

Desarrollo de tecnología para producir hidrógeno en la Antártida Argentina

Daniel Sanchez Floreal¹, Daniel Schiavo², Ricardo Aiello², Fernando Ruiz¹,
Christian Chiacchio¹, María José Lavorante²

¹ Departamento de Mecánica Aplicada. Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF). San Juan Bautista de La Salle 4397, Villa Martelli, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

² División de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables. Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF). San Juan Bautista de La Salle 4397, Villa Martelli, Prov. de Buenos Aires, Argentina.
María José Lavorante mlavorante@citedef.gob.ar; mjlavorante@gmail.com

Abstract. La División de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables con el apoyo del Departamento de Mecánica Aplicada, ambos pertenecientes al Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, trabajamos en el desarrollo de una celda de electrólisis de agua para obtener un combustible limpio: el hidrógeno. Así se proporcionaría de una fuente de energía confiable, esencial para el funcionamiento de dispositivos de comunicación y otros equipos electrónicos en los que las fuerzas militares dependen para su labor diaria. Otro beneficio adicional, es la disminución del consumo de combustibles fósiles y el costo de su traslado a las Bases Antárticas, ya que puede producirse in situ. La electrólisis del agua emplea el excedente de energía renovable para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. En este trabajo se describirán las tareas planteadas en el marco del proyecto PIDDEF 04/2020, destacando los distintos prototipos construidos.

Keywords: celda de electrólisis, producción de hidrógeno, Bases Antárticas

1 Introducción

La Antártida posee condiciones climáticas extremas y desafiantes, no solo para su habitabilidad sino también para el desarrollo de actividades de investigación. El aprovisionamiento de la infraestructura necesaria para el correcto desenvolvimiento de los distintos tipos de tareas, a lo largo del año, se presenta entonces como primordial. La energía por su parte se convierte entonces, en un pilar de la infraestructura de apoyo necesaria para la calefacción, iluminación, equipamiento científico, potabilización del agua y su posterior tratamiento [1]. Aunque ha habido avances en los últimos años, los combustibles fósiles, en particular el diésel, continúan siendo la principal fuente de generación de electricidad y calor. La electricidad se produce utilizando motores de combustión interna y generadores de inducción, que son ventajosos por su eficiencia, estabilidad y consistencia como

fuentes de energía, independientemente de las condiciones climáticas, a diferencia de las fuentes renovables de energía. Entonces, en un ambiente como este, uno de los elementos más preocupantes vinculado con el impacto que pueden tener las actividades humanas, es el uso de combustibles fósiles. Su empleo, genera gases de efecto invernadero, el riesgo de que ocurran grandes accidentes ambientales al transportar el combustible es considerable y la dificultad que presenta la logística en ese continente [2]. En relación con este último punto, el manejo y transporte de los combustibles fósiles es muy elevado [3]. La literatura sugiere que en algunas bases su costo final es hasta siete veces mayor en comparación con el del lugar de origen [4]. Por todos esos motivos, es que la implementación del uso de energías renovables está cobrando cada vez más relevancia. Hay muchos trabajos en donde se hacen distintos tipos de relevamientos sobre el uso de recursos renovables. Win et al., ofrece un panorama general sobre las tendencias actuales en la producción y consumo de electricidad y analiza la situación actual del uso de energías renovables en las estaciones de investigación situadas en el continente antártico [1]. Lucci et al., presenta el avance en la implementación de energía renovable en las instalaciones antárticas, ofreciendo una base de datos interactiva y un mapa diseñado específicamente para este fin. Además, han visualizado cuatro objetivos clave para el desarrollo de sistemas de energía renovable: reducir los costos de combustible, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero alineándose con las metas nacionales de descarbonización, garantizar el suministro eléctrico para el equipo científico durante los meses de invierno, y desarrollar y/o probar nuevas tecnologías [5].

El hidrógeno se percibe como un combustible limpio, porque cuando se utiliza en sistemas de combustión o en pilas de combustible diseñadas para este propósito, produce solo vapor de agua como subproducto. En términos de propiedades, el hidrógeno tiene una alta energía por unidad de masa. Su energía específica es de 120 [MJ/kg] a 0° Celsius y 1 atmósfera, pero tiene una baja densidad energética por volumen, de 0.01 [MJ/L] bajo las mismas condiciones de temperatura y presión. A diferencia de los combustibles convencionales, tiene una estructura molecular muy pequeña y ligera, dado que es el elemento más liviano de la tabla periódica, pero es importante resaltar su valor calorífico superior (HHV) de 141.9 [MJ/kg], que es casi tres veces el de la gasolina. El hidrógeno puede producirse a partir de cualquier tipo de fuente de energía, pero es mucho más atractivo si se obtiene a partir de fuentes renovables. El método que contempla el uso de energías proveniente de recursos renovables como son el sol y el viento, es la electrólisis del agua. Es un método sostenible, de elevada madurez tecnológica y ampliamente aceptado para la producción industrial de hidrógeno puro. Además, se considera una solución crucial para enfrentar la descarbonización, uno de los principales objetivos de muchos países para mitigar el impacto del cambio climático.

Para comprender completamente el proceso de electrólisis, es útil examinar el término en sí mismo. La palabra "electrólisis" proviene del griego, donde el sufijo "lisis" significa división o separación, y el prefijo "electro" se refiere a la corriente eléctrica. Por lo tanto, la electrólisis se define como el proceso mediante el cual un compuesto se descompone en sus elementos constituyentes al aplicar una corriente eléctrica a través de él. Dado que la electrólisis no se produce por sí sola, es un cambio químico no espontáneo, por lo que sólo puede ocurrir si se suministra energía

eléctrica. Por lo tanto, la energía eléctrica se convierte en la fuerza que impulsora del proceso.

Este proceso se realiza en una celda electrolítica, que está compuesta por dos electrodos (el ánodo y el cátodo), un medio conductor de iones (el electrolito) y una fuente de alimentación que proporciona la corriente continua requerida para la reacción. El electrolito es fundamental en estas celdas, ya que actúa como el medio conductor que transporta las especies iónicas entre los electrodos. Su función es permitir el paso de iones mientras bloquea el flujo de electrones. Los electrodos son las superficies donde ocurren las reacciones redox: el cátodo es el electrodo donde se lleva a cabo la reducción, y el ánodo es el electrodo donde ocurre la oxidación. El separador o membrana divide físicamente los productos gaseosos generados en los compartimentos catódico y anódico, evitando el contacto directo entre los electrodos y previniendo cortocircuitos en la celda. Además, la membrana tiene la función adicional de facilitar de manera selectiva el paso de ciertos componentes. La Figura 1 muestra un esquema simplificado de una celda de electrólisis de agua.

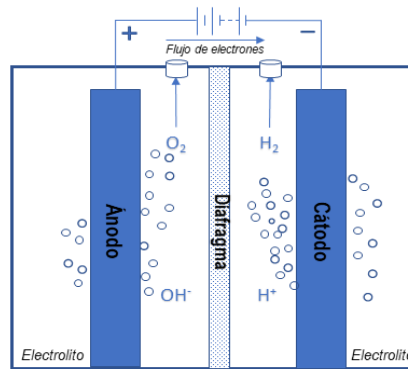
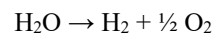


Fig. 1. Esquema básico de una celda de electrólisis del agua.

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el cual se utiliza electricidad para dividir el agua en dos sustancias gaseosas: hidrógeno y oxígeno. La reacción global de la electrólisis del agua se expresa como:



Se pueden distinguir cuatro tecnologías según el electrolito utilizado en la celda de electrólisis: la alcalina; la de electrolito polimérico, la de membrana de intercambio de aniones y la de óxido sólido. El proceso general subyacente es el mismo en las cuatro tecnologías: se alimenta agua a una celda electroquímica en la cual el hidrógeno se genera en el electrodo negativo (cátodo) y el oxígeno en el electrodo positivo (ánodo) cuando se aplica un voltaje suficiente a la celda.

1.1 Objetivos del Proyecto PIDDEF 04/2020

En una primera etapa del proyecto, el trabajo se focalizó en el incremento de la superficie activa de los electrodos mediante la incorporación de una geometría/topología definida sobre su superficie, a través del mecanizado de piezas de metales ferrosos. Con la incorporación de estas geometrías se buscaba facilitar el desprendimiento de los productos gaseosos formados, así como el incremento de la superficie activa. El desempeño de las topologías se desarrolló mediante la determinación de curvas de polarización (potencial (V) en función de la densidad de corriente (i)) a distintas distancias entre electrodos y temperaturas. En una segunda etapa del proyecto y luego de realizar el análisis de los resultados obtenidos en la primera etapa, se comenzó con el diseño del prototipo incluyendo, el cuerpo del dispositivo, el sistema de recolección y salida de los gases y la conexión de los electrodos. Estas tareas permitieron seleccionar el diseño más adecuado y pasar a la etapa de construcción. Una vez ensambladas las piezas, se verificó la estanqueidad del conjunto y se evaluó la funcionalidad y confiabilidad de la celda de electrólisis. Para ello se efectuaron ensayos en el laboratorio variando parámetros de operación como temperatura y concentración de electrolito. Se determinó su comportamiento mediante medidas de corriente y su posterior análisis mediante curvas de polarización. Se analizaron, además, posibles propuestas de mejoras.

2 Prototipos construidos

2.1 Electrodo

Se construyeron y evaluaron cuatro geometrías sobre la superficie de los electrodos, a saber: pines, canales en w, ondulados I y II. La Figura 2 muestra tres tipos de ellos.



Fig. 2. Geometrías sobre la superficie de los electrodos: a) pines; b) ondulados I y c) ondulados II.

Para construir la topología tipo pin, se empleó una chapa plana de acero inoxidable 316L con dimensiones de 110 [mm] de largo x 111 [mm] de ancho x 3 [mm] de espesor. Los pines se generan luego de efectuar canales rectos horizontales y verticales que se cruzan, con dimensiones de 90 [mm] de largo x 1 [mm] de ancho x 1 [mm] de profundidad. Los canales se realizaron con una fresadora universal utilizando una sierra circular de acero rápido de 8,0 x 1,0 [mm] de diámetro (SINPAR). Los pines, con sus paredes laterales de 2 [mm] de largo x 1 [mm] de

ancho, aumentan el área activa del electrodo en aproximadamente un 83% en comparación con un electrodo sin ellos (ver Figura 2.a).

La topología de electrodos con canales en w se realizó con una fresadora universal y una fresa de disco de dos cortes a 45°. Para esta topología como la de pines, fue necesario diseñar un dispositivo específico que albergara el material del electrodo, garantizando así un mecanizado preciso y su correcta ubicación. Las dimensiones seleccionadas para los canales fueron de 2,5 [mm] de ancho, 1 [mm] de profundidad y 90 [mm] de altura. La incorporación de estos canales aumentó aproximadamente el área activa en un 22,8% en comparación con la de los electrodos originales planos.

El par de electrodos denominado, ondulados I, cuenta con dos grupos de canales paralelos y curvos, con el propósito de direccionar las burbujas generadas en la superficie y facilitar su desprendimiento. Para su construcción se utilizó una hoja de acero inoxidable 316L de un milímetro de espesor, colocando un recorte de 130 x 110 [mm] sobre un soporte que hospeda dos varillas de 4 [mm] de diámetro separadas por diez [mm]. Colocando una varilla del mismo diámetro sobre la placa y entre las dos varillas inferiores, y presionando el conjunto, se produce la deformación de la placa, generando una canaleta. Este procedimiento se repite, produciendo un electrodo con ocho canales con áreas planas en el medio y a ambos lados. Con el posterior mecanizado, el par de electrodos alcanzó dimensiones de 109 x 110 x 1 [mm], lo que muestra un aumento en el área expuesta del orden del 9.21% en comparación con un electrodo plano (ver Figura 2.b.) [6].

Para que los canales quedaran con mejor terminación y paralelos entre sí se construyó un dispositivo formado por dos piezas, una con cuatro ranuras inferiores y otra superior con tres ranuras que acoplan con la inferior dejando un huelgo de 2 [mm]. Colocando el recorte de chapa entre las dos piezas y prensándolas, se produce el conformado de tres canales a la vez. Desplazando la chapa se puede ir conformando de a tres canales adicionales por prensada. Para esto, se utilizó una prensa marca Carver de Laboratorio con una capacidad máxima de 20 toneladas. La pareja de electrodos quedó con dimensiones de 106 x 110 x 2 [mm], lo que muestra un aumento en el área expuesta del orden del 21% en comparación con electrodos planos (Figura 2.c.) [6].

2.2 Celda de evaluación de electrodos

Como era necesario conocer el desempeño de los distintos tipos de electrodos a diferentes distancias entre ellos, se diseñó una celda, con posicionado a tornillo. La celda fue planificada con placas de acrílico cristal pegadas entre sí con dispersión acrílica, formando de esta forma un contenedor que permite el llenado con electrolito, el montaje de un separador en su parte central y de dos electrodos a los lados del separador. Los electrodos están montados mediante tornillos de acero inoxidable 304 en porta electrodos de acrílico cristal, los cuales tienen un doble apoyo deslizante sobre la celda en sus extremos. Estas superficies de contacto son oblicuas a fin de guiar y mantener la posición y paralelismo de los electrodos entre sí y respecto del separador. La posición de los porta electrodos, respecto del separador es regulable manualmente mediante el giro de los tornillos. En la pared se fijan las tuercas y el tornillo se enrosca permitiendo el posicionado del porta electrodo mediante el giro del mismo. En el centro del contenedor hay un canal que sirve de guía para el marco que sostiene al material empleado como separador. La tapa superior se fija mediante

tornillos y posee agujeros de venteo y para el conexionado de la alimentación eléctrica, así como una regleta graduada para determinar de forma más ágil la distancia entre electrodos. La Figura 3, muestra una imagen de la celda.



Fig. 3. Celda de evaluación con posicionado a tornillo.

2.3 Celdas de electrolisis alcalinas de agua

En las celdas de electrólisis alcalina, se pueden utilizar dos configuraciones, la monopolar y bipolar. En la monopolar, electrodos alternados se conectan directamente a los terminales opuestos de la fuente de alimentación de corriente continua, formando así varias celdas individuales en paralelo. El voltaje total aplicado a la celda de electrólisis es igual al voltaje aplicado a cada par de electrodos dentro de la celda. En la configuración bipolar, son únicamente los electrodos terminales (externos) los que se encuentran conectados a la fuente de corriente continua. En este arreglo, cada par de electrodos adyacentes constituye una celda unitaria, y estas celdas unitarias están interconectadas eléctricamente a través de la solución electrolítica que actúa como medio conductor. Esto quiere decir que, en una configuración bipolar, las celdas están conectadas en serie, lo que significa que el voltaje total de la celda es la suma de los voltajes de cada celda unitaria. Debido a las diferencias que presentan ambas configuraciones en relación a la conexión de los electrodos con la fuente de alimentación, las reacciones electroquímicas y los potenciales de operación, varían. En la configuración monopolar, una única reacción electroquímica ocurre a ambos lados de un mismo electrodo, es decir que sobre un electrodo se desarrolla la reacción de evolución de oxígeno y en el otro únicamente, la reacción de evolución de hidrogeno. En cambio, en la configuración bipolar, en lados opuestos de un mismo electrodo (esto sucede solo, en los electrodos que no están directamente conectados a la fuente de alimentación), se llevan a cabo, simultáneamente dos reacciones electroquímicas diferentes. Es decir, en un lado del electrodo ocurre la reacción de evolución de hidrogeno y en el otro la de oxígeno. Quedan exceptuados de este comportamiento, los dos electrodos terminales que están conectados a la fuente de corriente continua y que se comportarían como los de la configuración monopolar. Los potenciales de operación de la celda y el voltaje total que debe suministrarse por la fuente de alimentación son bastante diferentes para estas dos configuraciones; un valor típico para la configuración monopolar es de 2,2 [V], mientras que para la configuración bipolar es de $2.2 \times (n - 1)$ [V], donde n es el número de electrodos [7].

Dado que estas celdas pretendían evaluarse con recursos renovables disponibles en las Bases Antárticas, se esquematizaron y construyeron ambas configuraciones. La celda de configuración monopolar fue diseñada en forma modular, lo que permitirá sumar celdas unidad de acuerdo con el volumen de hidrógeno que se requiera generar. En primera instancia y para los primeros ensayos este prototipo cuenta con una sola celda unidad. Esta celda posee electrodos de acero inoxidable distanciados por separadores de acrílico a través de juntas elásticas y un diafragma. La conexión galvánica entre los electrodos es por medio de lengüetas que poseen los electrodos. En los extremos posee dos tapas también de acero inoxidable con las que se realiza el prensado del conjunto por medio de tensores ajustables con tuercas del mismo material. Las juntas elásticas cumplen la función de sellado entre los electrodos, separadores, diafragmas y tapas. En una de las tapas externas, en la parte inferior se encuentran dos racores para el conexionado e ingreso del flujo electrolítico y en la parte superior otros dos para la recolección de los gases de hidrógeno y de oxígeno. La Figura 4.a., muestra una imagen del prototipo monopolar.

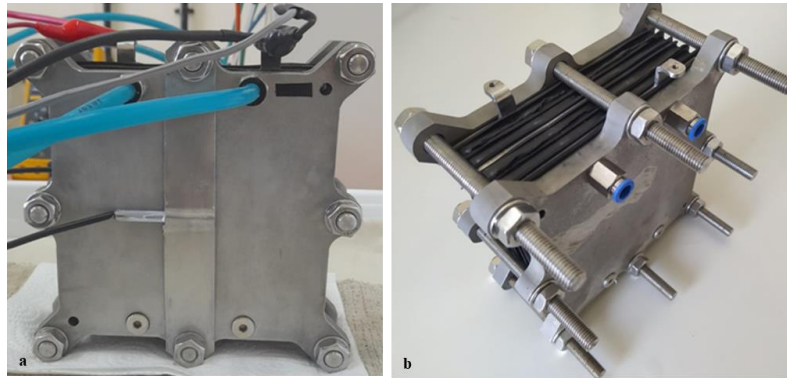


Fig. 4. Celdas de electrolisis alcalina de configuración: a) monopolar y b) bipolar.

La configuración bipolar también fue diseñada en forma modular. Para los primeros ensayos este prototipo se construyó con tres electrodos distanciados por separadores de acrílico a través de juntas elásticas y un diafragma central entre cada electrodo. La Figura 4.b., muestra una imagen del prototipo bipolar.

2.4 Sistema de adquisición de datos

Para poder determinar el funcionamiento de las celdas de electrólisis durante largos períodos de operación era necesario contar con un sistema de adquisición de variables de importancia como son el voltaje, la corriente y la temperatura. Debido al tipo de materiales seleccionadas para su construcción y la configuración, el voltaje de operación puede variar, para producir la misma cantidad de hidrógeno. Por ese motivo al voltaje se lo vinculado directamente el consumo de energía y la eficiencia eléctrica. La densidad de corriente, que también está relacionada con la eficiencia energética, determina la velocidad de producción de hidrógeno. Una mayor densidad de corriente significa una mayor velocidad de las reacciones electroquímicas. La temperatura de operación, debido a que el voltaje de equilibrio disminuye, a medida que aumenta la temperatura. Se poseía una adquisidora de un proyecto anterior, pero las tareas

planteadas en este proyecto requerían incrementar el rango de medición de corriente continua de 30 a 50 [A], y de una mejora cualitativa de la precisión, al reducir el margen de error en torno al 0,1%. Dado que la corriente es la variable vinculada con la producción de hidrógeno, al evaluar el desempeño del prototipo, era necesario lograr una alta precisión y poder determinar los valores de corriente que se alcanzaran por los prototipos. Bajo la misma justificación era necesario incrementar el rango de medición de tensión continua de 5 a 30 [V], y reducir cualitativamente el margen de error. Esto, permitió compatibilizar el equipo con los 24 [V] presentes en paneles solares, y lograr una alta precisión al medir la tensión. Con el apoyo de la División Comunicaciones y Telemetría del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, y del empleo de su instrumental, se decidió desarrollar sensores de tipo shunt. Inicialmente se construyó un shunt de prueba con Nicrom, material que puede resistir altas temperaturas, y la oxidación. La Figura 5.a., muestra una imagen del shunt de Nicrom. Para luego, construir uno de Kanthal A1, debido a que su valor de resistencia eléctrica, al variar la temperatura, se mantiene constante. El shunt se montó en un gabinete, refrigerado a una temperatura menor a 50 [°C] (zona de alta linealidad) con un ventilador de 3 pulgadas, 4.200 [rpm], sin escobillas y un caudal de 1,60 [m³/min], evitándose así el ruido eléctrico (ver Figura 5.b.). Para poder medir con precisión las bajas tensiones presentes en el shunt, se optó por una electrónica basada en un conversor ADC (siglas del inglés Analog to Digital Converter) de muy bajo ruido eléctrico y alta resolución, configurado en modo diferencial.

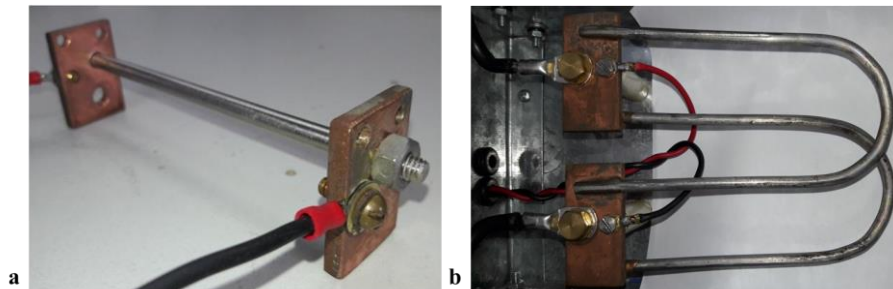


Fig. 5. Shunts: a) Nicrom y b) Kanthal A1.

2.5 Montaje del sistema

A raíz de los distintos ensayos realizados, se detectó la necesidad de diseñar y construir otros accesorios que faciliten el funcionamiento de los prototipos. Estos accesorios incluyeron: a los reservorios de electrolito, a los filtros lavadores de los gases y con ellos, la necesidad de montarlos en una base para poder trabajar de forma segura.

Para el suministro de electrolito se diseñaron recipientes cuya finalidad era mantener el nivel de llenado de acuerdo con el ensayo. Estos recipientes fueron construidos en acrílico cristal para tener un acceso visual del volumen de electrolito contenido en su interior. El llenado y mantenimiento del nivel de electrolito, en cada uno de los compartimentos del prototipo, está basado en el principio de vasos

comunicantes. Para el lavado de los gases producidos, se concibieron recipientes filtros de manera tal que dichos gases antes de ser recolectados sean previamente filtrados a través de su circulación por agua destilada. El acrílico cristal se empleó como material constructivo, con el fin de tener un acceso visual del volumen de agua destilada contenida en su interior y la evolución correcta del proceso. La base se elaboró con el propósito de optimizar la posición de los tubos flexibles necesarios para su correcta manipulación y conexión y la posición del prototipo para su fácil acceso. En ella todos los accesorios se encuentran debidamente sujetos, para evitar su movimiento y posible desconexión. Cuenta también, con barras antiderrame, por eventual pérdida de electrolito. La Figura 6 muestra una vista frontal del montaje.

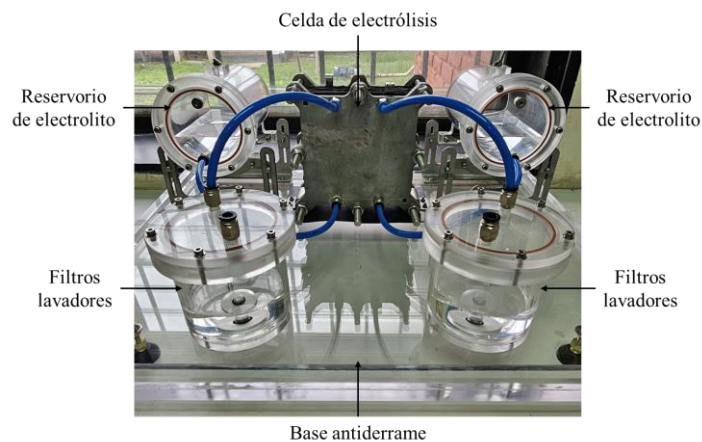


Fig. 6. Vista frontal del montaje.

3 Conclusiones

A lo largo de este proyecto PIDDEF se han diseñado, construido y evaluado, componentes esenciales para las celdas de electrólisis de agua. Se han construido varias geometrías para los electrodos alcanzando particularmente con una de ellas, las metas propuestas vinculadas a la densidad de corriente, a una determinada diferencia de potencial y temperatura de operación. Se ha empleado un material de bajo costo, al que se logró mejorar su eficiencia. También se propusieron varios métodos de construcción, para la optimización de sus diseños.

Se han esquematizado, fabricado y analizado bajo distintas condiciones de operación, dos prototipos de configuración mono y bipolar, así como accesorios que facilitan su funcionamiento y una base que permite operarlos de manera segura.

El shunt desarrollado con el apoyo de la División Comunicaciones y Telemetría del CITEDEF, ha mejorado el dispositivo de adquisición de datos, ampliando los rangos de determinación de parámetros de importancia, como son la corriente y la tensión, incluyendo su precisión.

En este punto se quisiera remarcar la relevancia del trabajo multidisciplinario. Las tareas mancomunadas entre la División de Investigación y Desarrollo en Energías

Renovables, el Departamento de Mecánica Aplicada, el Departamento de Prototipos y la División Comunicaciones y Telemetría posibilitaron el desarrollo de prototipos que presentan mejoras sustanciales en cuanto diseño, robustez y materiales constructivos. Prototipos que han tenido una etapa de evaluación e incorporación de mejoras y que luego permitieron su caracterización durante largos periodos de operación y bajo distintas condiciones de trabajo.

Una de las celdas de electrólisis, en el marco de un nuevo proyecto, que se realiza en conjunto con la Dirección General de Investigación del Ejército Argentino y el Comando Conjunto Antártico, tuvo la posibilidad de ser evaluada exitosamente, como prueba de concepto, en la Base Esperanza de la Antártida Argentina, haciendo uso de los recursos renovables allí disponibles y con personal entrenado para tal fin. La información recolectada, permitirá al grupo de trabajo seguir incorporándole mejoras para una futura evaluación, de mayor duración, en el Continente Antártico.

Acknowledgments. El grupo de investigadores y desarrollistas quiere agradecer al Ministerio de Defensa y al Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa por el apoyo otorgado mediante el subsidio PIDDEF 04/2020. Muy especialmente a Diego Igareta, Pablo Perez y Carlos Chaile integrantes del Departamento de Mecánica Aplicada, a Sergio Lara de la División de Comunicaciones y Telemetría y al Departamento de Prototipos que de manera desinteresada brindaron su trabajo y conocimiento para alcanzar los resultados que se han presentado en este trabajo.

4 Referencias

1. de Witt, M., Chung, C., Lee, J.: Mapping Renewable Energy among Antarctic Research Station. *Sustainability*, 16, 426 (2024)
2. de Christo, T.M., Fardin, J.F., Simonetti, D.S.L., Encarnacao, L.F., de Alvarez, C.E.: Design and analysis of hybrid energy systems: The Brazilian Antarctic Station case. *Renewable Energy*, 88, pp. 236-246 (2016)
3. Boccaletti, C., Di Felice, P., Santini, E.: Integration of renewable power systems in an Antarctic Research Station. *Renewable Energy*, 62, pp. 582-591 (2014)
4. Tin, T., Sovacool, B.K., Blake, D., Magill, P., El Nagggar, S., Lidstrom, S., Ishizawa, K., Berte, J.: Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica. *Renewable Energy*, 35, pp. 1715-1723 (2010)
5. Lucci, J.J., Alegre, M., Vigna, L.: Renewables in Antarctica: an assessment of progress to decarbonize the energy matrix of research facilities. *Antarctic Science*, 34, pp. 374-378 (2022)
6. Lavorante, M.J., Vichera Mola, N.J., Sanchez, D.F.: Study of the behavior of electrodes with corrugated channels for alkaline electrolysis of water. Libro de Actas del VIII Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advance Batteries (HYCELTEC 2022), pp. 182-184 (2022)
7. Zeng, K., Zhang, D.: Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 36, pp. 307–326 36 (2010)