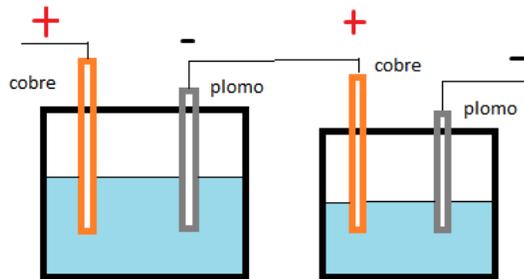
Fig. 4. Tensión de salida utilizando Cobre-Plomo

Fuente: Creación propia.

A través del uso de cobre y plomo como electrodos, también fue posible comprobar que al elaborar dos celdas en dos contenedores distintos conectadas en serie los voltajes individuales de ambas celdas se suman, como lo harían los de dos baterías o pilas convencionales. Sin embargo, al utilizar dos celdas conectadas en serie en un mismo recipiente, el voltaje entregado es el mismo como si solo hubiese una celda. En la Fig. 5 (a) se puede observar el montaje de la prueba utilizando dos celdas en recipientes distintos, mientras que en la Fig. 6 (b) se observa el esquema del montaje.



(a) Montaje de prueba



(b) Esquema de montaje

Fig. 5. Dos celdas Cobre-Plomo en recipientes distintos
Fuente: Creación propia.

En esta prueba el volumen de la Celda A fue de 2 L mientras que en el de la Celda B fue de 1.5 L. En ambas celdas se utilizó la misma cantidad de sal, 59.2g. Es decir, en la Celda B hubo más concentración de sal en comparación al volumen de agua contenido que en la Celda A. El comportamiento de la tensión de salida medida a través de las muestras en un lapso de 120 minutos se puede observar en la Fig. 6.

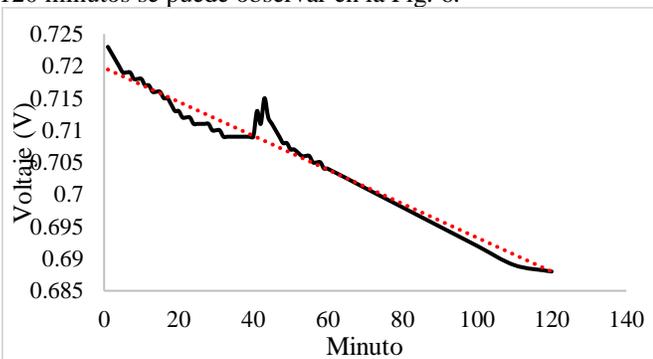


Fig. 6. Tensión de salida en dos celdas conectadas en serie de Cobre-Plomo en recipientes distintos

Fuente: Creación propia.

El último par que se tuvo en consideración para actuar como electrodos fue e Cobre-Zinc. Es decir, un cátodo de cobre y un ánodo de zinc. Utilizando estos dos metales como electrodos se obtuvieron los mejores resultados en comparación al uso de Cobre-Cobre y Cobre-Plomo.

Al realizar pruebas para determinar la tensión de salida, se obtuvo un comportamiento que se puede observar a través de la Fig. 7.

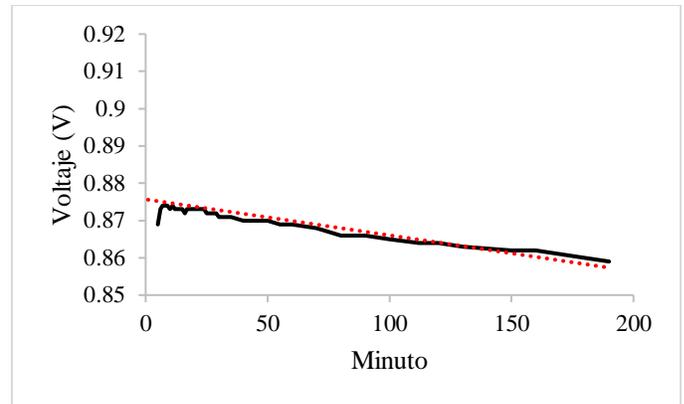


Fig. 7. Tensión de salida utilizando Cobre-Zinc
Fuente: Creación propia.

El voltaje máximo generado fue de 0.874V, una mejora significativa en comparación al uso de plomo como cátodo. Después de 190 minutos de prueba en donde el sistema sólo se mantenía sumergido en el medio electrolítico sin una carga y sin perturbaciones, se obtuvo un voltaje final de 0.859V.

Al igual que en el caso del Cobre-Plomo, se elaboró una prueba utilizando dos celdas de Cobre-Zinc en recipientes distintos para comprobar la suma de sus voltajes a través de una conexión en serie, utilizando el mismo esquema presentado en la Fig. 5 (b), con la diferencia que se sustituye el plomo por zinc. El montaje de la prueba se puede observar en la Fig. 8. Para la prueba se utilizaron 1.6L de agua con 59.2g de sal disuelta en cada recipiente.

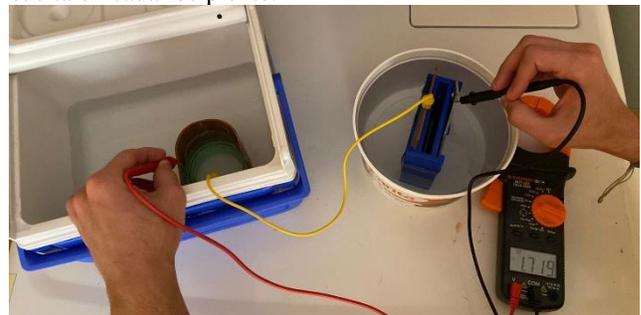


Fig. 8. Montaje utilizando dos celdas Cobre-Zinc
Fuente: Creación propia.

Los resultados fueron los esperados, ya que los voltajes de las celdas independientes se sumaron, obteniendo un voltaje inicial de 1.759V y el último, medido después de 180 minutos de sumersión en el medio electrolítico, fue de 1.715V. El comportamiento del voltaje obtenido a través de las muestras se puede observar en la Fig. 9.

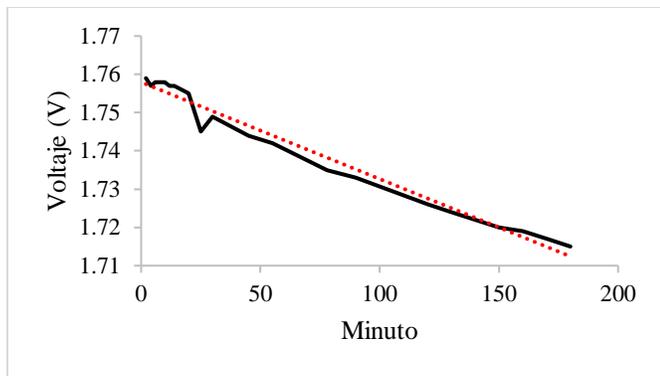
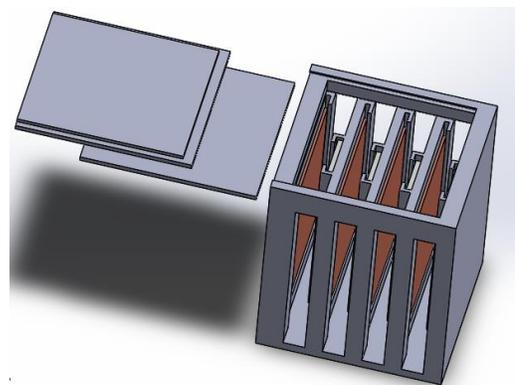


Fig. 9. Tensión de salida utilizando dos celdas Cobre-Zinc
Fuente: Creación propia.

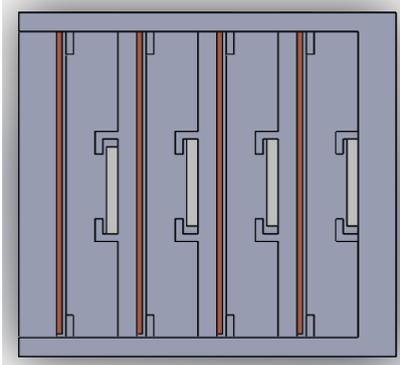
B. Diseño de Prototipo Final

Para el diseño del prototipo final se tomaron en consideración algunos aprendizajes obtenidos a lo largo de las pruebas para la selección de los electrodos. En primera instancia, para lograr que las celdas sumen sus voltajes, es necesario aislar lo más posible las celdas. Dado a que, en las pruebas realizadas, al tener celdas en recipientes distintos los voltajes se suman, pero al tener celdas en un mismo recipiente, se genera el voltaje de una única celda.

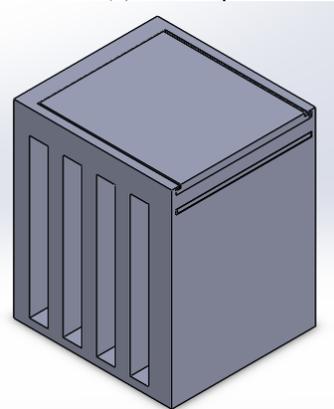
El modelo se diseñó con la finalidad de sujetar 4 celdas conformadas por chapa de cobre de 8cm de ancho, 8cm de alto y hasta 2mm de espesor y también una barra de zinc de 10cm de alto, 2.3cm de ancho y 3mm de espesor. El espacio de las celdas fue diseñado para que haya un espacio libre de aproximadamente 1cm entre la chapa de cobre y la barra de zinc, colocados frente a frente. Los lados laterales de las celdas se encuentran abiertos por medio de una ranura, esto es con la finalidad de que fluya el medio electrolítico adentro de la celda. Dado a que se tiene previsto el uso del sistema completamente sumergido en agua de mar, no es necesario que el prototipo retenga dicha agua de mar, solamente que permita su flujo a través de las celdas. El modelo contiene una tapa superior para retener las placas dentro del prototipo en caso de movimientos bruscos en los que el sistema no se mantenga de pie. De igual forma, tiene una tapa colocada justo por encima de donde se sujetan las placas, para poder observar en las pruebas qué tan herméticas tienen que estar las celdas, es decir, si un espacio libre con agua por encima de todas las celdas afecta en el desempeño del sistema, debido a lo observado cuando se colocaban dos celdas en un mismo recipiente en las pruebas de electrodos. Con la finalidad de observar el resultado final, se elaboró un diseño del prototipo conteniendo las placas de cobre y las barras de zinc en el software de SolidWorks, mostrado en la Fig. 10.



(a) Montaje prototipo final en SolidWorks



(b) Vista superior



(c) Vista Isométrica

Fig. 10. Modelo de Prototipo Final

Fuente: Creación propia.

Una vez el modelo del prototipo fue diseñado, se procedió a realizar la impresión 3D de este mismo para poder acoplar los electrodos en las celdas correspondientes. La impresión 3D se realizó utilizando PLA+, una variación del material PLA comúnmente utilizado en impresiones 3D.

El prototipo final fue diseñado correctamente, dado a que las placas de cobre y las barras de zinc pudieron ser introducidas en sus orificios correspondientes sin ningún tipo de problema, encajando a la perfección. Los orificios en los extremos permiten el flujo del agua sin problema alguno y las tapas superiores encajan perfectamente.

El modelo real se puede observar en la Fig. 11.



(a) Electrodo posicionados en Prototipo



(b) Prototipo final con tapas
Fig. 11. Prototipo Final en Físico

Fuente: Creación propia.

El peso del prototipo con las cuatro celdas acopladas es de 2 libras. Sin embargo, llega a aumentar considerablemente luego de mojarse en el agua de mar, dado a que el agua puede ingresar a través de las líneas de impresión mientras el prototipo está sumergido, por ende, agrega más peso. Para la transmisión de la electricidad, se acoplaron cables jumpers comúnmente utilizados en electrónica, dado a que el voltaje durante las pruebas de selección de electrodos fue un voltaje considerablemente bajo. Por ende, si se usasen cables con un menor calibre, es decir, mayor diámetro, el flujo de la electricidad no sería adecuado y habría pérdidas.

C. Pruebas Prototipo Final

La primera prueba realizada en el prototipo fue utilizando únicamente una celda para obtener el comportamiento de la tensión de salida y de la corriente. Para la prueba, se conectó un multímetro en serie con la batería y una impedancia de $2k\Omega$, como se muestra en el diagrama presente en la Fig. 12.

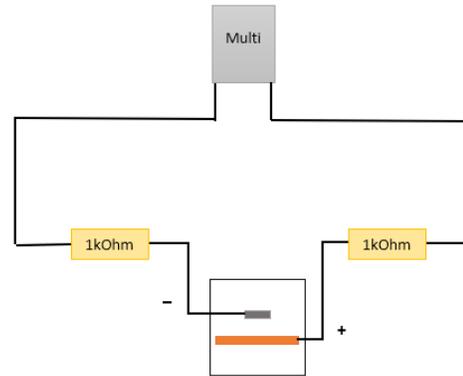


Fig. 12. Esquema de Conexión en Serie a $2k\Omega$

Fuente: Creación propia.

Se realizó a una carga de $2k\Omega$ para poder calcular la capacidad de Amperios hora que entrega el sistema, dado que gracias a la Ley de Ohm, al medir el voltaje de salida de la batería, es posible hacer un cálculo teórico de la corriente correspondiente, así pudiendo analizar si el comportamiento del sistema es correcto.

El primer voltaje medido en la prueba fue de 0.810 V. Al conocer el valor de la resistencia, si se aplica la Ley de Ohm la corriente correspondiente debería ser de 0.405mA. Sin embargo, la corriente real medida a través del multímetro fue de 0.345mA, siendo apenas una diferencia de 0.06mA que pueden ser acreditados a pérdidas por transmisión en cable o a un margen de error del multímetro.

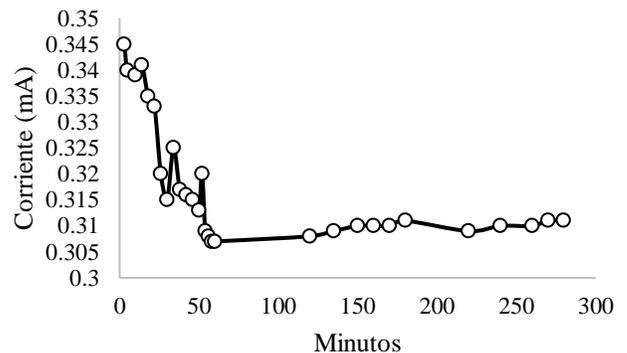


Fig. 13. Comportamiento de Corriente con una Celda

Fuente: Creación propia.

A través de la Fig. 13, se puede observar que en los primeros minutos hubo una caída acelerada en cuanto a la magnitud de la corriente. Sin embargo, a partir del minuto 60 de prueba, la corriente se vuelve más estable y constante. La prueba tuvo una duración total de 280 minutos, pero para el cálculo de la capacidad solo se tomaron en consideración 4 horas. Se consideró el uso de únicamente 4 horas y no al alcanzar cierto voltaje, como se hace con las pilas eléctricas, debido a que el voltaje generado es muy bajo para ser

comparado con pilas convencionales y porque el voltaje inicial no se logra mantener constante. Desde un inicio se sufre una disminución de voltaje que no para ni disminuye después de una cierta cantidad del tiempo. Tomando esto en consideración, se obtiene una capacidad de 1.23mAh.

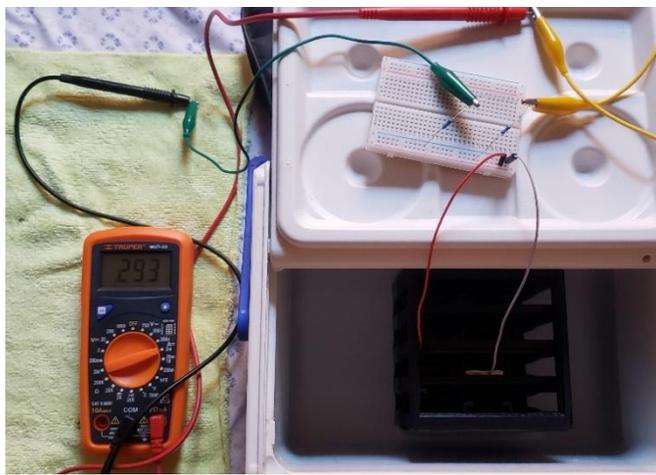


Fig. 14. Montaje de Prueba con una Celda

Fuente: Creación propia.

En la Fig. 14 se expone el montaje utilizado, donde el prototipo fue sumergido en 1.6L de agua con 59.2g de sal para simular agua de mar en un ambiente de control. Las conexiones se realizaron gracias a la ayuda de una *protoboard*.

Al comprobar y observar el comportamiento del sistema al utilizar únicamente una celda acoplada al prototipo, se prosiguió a realizar una prueba en donde se utilizaron dos celdas conectadas en serie. Para esto, se tomó el cátodo (cobre) de la primera celda como el polo positivo, el ánodo (zinc) de la primera celda se conectó en serie con el cátodo de la segunda celda y se tomó el zinc de la segunda celda como el polo negativo de la batería.

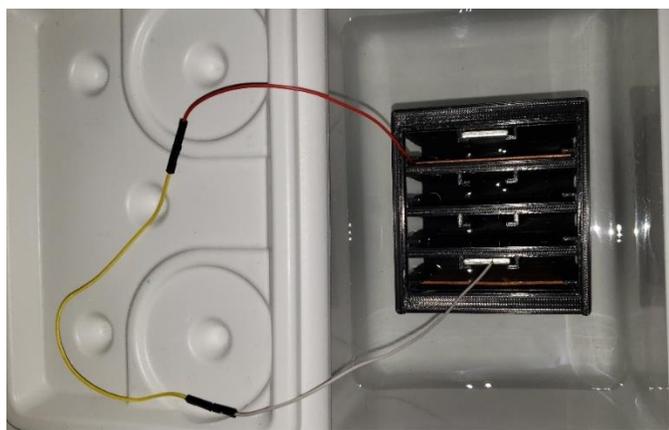


Fig. 15. Conexión en Serie de Dos Celdas

Fuente: Creación propia.

La prueba resultó en un fracaso, dado a que se esperaba una suma de voltajes, como acontece al conectar dos baterías, o fuentes de alimentación cualesquiera, en serie. El

comportamiento de la tensión de salida fue similar al obtenido utilizando una celda.

TABLA 2
MUESTRAS UTILIZANDO DOS CELDAS EN PROTOTIPO

| Minuto | Voltaje (V) |
|--------|-------------|
| 1 | 0.832 |
| 5 | 0.836 |
| 10 | 0.829 |
| 20 | 0.843 |
| 30 | 0.838 |
| 40 | 0.838 |

Fuente: Creación propia.

En la Tabla 2 se muestran los datos obtenidos a través de 6 muestras tomadas en un lapso de 40 minutos.

Dado a que la conexión en serie no resultó en una suma de voltajes entregados por las celdas individuales, se procedió a realizar una prueba en donde las 4 celdas fueron acopladas al prototipo y se conectaron en paralelo en una *protoboard*. Todos los cátodos se conectaron a un mismo nodo, mientras que se realizó lo mismo con los ánodos en un nodo distinto. En la Fig. se pueden observar las cuatro celdas acopladas al prototipo.



Fig. 16. Montaje de las Cuatro Celdas en Prototipo

Fuente: Creación propia.

Para la prueba el prototipo fue sumergido en 3.2L de agua con 118.4g de sal disuelta. El voltaje entregado por las 4 celdas en paralelo fue menor que el entregado por el prototipo utilizando una o dos celdas. En el grafico presente en la Fig. 17 se puede observar el comportamiento del voltaje obtenido a lo largo de 120 minutos de prueba.

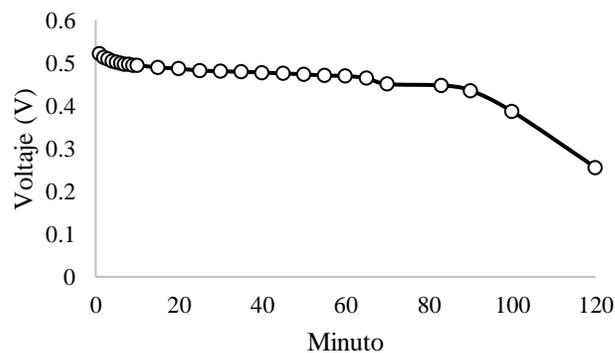


Fig. 17. Muestras de Voltaje con cuatro Celdas

Fuente: Creación propia.

El voltaje inicial tomado fue de 0.522 V. para la prueba. Se utilizó una conexión en serie entre la batería, el multímetro y una resistencia de 1kΩ para medir la corriente. En la Fig. se

muestra el grafico del comportamiento de la corriente otorgada por el sistema.

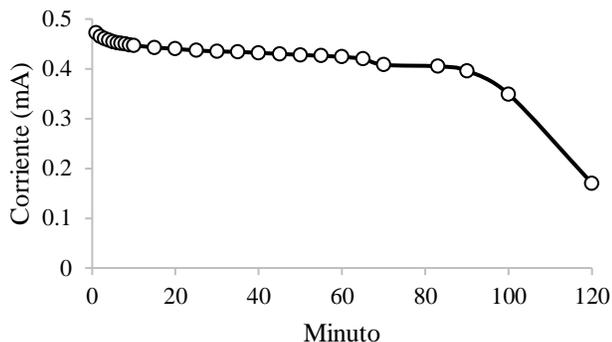


Fig. 18. Muestras de Corriente con Cuatro Celdas
Fuente: Creación propia.

La prueba tuvo una duración total de 2 horas, en la cual la corriente promedio otorgada por el sistema de batería fue de 0.424mA. A partir de esto se puede afirmar que el sistema utilizando 4 celdas otorga una capacidad de 0.849mAh.

Al utilizar una impedancia de 1kΩ, el comportamiento visible a través de los gráficos de la corriente y el voltaje son muy similares, casi idénticos. La diferencia se rige en las unidades, ya que la corriente se representa en milésimas.

D. Pruebas con Agua de Mar

Dado a que el proyecto de investigación tiene la finalidad de diseñar un sistema de batería que opere mediante el uso de agua de mar como medio electrolítico, se realizó un viaje a las playas de Puerto Cortés, Cortés, Honduras, con la finalidad de lograr someter el prototipo final a pruebas utilizando agua de mar real, para observar su comportamiento de ser sometido en aplicaciones reales con agua de mar.

Previo a realizar una prueba utilizando una celda únicamente, se probó una conexión en serie de dos celdas acopladas al prototipo sin ningún tipo de éxito, dado a que el resultado fue el mismo que se ha encontrado previamente al utilizar dos celdas conectadas en serie. Es decir, se obtuvo un voltaje que asemeja más a una conexión en paralelo que una en serie. Sin embargo, al realizar la prueba, se notó una peculiaridad en cuanto a la generación de electricidad mediante el agua de mar. Al sumergir los dos metales usados como electrodos se generan las reacciones redox correspondientes de los elementos presentes a través del agua, que actúa como medio electrolítico. Al colocar el cable que corresponde al negativo del multímetro en contacto con el ánodo de la batería, es decir, el zinc, y el cable que corresponde a la medida del positivo en el multímetro en el agua de mar, fue posible obtener una lectura de voltaje muy similar a la obtenida a través del cobre y el zinc como electrodos, siendo de 0.746 V. Al realizar esta prueba también se tomaron muestras del pH del agua utilizada por medio del sensor 4502C, siendo de 7.21. Por otro lado, la temperatura medida con el sensor DS18B20 fue de 27.56°C.

Se realizó una prueba acoplando una celda al prototipo y sumergiéndolo en un recipiente que contenía 3.25L de agua de mar, con la finalidad de observar el comportamiento del prototipo. En el montaje se utilizó una impedancia de 2kΩ para realizar la conexión en serie con el multímetro y poder medir la corriente.

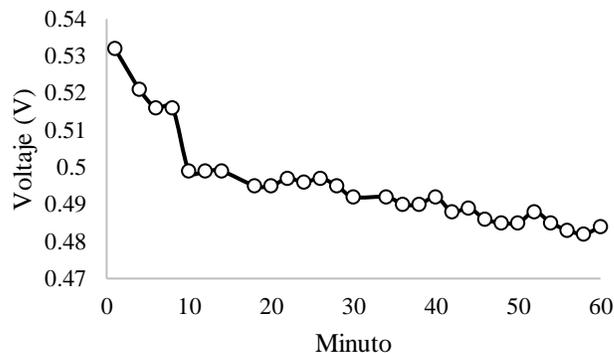


Fig. 19. Voltaje Utilizando una Celda en Agua de Mar
Fuente: Creación propia.

En la Fig. 19 se puede observar el comportamiento que tuvo la tensión de salida del prototipo a lo largo de una hora de prueba continua. El voltaje inicial fue de 0.532 V, un voltaje menor que el proporcionado por el prototipo al utilizar una celda en un ambiente de control.

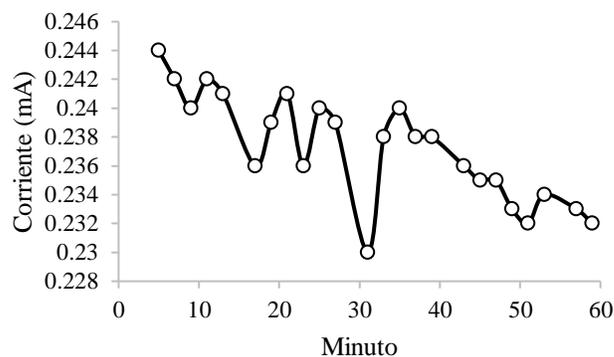


Fig. 20. Corriente de una Celda en Agua de Mar con Impedancia 2kΩ
Fuente: Creación propia.

La primera muestra de corriente se tomó en el minuto 5 de prueba, fue de 0.244mA. El voltaje tomado un minuto antes, fue de 0.521 V. Considerando que la batería se conectó a una impedancia de 2kΩ, al aplicar la Ley de Ohm utilizando 0.521 V, se obtiene una corriente de 0.260mA. Apenas una diferencia de 0.016mA en cuanto a la corriente real medida un minuto después de la toma de dicho voltaje. Por ende, se puede afirmar que el comportamiento de la electricidad generada es muy similar al esperado teóricamente bajo los mismos parámetros reales obtenidos. Es a través de las muestras de corriente tomadas que se puede concluir que el prototipo sumergido en un recipiente que contenga agua de mar con una celda acoplada es de 0.228mAh. Este valor fue tomado de la suma de todas las muestras tomadas a lo largo de una hora, dividida entre la

cantidad de muestras, es decir, el promedio de corriente entregado por el sistema en una hora.

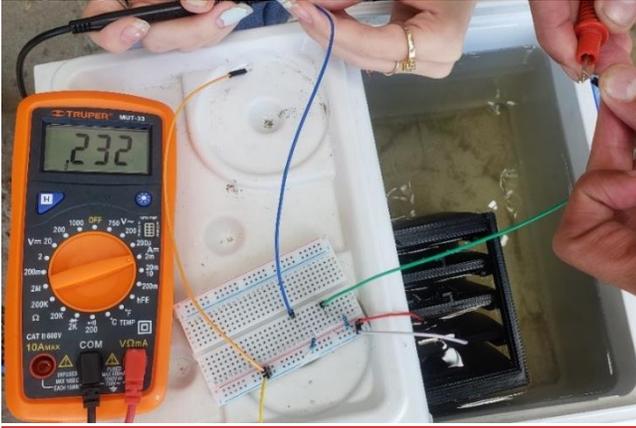


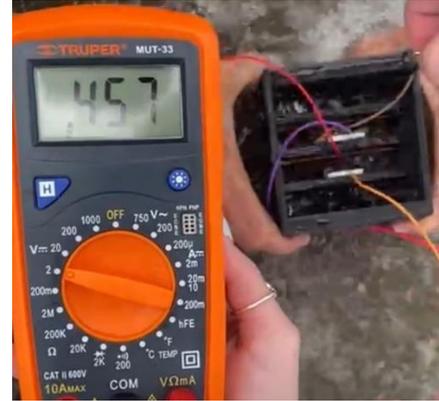
Fig. 21. Prototipo con una Celda en Agua de Mar
Fuente: Creación propia.

En la Fig. 21 se puede observar el montaje utilizado para la prueba con una celda, en la cual el prototipo fue sumergido en agua de mar dentro de un recipiente.

Luego de corroborar el comportamiento del prototipo utilizando una celda, se hizo una prueba en la cual se acoplaron dos celdas al prototipo mediante conexión en serie y se colocó en la orilla del mar, en donde pudiese entrar en contacto con el oleaje para observar su comportamiento. Al realizar lo expuesto, se notó que el comportamiento del voltaje generado fue inconsistente. Dependiendo de la cantidad de agua que entraba en contacto con la batería, el voltaje aumentaba o disminuía.



(a) Poca Agua

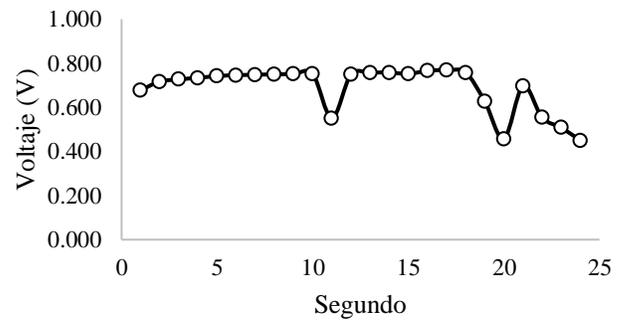


(b) Contacto con ola

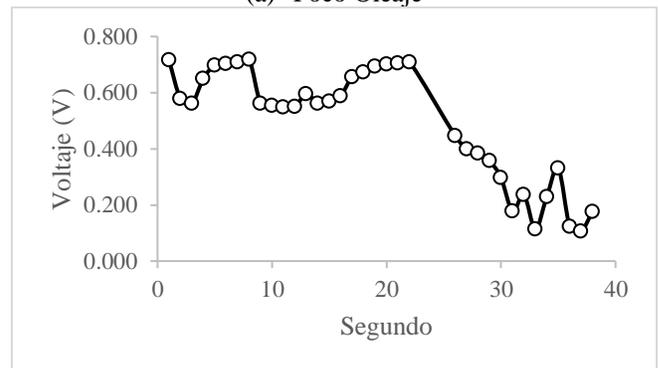
Fig. 22. Prueba a Orilla del Mar

Fuente: Creación propia.

En la Fig. 22 (a) se puede observar como el prototipo no se encuentra sumergido o en contacto con una cantidad abundante de agua, sin embargo, la salida de tensión presentada es de 0.748 V, lo mismo que cuando el prototipo fue estudiado en un ambiente de control con una o dos celdas. Luego, en la Fig. 22 (b) se observa que al entrar en contacto con una mayor cantidad de agua debido a una ola, el voltaje disminuye a 0.457 V.



(a) Poca Oleaje



(b) Mayor Oleaje

Fig. 23. Voltaje de Prototipo a Orilla de Mar

Fuente: Creación propia.

En la Fig. 23 (a) se muestra un gráfico del comportamiento del voltaje entregado por el sistema en un lapso de 24 segundos en los que no hubo tanto oleaje recibido por parte del prototipo.

Se puede observar dos puntos en los que el voltaje disminuye considerablemente, en ambos fueron momentos de impacto con una ola, llegando a recibir una cantidad de agua que cubrió al prototipo. Sin embargo, una vez el agua se retira, la línea de voltaje luce considerablemente estable. Por otra parte, se puede observar en la Fig. 23 (b) que el voltaje entregado es considerablemente menos estable si hay mucho oleaje, ya que durante los segundos plasmados en el gráfico hubo oleaje constante que llegaba incluso a cubrir por completo de agua al prototipo. Es por esto por lo que no fue posible elaborar una prueba larga para tomar medidas de voltaje debido a que el prototipo no llegó a brindar una tensión de salida constante en algún punto para observar su descarga gradual.

E. *Discusión*

A continuación se procede a analizar las variables independientes de la presente investigación.

1. *Tiempo de Descarga:* si se toma en consideración al prototipo con cuatro celdas acopladas y conectadas en paralelo, el tiempo de descarga calculado a través de la ecuación de una línea de tendencia obtenida por el comportamiento medido sería de 2 horas con 54 minutos. Ese es el tiempo en que el sistema de batería tardaría para llegar a un voltaje muy cercano a 0 V. Sin embargo, dado a que desde un inicio la batería brinda un voltaje menor a un voltio y una capacidad de mAh muy baja, si se compara con una pila eléctrica convencional, el sistema no puede llegar a ser utilizado en una aplicación real e incluso su operación desde un inicio se puede llegar a considerar como la de una batería descargada.

2. *Voltaje:* para el prototipo con una o dos celdas acopladas, el voltaje de salida suele rondar cifras levemente superiores a los 0.7 V. La gran desventaja que presenta el modelo desarrollado de la batería es que sus celdas no pueden ser conectadas en serie, dado a que al realizar la conexión, su desempeño final es el mismo que el de la operación de una sola celda. Esto indica que a pesar de que se conecten las celdas por medio de un cable, la conexión entre las celdas sigue siendo en paralelo. Debido a que el agua es un medio conductor, todas las celdas se encuentran en contacto la una con la otra por medio del agua, como si estuviesen conectadas todas a un mismo nodo. Esto establece una cierta conexión en paralelo. Sin embargo, la actuación de la conexión en paralelo tampoco es la correcta, dado a que las corrientes de las celdas individuales tampoco se suman. Es más, al conectar más de dos celdas en paralelo, el voltaje otorgado por el prototipo es menor que el otorgado si solo se usa una o dos celdas.

3. *Corriente:* la corriente entregada del prototipo si actúa de la forma esperada. Al conocer el voltaje de salida y la resistencia que actúa como carga, es posible realizar un cálculo utilizando la Ley de Ohm para obtener la corriente correspondiente al circuito. Es así como se puede verificar que la corriente emitida por el sistema de batería actúa de la manera esperada por la Ley de Ohm. De igual forma, así es posible

calcular la capacidad del sistema de batería, la cual se dice que es de 0.849mAh en el caso de utilizar cuatro celdas acopladas al prototipo en un ambiente de control. Sin embargo, al ser utilizado en un recipiente con agua de mar, la capacidad resultó ser de 0.228mAh.

4. *Electrodos:* a través de las pruebas iniciales para la selección de electrodos, fue posible descartar rápidamente el uso de dos placas de cobre como el par de electrodos, es decir, una que actuara como cátodo y otra como ánodo. El uso de cobre como cátodo y plomo como ánodo obtuvo mejores resultados, elevando considerablemente la tensión de salida obtenida en comparación al cobre-cobre. Sin embargo, se concluyó que el uso de cobre y zinc como electrodos era la mejor opción en lugar de usar plomo. En las pruebas iniciales utilizando un ambiente de control, el voltaje entregado por el cobre y el zinc como electrodos llegó a ser superior a los 0.8 V.

5. *Transmisión de Electricidad:* para que el prototipo fuese funcional, aparte de lograr generar electricidad también es necesario poder aplicar dicha electricidad generada. Para esto se necesitó determinar el método de transmisión de corriente para aplicarlo a cargas. Se probó utilizar cable de calibre 10 inicialmente, llegando a ser descartado rápidamente. El cable de cobre calibre 14 también fue descartado debido a que seguía siendo de un diámetro muy grande en comparación al voltaje generado. Debido a que la tensión de salida otorgada no llegaba a superar ni siquiera un voltio, se decidió utilizar cables jumpers utilizados frecuentemente en electrónica. Los utilizados fueron jumpers Dupont de calibre AWG 26.

IV. CONCLUSIONES

- Se determinó que el mejor par de electrodos a utilizar para el sistema de batería fue el cobre y el zinc, tomando en consideración metales que pudiesen ser obtenidos en el mercado local. Esto no significa que no pueda haber otro par de electrodos que genere un mayor voltaje.
- El prototipo con cuatro celdas acopladas entrega un voltaje inicial de 0.522 V en un ambiente de control. El prototipo sumergido en agua de mar dentro de un recipiente estático brinda un voltaje inicial de 0.532 V. Sin embargo, el prototipo siendo utilizado directamente en el mar llegó a presentar variaciones en voltaje, dependiendo del movimiento de las olas y la cantidad de agua que entraba en contacto con este mismo, pudiendo llegar a entregar voltajes mayores a 0.7 V pero en cuestión de segundos disminuir a voltajes que rondan los 0.4 V. El comportamiento es muy inestable debido al movimiento del agua y los demás componentes que puedan estar presentes en ella.
- La capacidad de amperios hora del prototipo en un ambiente estático con agua de mar es de 0.228mAh.
- Se determinó que una mayor cantidad de sal presente en el medio electrolítico no representa un mayor voltaje entregado por el sistema. Es más, el voltaje tiende a

disminuir al pasar los 50g de sal disuelta en 1.5L de agua al utilizar electrodos de cobre y zinc.

V. REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, "Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El Valor del Agua," UNESCO, París, 2021.
- [2] [3] R. H. Petrucci, F. G. Herring, J. D. Madura and C. Bissonette, Química General: principios y aplicaciones modernas, Madrid: Pearson, 2011.
- [4] National Geographic España, "Ponte las pilas por el medio ambiente," 23 Enero 2020. [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/ponte-pilas-por-medio-ambiente_13232. [Accessed 03 Marzo 2022].
- [5] J. L. Ordoñez Avila, M. G. Ordoñez Avila and M. E. Perdomo, "Design of an Underwater Robot for Coral Reef Monitoring in Honduras," in *ICCRE*, 2021.