



## **BATERÍA DE SODIO PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

**Realizado por:**

**Ing. Juven González** / Correo: [juveneduardo2003@gmail.com](mailto:juveneduardo2003@gmail.com)

**Ing. Belgica Leal** / Correo: [belgicalealchaparro@gmail.com](mailto:belgicalealchaparro@gmail.com)

**Ing. Adriana Rodríguez** / Correo: [ingadrianaro@gmail.com](mailto:ingadrianaro@gmail.com)

**Tutor Académico:**

**Dr. Roberto Ruiz**/ Correo: [raruiz1@urbe.edu.ve](mailto:raruiz1@urbe.edu.ve)

**Tutor Metodológico:**

**Dra. Massiell Marcano**/ Correo: [mvmarcano@urbe.edu.ve](mailto:mvmarcano@urbe.edu.ve)

El ser humano utiliza dispositivos portátiles que dependen de baterías como fuente de energía para su funcionamiento. Estas almacenan la electricidad mediante procesos electroquímicos que se dan a través de la interconexión entre la energía química y la energía eléctrica, conceptos fundamentales para el diseño de baterías; Desde el inicio de su historia, se ha experimentado con una variedad de materiales conductores, buscando conseguir el mejor rendimiento posible, dando



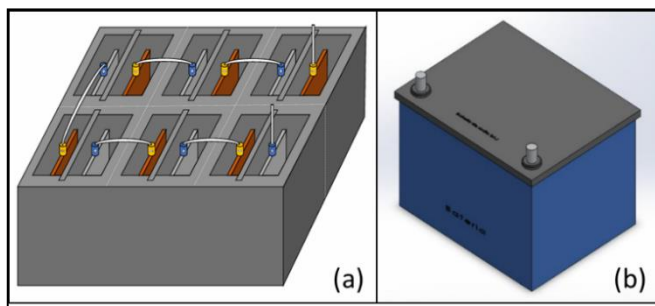
como resultado la creación de baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-zinc, en conjunto con la más comercial de todas, la de ión-litio, entre otras.

A pesar de que las baterías de ión-litio han potenciado el desarrollo tecnológico mundial, estas están hechas de elementos escasos y costosos, tales como el cobalto, por lo que sus costos han aumentado con el paso del tiempo. En los últimos años, los desafíos relacionados con el suministro de este metal han llevado a buscar alternativas más económicas y sostenibles. Para satisfacer esta necesidad de cambio, emergen las baterías de sodio, que utilizan materiales abundantes en la naturaleza y de bajo coste. Actualmente, son una de las opciones más atractivas desde la perspectiva ambiental y de disponibilidad de recursos. Por lo que el objetivo de esta investigación es desarrollar una batería de sodio para un sistema de generación fotovoltaica con: óxido de sodio manganeso (ánodo), grafito (cátodo) y cloruro de sodio (electrolito).

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Para lograr el diseño de una batería de sodio para un sistema de generación fotovoltaica es necesario partir con la elaboración de un prototipo. Kendall y Kendall (1997), explican que la construcción de prototipos debe admitir modificaciones que le permitan acercarse progresivamente a los deseos de los usuarios, no como producto terminado sino como uno que requiere modificaciones para alcanzar sus objetivos, proceso el cual se fundamenta en gran medida en la retroalimentación brindada por los participantes.

Para que un prototipo pueda cumplir con este propósito, debe plantear adecuadamente cuáles son sus objetivos y cuál va a ser su propósito, en el caso de la batería de sodio, es un tipo de batería recargable la cual cuenta con iones de sodio para su funcionamiento, cuyo objetivo es el de funcionar como una alternativa sustentable y económica a baterías convencionales y comúnmente comercializadas, tales como las baterías de iones de litio. A continuación, se presenta el plano tridimensional del prototipo, su parte interna (a) y su parte externa (b).

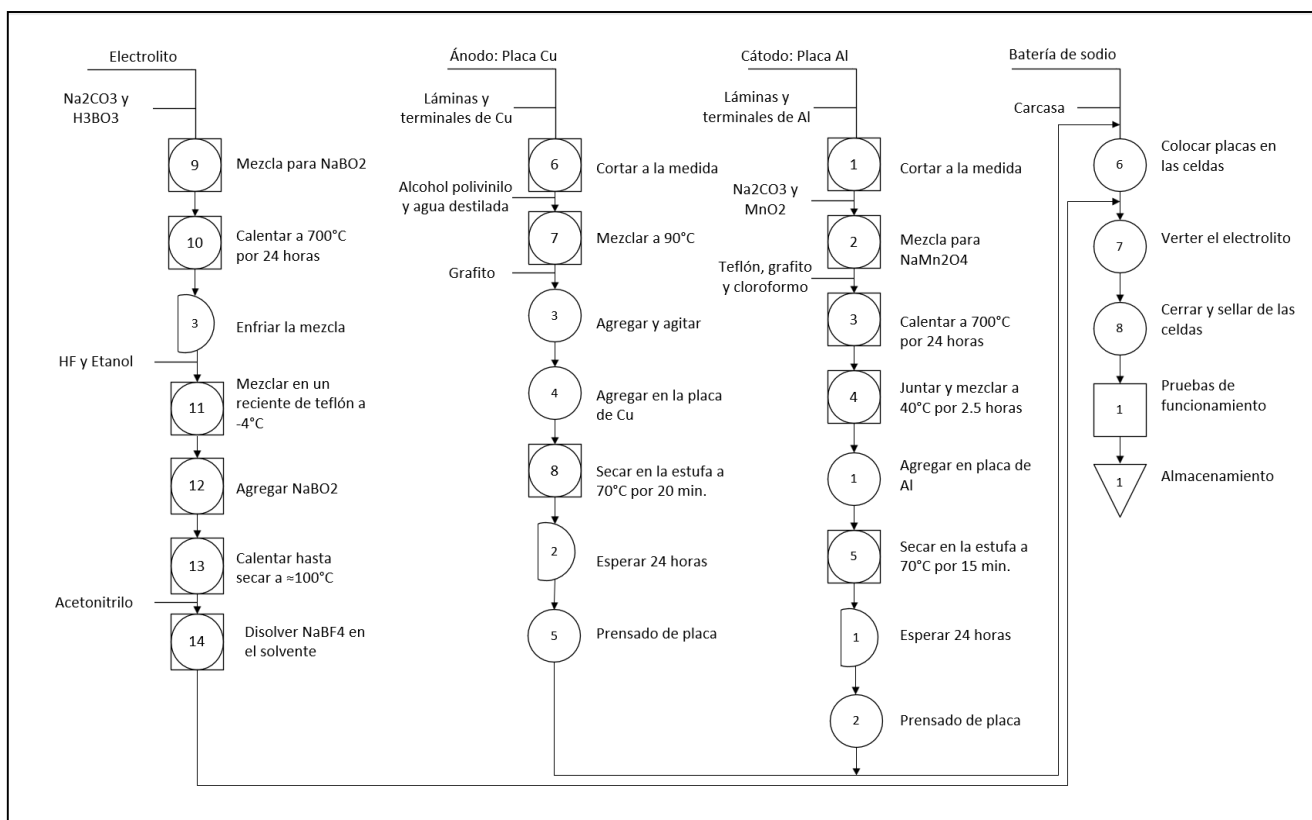


**Modelo tridimensional del prototipo**

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

Se diseñó un plan detallado plasmado en un diagrama del proceso de ensamble, el cual no es solo una simple representación gráfica, sino una herramienta integral que captura información crucial sobre los materiales necesarios, las operaciones a realizar y las especificaciones técnicas que deben considerarse durante el proceso, facilitando la identificación de puntos críticos y la implementación de mejoras continuas, impulsando el avance de esta tecnología energética.

En las baterías, la cantidad y la disposición de las celdas determinan el comportamiento del voltaje y la corriente eléctrica (amperaje). Se decidió trabajar con un total de seis celdas independientes, cada una equipada con dos electrodos de polaridad contraria, conectadas en serie. Con esta configuración, se consiguió aumentar la medición de voltaje aprovechable.



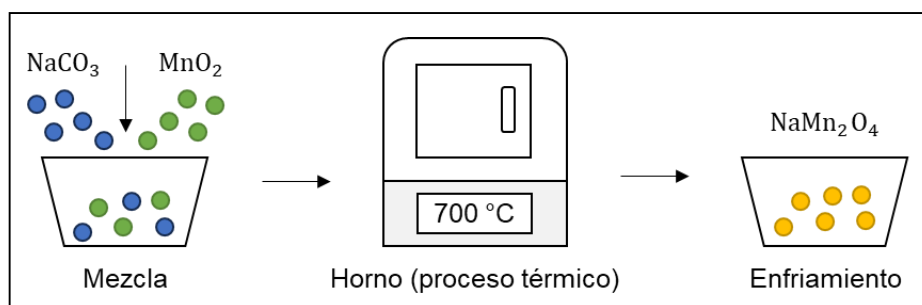
**Diagrama del proceso de ensamble**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

Para la construcción del prototipo se estableció un periodo de tiempo definitivo, tomando como apoyo fuentes bibliográficas sobre acumuladores electroquímicos como base para la construcción, utilizando materiales tales como carbono gráfico, carbonato de sodio, conectores, entre otros, y herramientas para el proceso de construcción.



Inicialmente, dada la revisión bibliográfica y las recomendaciones planteadas en los estudios sobre baterías de sodio de distintos autores a lo largo del mundo, se decidió trabajar con carbono grafítico como material anódico, óxido de sodio manganeso como material catódico y tetrafluoroborato de sodio como material de electrolito.

Para lograr óxido de manganeso sodio ( $\text{NaMn}_2\text{O}_4$ ), se sometió a un proceso térmico de  $700\text{ }^\circ\text{C}$  a una mezcla de carbonato de sodio ( $\text{NaCO}_3$ ) y óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) en un mortero de ágata durante aproximadamente 24 horas tal y como está explicado en el siguiente esquema:



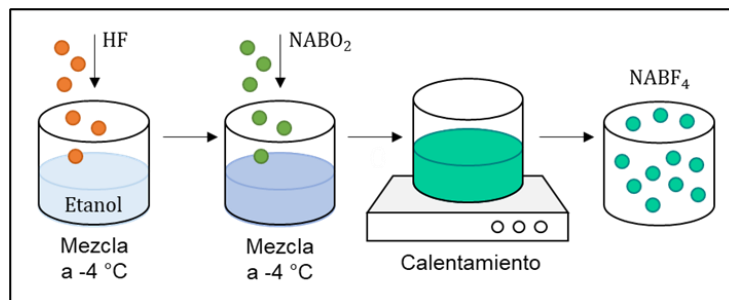
**Esquema metodológico para la síntesis de  $\text{NaMn}_2\text{O}_4$**   
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

A continuación, evidencias fotográficas de la mezcla después de pasar por el tratamiento térmico. El material resultante fue un sólido arenoso y oscuro.



**(a) Mezcla de  $\text{NaCO}_3$  y  $\text{MnO}_2$ , (b)  $\text{NaMn}_2\text{O}_4$  resultante**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez. (2024)**

La elaboración del electrolito fue más compleja. Se mezcló ácido fluorhídrico (HF) y etanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) en un recipiente de teflón. Luego, se le agregó borato de sodio ( $\text{NaBO}_2$ ), sintetizado anteriormente a esta mezcla, manteniendo una temperatura de  $-4\text{ }^\circ\text{C}$ , y la solución se llevó a calentar en una estufa, a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  hasta secar, para obtener el tetrafluoroborato de sodio ( $\text{NaBF}_4$ ).



**Esquema metodológico para la síntesis de  $\text{NABF}_4$**

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

En el caso del ánodo y el cátodo, los materiales sólidos se adhirieron a unas placas de aluminio y cobre respectivamente, para así poder ser utilizados dentro de la estructura física de la batería de sodio.



**Electrodos positivo y negativo para una celda**

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

La optimización del rendimiento y la vida útil depende del control preciso de diversas variables durante el proceso de manufactura. En el caso de la batería de sodio, las variables bajo control son: Tamaño del colector, con un total de tres diferentes tamaños evaluados, así como los materiales a utilizar y las cantidades de soluto y solvente presentes en la solución para el electrolito.



**Tamaños de colectores evaluados en el experimento**

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**



A pesar de haber establecido en la fase V que los materiales a utilizar para el electrolito del prototipo serían tetrafluoroborato de sodio y acetonitrilo, también se llevaron a cabo pruebas con agua con cloruro de sodio y con clorato de sodio, con el objetivo de descubrir la mejor opción entre todas para la batería de sodio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los distintos materiales y los tres tipos de tamaño de colectores. Resultó que el mejor rendimiento lo presentaron los colectores más pequeños (de 4x3 cm) en el electrolito de agua con cloruro de sodio, logrando medir  $\sim 0.55$  V.

Al finalizar con las pruebas experimentales, se llegó a la conclusión de que el tamaño de los colectores es indiferente al voltaje generado por los mismos, ya que las mediciones indican valores muy parecidos entre ellos, sin embargo, se observó una mejora en la transmisión de voltaje en aquellos colectores que tenían una mejor capa de material adherido. Adicional a esto, se determinó que la concentración de la solución no influía en mayor medida a la cantidad de electrones transmitidos, pues se pudo observar valores similares independientemente de la concentración en la solución utilizada como electrolito.

Con la intención de demostrar que la celda prototipo era capaz de mantener el voltaje con el paso del tiempo, se le hizo seguimiento por una semana y un día, tomando notas de las mediciones con multímetro diariamente. Los resultados obtenidos fue en promedio la misma medida,  $\sim 0.55$  V.

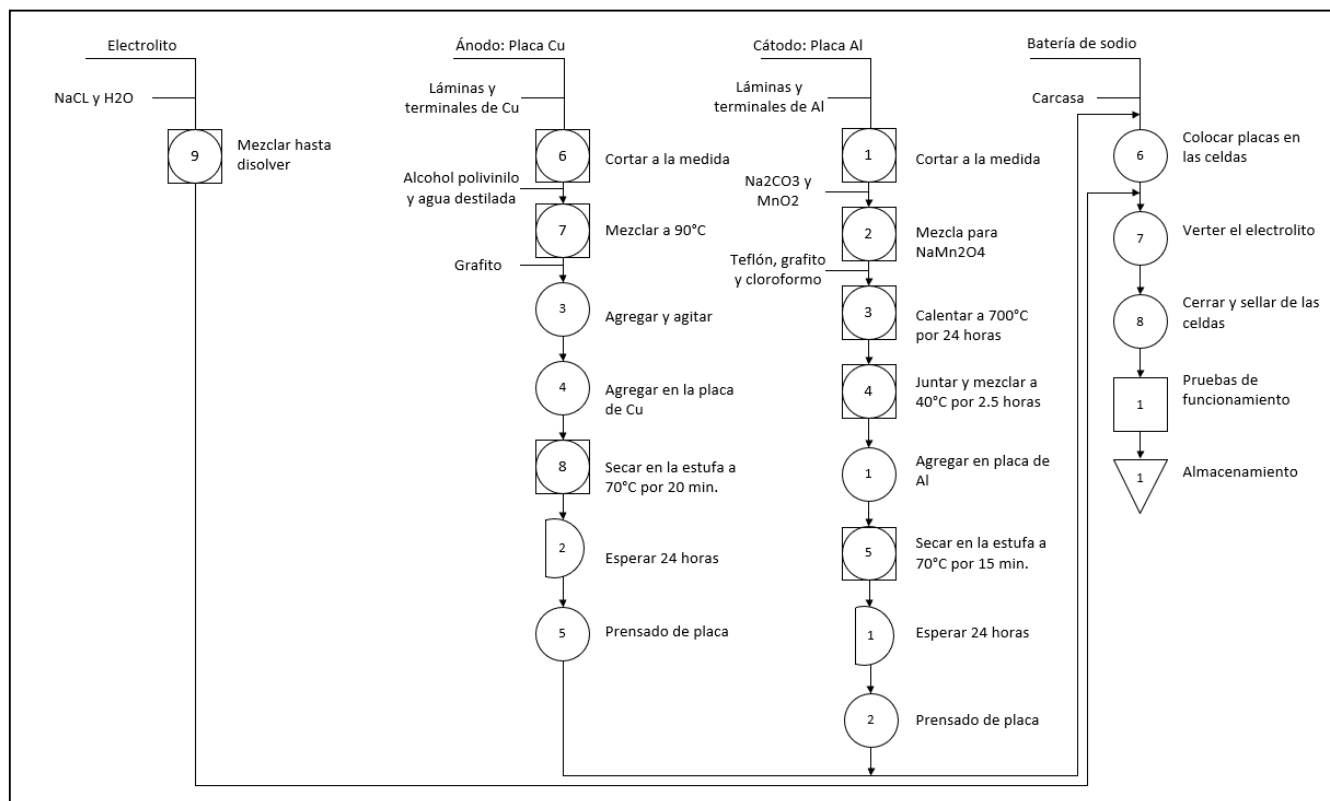
Para comprobar la funcionalidad en la transmisión de voltaje entre celdas con el diseño de celda individual elegido, se procedió a hacer un experimento con dos celdas conectadas en un arreglo en serie. Al medir con el multímetro, quedó demostrado que sí era posible la suma de los voltajes de cada celda, dando como resultado un total de 1.04 V.





**Experimento con dos celdas iguales**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

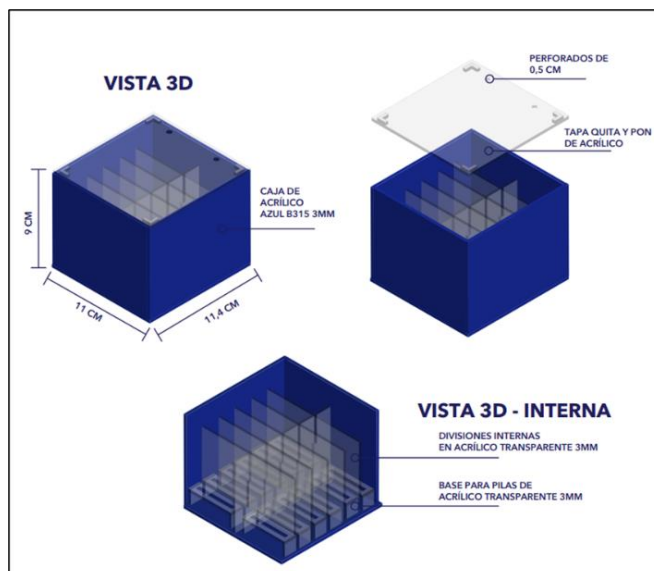
Estos cambios representaron una reestructuración de los diagramas y planos preliminares ideados para este proyecto, entre ellos, el diagrama de ensamble, el cual con los nuevos arreglos se presenta de esta manera:



**Nuevo diagrama del proceso de ensamble para la batería de sodio**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**



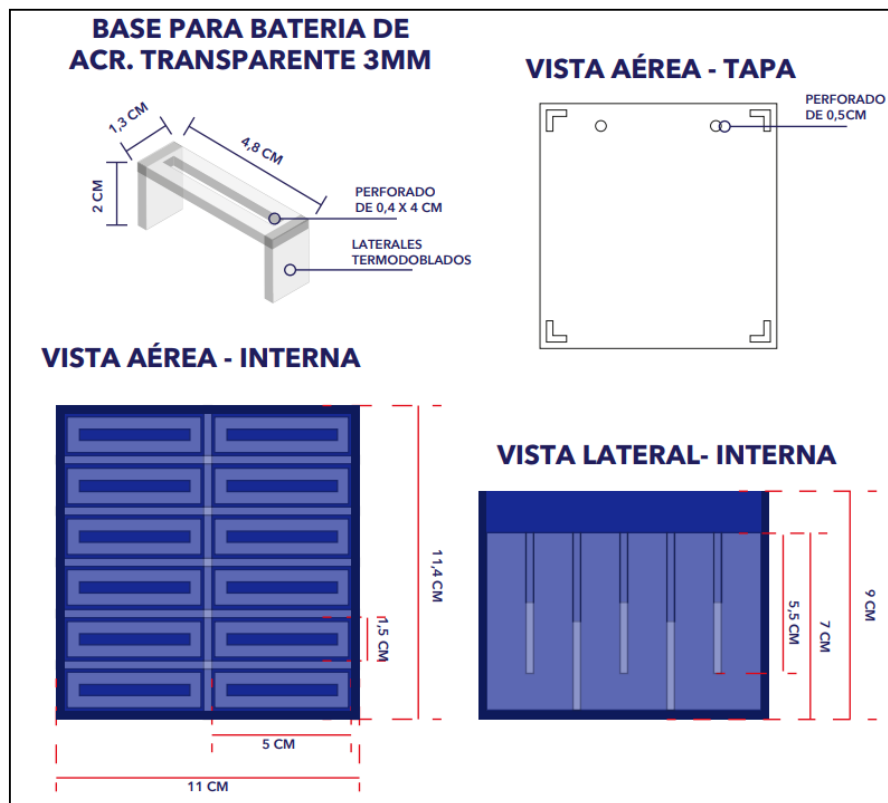
El chasis de la batería fue diseñado para albergar el total de celdas, tomando en consideración que cada uno de los electrodos (placas) tiene una medida de 4x3 cm. Las medidas finales fueron de 11.4x9x11 cm y se fabricó en acrílico debido a que es un material polimérico que permite la reacción de la celda y no influye negativamente.



**Vista 3D del chasis del prototipo de la batería de sodio**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

Para garantizar la estabilidad y seguridad en el diseño, se implementó una base adaptada a las dimensiones y forma de las placas, permitió sujetarlas de manera firme y evitar cualquier contacto entre electrodos de una misma celda. Esta característica era crucial para el correcto funcionamiento del sistema, pues el contacto entre electrodos de una misma celda interrumpe la reacción electroquímica y, en consecuencia, no genera voltaje.





**Medidas bidimensionales del prototipo de la batería de sodio**  
**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

Una vez armada la batería, conectando electrodos de polaridad contraria en un arreglo en serie entre celdas, utilizando cables de cobre de calibre 14 y con conectores machos en cada placa, se procedió a medir el voltaje utilizando un multímetro para verificar que estuviera transmitiendo el voltaje proyectado en las estimaciones.

Para verificar el correcto funcionamiento del prototipo de batería de sodio, se elaboró una lista de verificación que abarca diversos aspectos críticos del diseño y la construcción. Se llevaron a cabo las pruebas midiendo voltaje, evaluando el comportamiento del electrolito y asegurándose de que los cables estuviesen en contacto con las placas.

#### Lista de verificación de funcionamiento del prototipo

DESCRIPCIÓN	SE CUMPLIÓ
Los electrodos de referencia transmiten ~3 V	X
No existe contacto entre los electrodos	X
Los cables no suponen un problema en la transmisión de voltaje	X



El electrolito se comparte entre electrodos, pero no entre celdas (no hay fugas)	X
Las medidas estimadas fueron pertinentes para el tamaño de los conectores y los cables	X

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

A continuación, evidencia fotográfica del voltaje medido en el prototipo de la batería de sodio.



**Medición con multímetro del prototipo de la batería de sodio.**

**Fuente: González, Leal y Rodríguez (2024)**

El resultado al medir la batería fue de 3 V, lo cual cumple con el valor objetivo establecido al principio, por lo que se determina que el prototipo es exitoso.

## CONCLUSIONES

Para el diseño de la batería de sodio, se elaboró un modelo técnico en tres dimensiones para entender cómo debería funcionar la batería y eso llevó al planteamiento de un diagrama de proceso del ensamble que señala cómo debe ser construida cada una de sus partes. Este diagrama sirvió como diseño fundamental para ser las bases de la siguiente parte de la investigación.

Posteriormente, se ejecutó el proceso de construcción del prototipo, sintetizando los componentes elegidos de la batería. Se optó por óxido de manganeso sodio para el cátodo, adherido en placas de aluminio; polvo grafitico con alcohol polivinílico como ánodo, adherido en placas de cobre; y tetrafluoroborato de sodio como electrolito, siendo estos los materiales iniciales de prueba para el prototipo que permitirían evaluar los resultados con componentes diversos, para luego definir las dimensiones del chasis en base al tamaño de las placas para los procedimientos por venir. Estos materiales fueron elegidos por revisión bibliográfica de diversos autores en materia de baterías de



sodio, sin embargo, también se evaluaron disoluciones de cloruro de sodio y clorato de sodio como posibles electrolitos.

Una vez establecidos los materiales a utilizar en definitiva en las pruebas reales, se procedió a realizar pruebas de verificación de funcionamiento mediante mediciones de voltaje, diferentes tamaños de placas y diferentes electrolitos. Se decidió utilizar placas de 4x3 centímetros, un chasis de 11x9x11,4 centímetros, y debido a su mejor rendimiento, una disolución de cloruro de sodio como electrolito.

La batería de sodio fue arreglada en serie, con un total de 6 celdas individuales capaces de producir ~0.55 V, por lo que en total midió un voltaje de 3V. Este valor estuvo dentro de los valores meta objetivo así que se pasó a comprobar su comportamiento real en función de lo esperado con una lista de verificación. Se concluyó que el objetivo cumplió con lo requerido así que se consideró un prototipo exitoso.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias, F. (2012). **El Proyecto de Investigación**. 6ª edición. Venezuela: Editorial Episteme.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1991). **Metodología de la investigación**. 1ª edición. México: McGraw Hill Interamericana.

Kendall, K. y Kendall, J. (2011). **Análisis y diseños de sistemas**. 8ª edición. México: Pearson Educación.

Mogensen, R. (2020). **Realization of Sodium-ion Batteries: From Electrode to Electrolyte Materials**. Suecia: Upsala Universitet.

Plett, G. (2015). **Battery Management Systems: Battery Modeling**. Volumen I. Estados Unidos: Artech House.