

Evaluación de la viabilidad tecnológica de la producción de energía eléctrica y gas hidrógeno con el potencial de energía solar fotovoltaica y agua sintética con la salinidad del mar respecto a cloruro de sodio para uso domiciliario en la isla de San Andrés

José Andrés Segura Flórez

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C.
2025

Evaluación de la viabilidad tecnológica de la producción de energía eléctrica y gas hidrógeno con el potencial de energía solar fotovoltaica y agua sintética con la salinidad del mar respecto a cloruro de sodio para uso domiciliario en la isla de San Andrés

José Andrés Segura Flórez

Documento final del trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Tecnologías Limpias

Directora
NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS
Ingeniera Química
Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS AMBIENTALES
BOGOTÁ D.C.
2025

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, noviembre de 2025

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada paso de este camino. A mis padres, por su amor, fortaleza y por estar siempre presentes, incluso en los momentos más difíciles, especialmente durante la dura batalla contra el cáncer que juntos logramos superar. A mi novia, por su comprensión, paciencia y aliento constante, que me motivaron a alcanzar este gran logro.

Este trabajo de grado no solo representa un requisito académico para obtener el título de Magister en Tecnologías Limpias, sino también el cierre de una etapa desafiante en mi vida, marcada por la adversidad, pero también por la resiliencia y el acompañamiento de quienes más amo.

Agradezco de manera especial a la profesora Nidia, por su confianza, guía y apoyo permanente a lo largo de este proceso. Asimismo, extendo mi gratitud a la Universidad Santo Tomás, por brindarme siempre las herramientas y el respaldo necesarios para culminar con éxito esta etapa.

A todos ustedes, mil gracias.

1.	ABSTRACT.....	2
2.	INTRODUCCIÓN	4
3.	OBJETIVOS.....	8
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	8
3.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	8
4.	MARCO REFERENCIAL.....	9
4.1	TEORÍA BASE.....	9
4.2	ESTADO ACTUAL, CIENTIFICO Y TECNOLÓGICO.	10
4.3	MARCO TEÓRICO	14
5.	DISEÑO METODOLÓGICO	19
5.1	TIPO DE METODOLOGÍA	19
5.2	ENFOQUE DE LA METODOLOGÍA.....	19
5.3	ACTIVIDADES Y HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS	21
5.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	23
5.5	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	24
5.6	RUTA METODOLÓGICA	25
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
6.1	Barreras y oportunidades para la transición energética.....	28
6.2	Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico	30
6.3	Producción mensual de energía por panel	32
6.4	Elaboración del prototipo	35
6.5	Resultados	38
6.6	Otros resultados.....	2
7.	CONCLUSIONES.....	5
8.	RECOMENDACIONES	7
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	8

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: METODOLOGÍA APLICADA AL DESARROLLO DEL TRABAJO.	21
TABLA 2: DATOS DE IRRADIACIÓN MENSUAL PROMEDIO EN LA ISLA DE SAN ANDRÉS.	31
TABLA 3. PRODUCCIÓN MENSUAL DE ENERGÍA EN KWH/PANEL	32
TABLA 4. GENERACIÓN DE ENERGÍA (KWH/MES) DURANTE EL AÑO	34
TABLA 5: EXCEDENTES DE ENERGÍA (KWH) A LO LARGO DEL AÑO	34
TABLA 6: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA 1 ÁNODO Y 1 CÁTODO. RÉPLICA 1.	38
TABLA 7: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA 1 ÁNODO Y 1 CÁTODO. RÉPLICA 2	39
TABLA 8: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA 2 ÁNODOS Y 2 CÁTODOS. RÉPLICA 1	39
TABLA 9: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA 2 ÁNODOS Y 2 CÁTODOS RÉPLICA 2	41
TABLA 10: HIDROGENO PRODUCIDO POR KWH CONSUMIDO USANDO 1 ÁNODO Y 1 CÁTODO CÁTODO RÉPLICA 1	45
TABLA 11: HIDROGENO PRODUCIDO POR KWH CONSUMIDO USANDO 1 ÁNODO Y 1 CÁTODO RÉPLICA 2	45
TABLA 12: HIDRÓGENO PRODUCIDO POR KWH CONSUMIDO USANDO 2 ÁNODOS Y 2 CÁTODOS. RÉPLICA 1.	46
TABLA 13: HIDROGENO PRODUCIDO POR KWH CONSUMIDO USANDO 2 ÁNODOS Y DOS CÁTODOS. RÉPLICA 2	46
TABLA 14: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO CON LA CORRIENTE Y CANTIDAD DE ELECTRODOS MÁS EFICIENTE	1

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: <i>RUTA METODOLÓGICA.</i>	25
FIGURA 2: PRODUCCIÓN DE HIDROGENO A TRAVÉS DEL TIEMPO PARA LOS DIFERENTES ENSAYOS	42
FIGURA 3: COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE PARA LOS DIFERENTES ENSAYOS.	42
FIGURA 4: H ₂ PRODUCIDO POR CADA KWH CONSUMIDO	0

RESUMEN

A partir de la energía eléctrica producida en San Andrés se calculó la energía solar fotovoltaica requerida para generar esta misma energía con base en el mes de mayor consumo que corresponde a agosto y a la menor radiación solar desde 2005 hasta 2023, que corresponde al mes de junio. Posteriormente, se consideró la posibilidad de vender excedentes de energía eléctrica a otros usuarios mediante la producción de hidrógeno verde por electrólisis; estos excedentes se determinaron con base en el excedente de energía solar fotovoltaica generada en los demás meses, respecto a junio, en los que se tiene mayor radiación solar. Se diseñó un prototipo experimental que emplea agua sintética con una salinidad similar a la del mar de San Andrés respecto a cloruro de sodio; además se implementó un diseño experimental con las siguientes variables independientes: número de pares de electrodos de acero inoxidable (1 y 2) e intensidad de corriente (2, 3 y 4 A); la variable dependiente fue el volumen de hidrógeno producido. La distancia entre electrodos fue constante de 2 cm. Los resultados muestran que se genera hidrógeno con mayor eficiencia a bajas corrientes y con 2 pares de electrodos, propiciando el desarrollo de soluciones energéticas más limpias y adaptadas al contexto insular. Se recomienda optimizar el prototipo, incorporar sistemas de recirculación de agua y evaluar el manejo de subproductos para maximizar la sostenibilidad del proceso.

Palabras claves: electrólisis, energía solar fotovoltaica, hidrógeno verde, isla de San Andrés, prototipo experimental

1. ABSTRACT

San Andrés Island, as part of Colombia's Non-Interconnected Zones (ZNI), faces serious limitations in access to essential public services, particularly electricity and natural gas. This situation affects most severely the population living in conditions of multidimensional poverty.

This thesis evaluates the technological feasibility of producing electric power and hydrogen gas from photovoltaic solar systems and seawater, as a sustainable alternative for household use on the island. A diagnosis of the local energy conditions was carried out, revealing a strong dependence on diesel-based thermoelectric generation, high costs, and an energy mix with significant emissions of greenhouse gases and air pollutants, including carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), carbon monoxide (CO), particulate matter and unburned organic compounds.

Based on the electric energy currently produced in San Andrés, the required photovoltaic solar energy to generate the same amount of electricity was estimated. For this purpose, two reference conditions were used: the month with the highest energy demand, August, and the month with the lowest solar radiation between 2005 and 2023, June.

The potential sale of surplus electric power to other users through green hydrogen production by electrolysis was then considered. These surpluses were determined from the excess photovoltaic solar energy generated in the remaining months, relative to June, when solar radiation is lower.

An experimental prototype was designed using synthetic water with a salinity, in terms of sodium chloride, similar to that of the sea surrounding San Andrés. In addition, an experimental design was implemented with the following independent variables: number of stainless-steel electrode pairs (1 and 2) and current intensity (2, 3 and 4 A). The dependent variable was the volume of hydrogen produced. The distance between electrodes was kept constant at 2 cm.

The results show that hydrogen is generated more efficiently at lower currents and with two pairs of electrodes, fostering the development of cleaner energy solutions adapted to the island context. It is recommended to optimize the prototype, incorporate water recirculation systems, and assess by-product management to maximize the sustainability of the process.

Keywords: electrolysis, experimental prototype, green hydrogen, photovoltaic solar energy, non-interconnected zones, San Andrés Island.

2. INTRODUCCIÓN

Para observar la problemática de acceso se debe tener en cuenta que San Andrés islas es una de las ZNI (Zonas no interconectadas) de Colombia, siendo esta isla la de mayor demanda de energía entre todas las ZNI, por lo cual el acceso a servicios públicos esenciales como la electricidad y el gas natural se ve considerablemente restringido, en particular para las personas en situación de pobreza.

Para el caso de su capital San Andrés cuenta con una población estimada de 55.265 habitantes de los cuales el 8,9% se encuentra en condiciones de pobreza multidimensional, por ende, un aproximado de 4.119 personas no cuentan con acceso a servicios básicos como la energía eléctrica y gas natural (DANE, 2018).

La implementación de energías renovables basadas en principios fotovoltaicos y electroquímicos se presentan como una solución técnicamente viable a las diferentes problemáticas sociales que atraviesa la isla, dado que aprovecha el elevado recurso solar disponible en la isla, reduce la dependencia de combustibles fósiles importados y contribuye a mitigar los impactos sociales asociados a los altos costos energéticos y a las emisiones contaminantes (Gómez et al., 2016), .

En el Grafico 1, que presenta la demanda de energía en las Zonas No Interconectadas (ZNI) por departamento para el año 2017, se evidencia que el Archipiélago de San Andrés concentra el 56,42 % de la demanda total, muy por encima de departamentos como Amazonas (10,39 %), Chocó (8,82 %), Nariño (7,26 %) y Vichada (7,60 %).

Este comportamiento confirma que San Andrés es la ZNI con mayor requerimiento energético del país, lo que refuerza la problemática previamente descrita respecto al acceso a servicios públicos esenciales, en particular la electricidad y el gas natural, especialmente para la población en situación de pobreza. En este contexto, la marcada concentración de la demanda energética en el archipiélago respalda la necesidad de analizar e implementar soluciones energéticas técnica, económica y ambientalmente viables, como los sistemas fotovoltaicos y electroquímicos, con el fin de reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los impactos sociales y ambientales asociados al modelo energético actual.

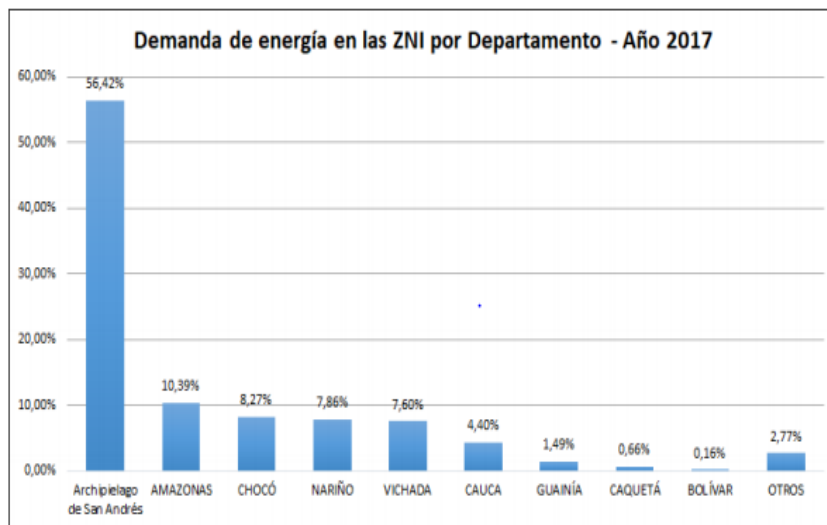


Gráfico 1. Demanda energética en las ZNI por departamento, Fuente: SUI (La Superintendencia de Servicios et al.,)

La instalación de sistemas fotovoltaicos en zonas no interconectadas en Colombia favorece de manera directa aspectos tanto sociales como ambientales, la aplicación de estos sistemas va asociada a la transformación de la matriz energética que pretende el país hacia las energías limpias orientada por la UPME; así mismo, la inclusión energética en estas zonas mejora los niveles de vida de las personas que habitan ahí aportándoles herramientas que facilitan las actividades cotidianas e incrementando los niveles de productividad (UPME, 2019).

A pesar de que esta alternativa constituye una de las opciones mas adecuadas para abordar los problemas energéticos de San Andrés Islas, los excedentes de energía generados por los sistemas solares fotovoltaicos en las islas no son aprovechados debido a la imposibilidad de ser comercializada con otros usuarios, según lo establecido en el artículo 74 de la ley 143 de 1994 donde establece que:

"ARTÍCULO 74. ÁREAS DE SERVICIO EXCLUSIVO.

En zonas rurales y en áreas urbanas de difícil gestión, la Comisión de Regulación de Energía y Gas podrá autorizar, mediante resolución motivada, la prestación del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica en áreas de servicio exclusivo, por un término que no podrá exceder de veinte (20) años, con el fin de garantizar la expansión de la cobertura y la continuidad y calidad del servicio.

En tales casos, la Comisión podrá establecer condiciones especiales para la remuneración de la inversión y para la prestación del servicio, con el fin de incentivar la expansión de la cobertura y la calidad del servicio.

La Comisión podrá prorrogar el término de la exclusividad, si las condiciones que dieron lugar a su otorgamiento persisten."

Por lo cual la mejor alternativa para los habitantes de la isla es darles un uso diferente a estos excedentes de energía generados por sus sistemas solares fotovoltaicos como lo puede ser la producción de hidrogeno verde con agua de mar.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la viabilidad tecnológica de la generación conjunta de energía eléctrica e hidrógeno verde, a partir de energía solar fotovoltaica y agua sintética con salinidad equivalente a la del mar de San Andrés en términos de concentración de cloruro de sodio, para su aplicación en sistemas energéticos residenciales y turísticos en la isla de San Andrés.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Hacer un diagnóstico de las condiciones energéticas en San Andrés Islas, a partir de bases de datos e información secundaria.
- Determinar la cantidad de energía eléctrica que puede obtenerse a partir de los excedentes de energía producidos mediante un sistema solar fotovoltaico con base en la demanda de energía de una familia
- Diseñar y evaluar, a escala de laboratorio, un prototipo experimental que utilice los excedentes de energía de un sistema solar fotovoltaico y agua sintética con salinidad equivalente a la del mar de San Andrés, con el fin de determinar las condiciones operativas básicas para la producción de hidrógeno mediante electrólisis y aportar evidencias sobre la viabilidad tecnológica del proceso.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 TEORÍA BASE

Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes renovables más prometedoras para la generación de electricidad, especialmente en regiones insulares con alta radiación solar, como San Andrés. Los sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico, y su eficiencia ha mejorado significativamente en la última década (Fraunhofer ISE, 2024). Además, la disminución de los costos de los paneles solares ha favorecido su adopción en aplicaciones residenciales y comunitarias (IRENA, 2023).

Producción de hidrógeno a partir de electrólisis del agua de mar

El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable, es considerado un vector energético clave para la transición energética. La electrólisis del agua de mar presenta desafíos técnicos debido a la corrosión y la formación de subproductos, pero recientes avances tecnológicos han mejorado la viabilidad de esta opción (Zeng & Zhang, 2023). Investigaciones recientes han desarrollado electrolizadores más resistentes y eficientes para operar directamente con agua de mar, lo que reduce la necesidad de pretratamiento (Zhao et al., 2022).

Integración de sistemas híbridos en islas

La integración de sistemas híbridos que combinan energía solar fotovoltaica y producción de hidrógeno es especialmente relevante para islas, donde el acceso a combustibles fósiles es limitado y costoso. Estudios de caso en islas del Caribe y el Pacífico han demostrado la viabilidad técnica y económica de estos sistemas para el suministro energético domiciliario, mejorando la resiliencia y reduciendo la dependencia de importaciones (Espinosa et al., 2021; Gómez et al., 2020).

Contexto local: Isla de San Andrés

San Andrés enfrenta retos energéticos debido a su aislamiento geográfico y dependencia de combustibles fósiles importados. La implementación de energías renovables y tecnologías de hidrógeno puede contribuir a la seguridad energética, sostenibilidad ambiental y reducción de costos para los hogares (UPME, 2022). Además, la abundancia de radiación solar y recursos hídricos marinos posiciona a la isla como un escenario ideal para la aplicación de estas tecnologías (Gómez et al., 2020).

4.2 ESTADO ACTUAL, CIENTIFICO Y TECNOLÓGICO.

La descarbonización de las matrices energéticas es una de las tendencias mundiales que más atañe al mundo, debido a la preocupación existente por el calentamiento global, provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales se producen en la generación de electricidad donde son utilizados combustibles fósiles como fuente primaria; Qatar es uno de los países líderes en la inclusión de nuevas fuentes alternativas para la generación de energía para su posterior comercialización (Casi et al., 2020).

El hidrógeno verde es todo aquel hidrógeno proveniente de la utilización de energías renovables y agua para su producción (LUIOCH, et al., 2020), viéndose así beneficiado por las tendencias actuales en la reducción del precio de la generación de energía a partir de dichas energías renovables.

A pesar de los posibles usos energéticos del hidrógeno verde, sus aplicaciones actuales van más encaminados a sectores como la petroquímica, metalurgia y la industria alimenticia (Hussein & Fahid, 2016); esto al contrario de ser un tropiezo para su producción muestra un impulso para la producción de hidrógeno verde, debido a su amplia demanda en diferentes sectores industriales, los cuales muestran una preferencia del hidrógeno verde sobre el hidrógeno gris debido a su compromiso con el medio ambiente.

El hidrógeno verde tiene un amplio potencial para aplicaciones energéticas, particularmente en transporte, almacenamiento estacional y generación distribuida, su uso actual continúa concentrado en sectores industriales tradicionales. En 2024 la demanda global de hidrógeno alcanzó aproximadamente 100 millones de toneladas y permanece dominada por la refinación de petróleo y la industria química (producción de amoníaco y metanol), mientras que las nuevas aplicaciones energéticas como la del acero, el transporte y la generación eléctrica representan menos del 1 % de la demanda total (International Energy Agency [IEA], 2025).

Este patrón de consumo implica que la mayor parte del hidrógeno utilizado hoy sigue siendo hidrógeno gris, producido a partir de gas natural y carbón, con una contribución del hidrógeno de bajas emisiones (incluido el verde) todavía inferior al 1 % de la producción mundial en 2023–2024 (IEA, 2025). Sin embargo, la demanda potencial de hidrógeno verde es elevada: diversos análisis prospectivos indican que, hacia 2030, el hidrógeno continuará siendo demandado principalmente en refinación, producción de amoníaco y metanol, pero con un crecimiento acelerado en sectores difíciles de descarbonizar como la siderurgia, el transporte pesado y la generación eléctrica (McKinsey & Company, 2023; MarketsandMarkets, 2025).

En este contexto, la elevada demanda existente de hidrógeno en la petroquímica, la metalurgia y la industria de fertilizantes y metanol no constituye un obstáculo, sino un impulso para la producción de hidrógeno verde: estos sectores representan hoy la base de consumo sobre la cual se espera que se produzca el reemplazo progresivo del hidrógeno gris por hidrógeno de bajas emisiones, motivado por objetivos de descarbonización, políticas climáticas y la preferencia de las industrias por insumos con menor huella de carbono (IEA, 2025; McKinsey & Company, 2023).

Potencial de Colombia para ingresar al mercado del hidrógeno verde

Las oportunidades comerciales que actualmente posee Colombia para entrar al mercado del hidrógeno son bastante optimistas debido a su amplia disponibilidad hídrica, potencial que aprovecha actualmente para generar la mayor parte de su oferta energética (Carvajal-Osorio et al.), siendo la generación de energía a partir de hidroeléctricas considerada una energía renovable, la generación de hidrógeno verde es posible en toda parte del territorio que tenga suministro eléctrico proveniente de dichas centrales.

Además de las oportunidades de generación con energías renovables presentes al interior del país gracias a la existencia de grandes costas como la del pacífico o atlántico, la generación de sistemas de generación híbridas entre energía fotovoltaica, mareomotriz y eólica son muy factibles para así asegurar el suministro de energía para generación de hidrógeno, esto sin contar con la disponibilidad infinita de agua para llevar a cabo la electrólisis y la salinidad de la misma funcionando como catalizador de la reacción química (Sánchez-Drizo et al., 2012).

En este marco, Colombia presenta un panorama altamente favorable para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, tanto para el abastecimiento interno como para la exportación. El país cuenta con una matriz eléctrica predominantemente renovable, donde la generación hidroeléctrica aporta alrededor del 70–75 % de la electricidad producida en un año típico, lo que permite disponer de electricidad con bajas emisiones como insumo para la electrólisis (Carvajal-Osorio et al., año). En consecuencia, la producción de hidrógeno verde es técnicamente viable en cualquier zona del territorio con acceso a la red eléctrica nacional.

Adicionalmente, Colombia posee un elevado potencial solar y eólico, especialmente concentrado en la región de La Guajira, donde se estiman al menos 25 GW de capacidad eólica terrestre y alrededor de 45 GW de capacidad solar fotovoltaica, además de un potencial eólico marino cercano a 50 GW en el Caribe (Green Hydrogen Organisation [GH2], 2025). Estudios recientes de planificación “power-to-x” indican que, con una expansión masiva de estas fuentes renovables, el país podría instalar del orden de cientos de gigavatios de capacidad solar y eólica y alcanzar producciones de varios millones de toneladas anuales de hidrógeno y derivados para 2050 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems [Fraunhofer ISE], 2024; Sánchez-Drizo et al., 2012).

La combinación de abundantes recursos hídricos, altos factores de planta para la generación renovable y acceso a dos océanos (Atlántico y Pacífico) sitúa a Colombia como un candidato estratégico para convertirse en un hub de producción y exportación de hidrógeno verde y sus derivados (GH2, 2025; Fraunhofer ISE, 2024). Estas condiciones naturales, sumadas a la existencia de una hoja de ruta nacional del hidrógeno y a marcos regulatorios recientes que reconocen al hidrógeno verde como fuente no convencional de energía renovable, refuerzan la capacidad del país para integrarse competitivamente al mercado internacional de este vector energético.

4.3 MARCO TEÓRICO

Sistemas fotovoltaicos

Los paneles solares tienen como principio el efecto fotovoltaico el cual transforma la radiación solar en energía eléctrica; como complemento a los paneles solares se implementan inversores, controladores, baterías y cableado para generar un sistema fotovoltaico capaz de generar la energía eléctrica necesaria para suplir todas las necesidades básicas de un hogar promedio en San Andrés, la disposición tipo de estos sistemas fotovoltaicos puede ser visualizada en la Ilustración 1, En ella se observa el flujo de energía desde los paneles solares hasta los distintos equipos de consumo, pasando por los componentes esenciales del sistema: controlador de carga, banco de baterías y convertidor CC/CA. (Hernández-Callejo et al., 2019)

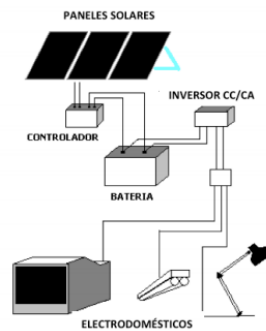


Ilustración 1. Sistema fotovoltaico (Wang et al., 2020)

Los sistemas fotovoltaicos son atractivos debido a su simplicidad. No tienen partes móviles. Son libres de ruidos y potencialmente tienen bajos requerimientos de mantenimiento. Además, los sistemas fotovoltaicos tienen modularidad incorporada y son escalables para aplicaciones que van desde vatios a megavatios, se pueden integrar directamente en la unidad para la que están suministrando energía.

La durabilidad del propio módulo es un problema clave. Dado que los costos de capital son altos, los sistemas fotovoltaicos deben poder funcionar esencialmente sin mantenimiento durante largos períodos (10 a 30 años son vidas esperadas para aplicaciones en mercados de energía competitivos). Como resultado, la capacidad de mantener la eficiencia y resistir los efectos degradantes de la exposición al clima es esencial para la construcción de sistemas fotovoltaicos. Mientras que los dispositivos fotovoltaicos de placas planas utilizan luz solar directa y difusa, los diferentes dispositivos fotovoltaicos tienen distintas eficiencias de captura y conversión que varían con la intensidad de la luz y su longitud de onda o frecuencia dentro del espectro solar. El rendimiento del módulo fotovoltaico en sí es de importancia central. Sin embargo, hay varios otros componentes en el sistema que deben funcionar bien y no cuestan demasiado (Hernández-Callejo et al., 2019).

El funcionamiento de las celdas fotovoltaicas encargadas de recibir la radiación está basado en el efecto fotovoltaico, el cual es generado cuando la radiación emitida por el sol impacta sobre un electrón de un átomo de la célula. Con la energía recibida, el electrón sale de su posición de inicio junto a un átomo y así ser parte de una corriente de un circuito eléctrico. Además del correcto funcionamiento de los paneles se necesita conocer el tipo de instalación que llevará un sistema que puede ser tanto en serie como en paralelo, para este caso la conexión ideal sería en paralelo para evitar daños futuros incidentes en todos los paneles (Rajes et al., 2020)

Reacciones químicas llevadas a cabo en hidrólisis a partir de salmuera

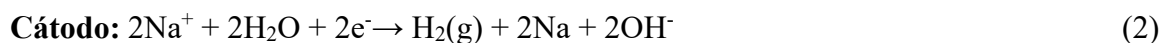
El agua de los mares y océanos están compuestas principalmente de sales disueltas en el agua, la más común es el cloruro de sodio generando condiciones de alta conductividad y salinidad en el agua, lo cual posibilita la hidrólisis.

La hidrólisis es un proceso químico que consume energía para así liberar las moléculas de hidrógeno presentes en el agua, dicha reacción además de generar hidrógeno genera otros subproductos como hidróxido de sodio y cloro libre, estos subproductos se generan debido a la oxidación o reducción electroquímica generada por el suministro de energía al agua, generando la siguiente reacción química:

Cuando el potencial eléctrico entra en contacto con el agua salada presenta las siguientes reacciones



Como se observa en la ecuación 1 el potencial eléctrico al entrar en contacto con la salmuera produce una oxidación del cloro y dejando 2 electrones libres.



Como se observa en la ecuación 2 los electrones liberados en el ánodo son usados en el cátodo para lograr una separación del hidrógeno de la molécula de agua.



En la ecuación 3 se observa la generación de hidrógeno debido a la agregación electrones se da en el cátodo y la reacción del cloro en el ánodo (Kiang et al., 2019).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 TIPO DE METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio es de carácter **documental, experimental y analítico**, orientada a diagnosticar las condiciones energéticas de San Andrés Islas, así como a desarrollar y evaluar un prototipo funcional para la generación de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica simulada y agua sintética con una salinidad similar a la del agua de mar de la isla.

5.2 ENFOQUE DE LA METODOLOGÍA

La investigación se fundamenta en un enfoque documental, experimental y analítico, donde las variables dependientes son el volumen de hidrógeno generado y la eficiencia del sistema bajo diferentes configuraciones de electrodos y niveles de corriente.

El trabajo incluye las siguientes etapas:

- Recopilación de información respecto a las condiciones de demanda de energía eléctrica en la isla de San Andrés, sistemas y costos de generación actual de electricidad y potencial de generación a partir de energía solar fotovoltaica.

- Recopilación de información respecto a la producción de energía eléctrica del mes de agosto del año 2024 por ser el mes con mayor producción y consumo de energía eléctrica en la isla de San Andrés durante el año 2024, siendo este año el más representativo en la actualidad. Con base en la cantidad de habitantes para este mismo año, se determinó el consumo per cápita de energía eléctrica y el consumo de una familia de 4 personas. Es de aclarar, que la isla de San Andrés es un lugar con un alto flujo de personas por la elevada actividad turística durante todo el año. Por este motivo, al calcular el consumo per cápita de energía eléctrica, se obtiene un valor relativamente alto porque está incluyendo, además de las 4 personas que en promedio conforman una familia, también al flujo de turistas.
- Dimensionamiento del número de paneles fotovoltaicos requerido para generar la máxima demanda de energía de una familia de 4 personas (es decir, la carga energética total incluye tanto a los residentes permanentes como a los turistas que visitan la isla durante todo el año) que corresponde al mes de agosto, incluir la carga energética total refleja el uso real de muchas viviendas en San Andrés, que funcionan simultáneamente como hogar y como unidad de alojamiento turístico (similar a pequeños hoteles, hostales o alquileres vacacionales).
- Determinación de los excedentes de energía que se pueden obtener en promedio mensualmente, con base en la demanda de energía en el mes de agosto de 2024 y la generación de energía por los paneles solares según la radiación solar promedio de cada mes.
- Montaje del prototipo para la producción electrolítica de hidrógeno.

- Diseño experimental para la producción de hidrógeno en el que las variables independientes fueron el número de pares de electrodos de acero inoxidable (1 y 2) y la intensidad de corriente (2, 3 y 4 A). La variable dependiente fue el volumen de hidrógeno producido y su eficiencia energética.
- Determinación de la cantidad de hidrógeno que puede obtenerse a partir de los resultados del diseño experimental y de los excedentes de energía solar fotovoltaica.

5.3 ACTIVIDADES Y HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS

En la **Tabla 1** se presentan las actividades realizadas para el desarrollo del trabajo.

Tabla 1: Metodología aplicada al desarrollo del trabajo.

ACTIVIDADES EJECUTADAS PARA CUMPLIR CON EL OBJETIVO 1	ACTIVIDADES EJECUTADAS PARA CUMPLIR CON EL OBJETIVO 2	ACTIVIDADES EJECUTADAS PARA CUMPLIR CON EL OBJETIVO 3
Hacer un diagnóstico de las condiciones energéticas en San Andrés Islas, a partir de bases de datos e información secundaria.	Dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico aislado que utilice los excedentes de energía producida a partir del sistema que abastece el consumo de una familia, teniendo en cuenta que este último se dimensiona con base en la menor radiación mensual y anual, obteniéndose sobrantes de energía en los meses de mayor radiación solar.	Desarrollar un prototipo funcional que utilice los excedentes de energía generados por el sistema solar fotovoltaico y las condiciones de agua sintética con la salinidad del agua de mar en San Andrés, con el propósito de obtener resultados que confirmen la viabilidad y eficiencia de la generación de hidrógeno. Preparación de agua sintética ajustando la salinidad para replicar las condiciones del agua de mar de San Andrés.
Revisión y recopilación de información secundaria sobre el sistema energético actual de San Andrés Islas, utilizando bases de datos oficiales, informes técnicos y literatura científica.	Obtención de datos de irradiación solar para san Andrés islas.	Selección y adquisición de materiales y equipos necesarios para el prototipo, como electrodos de acero inoxidable, fuente de alimentación ajustable, recipientes y equipos de medición.
identificación y análisis de las fuentes de energía disponibles en la isla, así como su	identificación del consumo energético de una familia de 4 personas en san Andrés islas con base en los datos de generación de energía a partir del	Diseño y ensamblaje del prototipo experimental en el laboratorio, asegurando la correcta disposición de los componentes.

capacidad instalada, demanda energética y cobertura.	boletín mensual de operación del IPSE durante el mes de agosto de 2024 y datos de habitantes en San Andrés islas del DANE.	
Evaluación de la infraestructura existente para la generación, distribución y consumo de energía.	Determinación de cantidad de paneles necesarios y generación de energía en los diferentes meses del año.	Configuración de la fuente de alimentación para simular el voltaje y la corriente equivalentes al potencial solar fotovoltaico.
Análisis de los retos y oportunidades en el contexto energético local, incluyendo aspectos ambientales, sociales y económicos.		Montaje del sistema de electrólisis, colocando los electrodos en el recipiente con agua sintética preparada
Elaboración de un diagnóstico integral que resuma el estado actual, las limitaciones y el potencial de aprovechamiento de energías renovables en la isla.		Ejecución de pruebas experimentales bajo diferentes condiciones de voltaje y corriente, registrando el comportamiento del sistema y el volumen de hidrógeno generado.
		Medición y registro de variables clave, como el volumen de hidrógeno producido, la eficiencia del proceso y el consumo energético.
	Análisis de los resultados obtenidos para evaluar la viabilidad y eficiencia del prototipo bajo las condiciones simuladas.	
Herramientas		
Libros, artículos científicos, informes técnicos y proyectos previos sobre energía en islas y energías renovables.	Excel	Materiales para la elaboración del prototipo: electrodos de acero inoxidable, recipientes, cables, agua sintética, sales para ajustar salinidad
Bases de datos oficiales sobre consumo, generación y cobertura energética en San Andrés.		Fuente de alimentación ajustable
		Balanza analítica
		Excel

Fuente: Elaboración propia

Actividades de ejecución del prototipo para producción electrolítica de hidrógeno:

- Se realizó una revisión documental de bases de datos e información secundaria sobre las condiciones energéticas actuales de San Andrés Islas.
- Se determinó la salinidad a usar en el agua sintética la cual corresponde a 35.8 g/L siendo esta la menor contracción reportada por el DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS MARINAS Y COSTERAS DEL CARIBE Y PACÍFICO COLOMBIANOS (INVEMAR 2018)
- Se diseñó y construyó un prototipo piloto en el laboratorio de la facultad de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás, sede principal, utilizando placas de acero inoxidable como electrodos.
- La fuente de potencia para el prototipo fue una fuente de alimentación ajustable, variando la cantidad de pares de ánodos y cátodos (1 y 2) y la corriente en valores de 2, 3 y 4 Amperios.
- El hidrógeno generado en el cátodo se recolectó en una probeta invertida para medir el volumen producido bajo diferentes condiciones experimentales.

5.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

En este proyecto se planteó un diseño experimental con el objetivo de analizar cómo influyen tanto la cantidad de ánodos y cátodos, los cuales corresponden a placas de acero inoxidable, como la intensidad de corriente en el proceso de hidrólisis del agua sintética con 35.8 gramos/L de agua. Para ello, se consideraron dos configuraciones distintas: una utilizando un solo ánodo y cátodo y otra empleando dos cátodos y dos ánodos, con el fin de analizar cómo la superficie efectiva de electrodos y la distribución de corriente influyen en el desempeño del sistema. Además, se probaron tres valores diferentes de corriente eléctrica: 2, 3 y 4 amperios. Por consiguiente, las variables independientes son la cantidad de electrodos y la corriente; la variable dependiente corresponde al volumen de producción de hidrogeno en ml.

El montaje experimental consistió en una celda donde se colocaron las placas según la configuración correspondiente. En ambos casos, se mantuvo constante la distancia entre las placas la cual fue de 2 centímetros y se utilizó el mismo volumen de agua sintética para todos los ensayos el cual corresponde a 2 litros.

Para cada configuración de electrodos, se aplicaron tres intensidades de corriente diferentes: 2, 3 y 4 amperios, con el fin de analizar cómo varía la tasa de producción de hidrógeno y por ende la eficiencia energética, para esta variación de intensidades se utilizó una fuente de alimentación regulable. Cada combinación se ensayó de forma independiente, manteniendo el mismo tiempo de electrólisis en todos los casos. Durante los experimentos, se registró el volumen de hidrogeno generado y la variación del voltaje cada minuto.

5.5 TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la medición del hidrógeno generado durante los ensayos experimentales, se utilizó la técnica de desplazamiento de agua mediante una probeta invertida. El procedimiento consistió en sumergir una probeta, previamente llena de agua, en un recipiente también con agua, y colocarla invertida sobre una manguera conectada al prototipo. A medida que se generaba el gas, este desplazaba el agua contenida en la probeta, permitiendo así cuantificar de manera directa el volumen de hidrógeno producido en cada ensayo. Las lecturas del volumen desplazado se registraron en intervalos definidos de un minuto, asegurando la precisión y repetibilidad de los datos experimentales.

5.6 RUTA METODOLÓGICA



Figura 1: *Ruta metodológica.*

Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diagnóstico energético del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina revela una situación compleja, marcada por una alta dependencia de combustibles fósiles, retos significativos en sostenibilidad ambiental y económica, y un potencial considerable para la integración de energías renovables y medidas de eficiencia energética.

El sistema eléctrico del archipiélago se caracteriza por una matriz dominada casi en su totalidad por generación térmica a partir de diésel, con una potencia instalada de aproximadamente 83,6 MW en San Andrés y 4,6 MW en Providencia, distribuidos en unidades de generación que operan con diésel importado desde el continente (Hacia la sostenibilidad eléctrica..., 2015, p. 22). Esta configuración ha permitido alcanzar una cobertura cercana al 100%, pero a costa de elevados costos de generación (0,372 USD/KWH en 2014) y una fuerte carga fiscal para el Estado, que subsidia tanto el combustible como las tarifas para los usuarios, representando más del 40% de los subsidios nacionales para Zonas No Interconectadas (ZNI) (BID, 2016), cabe aclarar que la situación energética en los últimos 10 años no ha cambiado, y su capacidad instalada y unidades de generación no se han visto modificadas.

El consumo eléctrico anual oscila entre 155 y 165 GWH, con una demanda máxima de 31,4 MW en San Andrés y 1,8 MW en Providencia. El consumo se distribuye de manera relativamente equitativa entre los sectores residencial, comercial e industrial/hotelero, aunque el sector hotelero, pese a su bajo número de usuarios, concentra una proporción significativa del consumo debido a la presencia de grandes establecimientos turísticos (BID, 2016).

El principal reto identificado es la insostenibilidad ambiental y económica del modelo actual. La generación eléctrica basada en diésel produce más de 134.000 toneladas de CO₂ al año, contribuyendo de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y agravando la vulnerabilidad del archipiélago frente al cambio climático (BID, 2016). Además, el costo de la energía es elevado y depende de subsidios estatales, lo que genera una presión fiscal considerable y perpetúa prácticas de consumo poco eficientes, incentivadas por la estructura tarifaria y los subsidios por encima del consumo de subsistencia (BID, 2016).

A esto se suma un alto nivel de pérdidas en la red de distribución, estimadas en 24% en 2010, muy por encima del 12% reconocido al operador, lo que incrementa aún más la demanda de generación y los costos asociados (BID, 2016). La calidad del servicio también enfrenta desafíos, con indicadores de duración y frecuencia de interrupciones (DES y FES) que superan las metas contractuales, reflejando la necesidad de modernizar la infraestructura y mejorar la gestión operativa (Superservicios, 2018).

El archipiélago cuenta con un potencial significativo para la diversificación de su matriz energética a través de fuentes renovables no convencionales. Los estudios de la Unidad de Planeación MineroEnergética (UPME) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) han identificado la energía eólica y solar fotovoltaica como alternativas viables, gracias a las condiciones climáticas favorables de la región.

En cuanto a la energía solar, la radiación en el archipiélago oscila entre 5,0 y 5,5 kWh/m², lo que posibilita la instalación de al menos 4,6 MW en sistemas fotovoltaicos distribuidos, con una generación estimada de 8 GWh/año (Hacia la sostenibilidad eléctrica..., 2015, p. 35). Sin embargo, la integración de estas fuentes enfrenta barreras regulatorias y económicas, como la ausencia de un marco para la medición neta y la limitación de la autogeneración sin entrega de excedentes a la red, además de los altos costos iniciales de inversión, especialmente para el sector residencial (BID, 2016).

Adicionalmente, se ha construido una planta de generación a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) con una capacidad de 0,9 MW, que podría aportar cerca de 4 GWh/año y contribuir a la gestión de residuos, (BID, 2016). aunque su entrada en operación se vio enfrentada a retrasos administrativos y técnicos, a finales del año 2024 esta planta inicio fase de pruebas para su puesta en marcha según lo informa el diario El Espectador(Díaz Páez, 2025).

6.1 Barreras y oportunidades para la transición energética

Entre las principales barreras identificadas se encuentran la dependencia de subsidios, la falta de incentivos regulatorios para la integración de renovables y la autogeneración, la resistencia social a proyectos de gran escala (especialmente en comunidades raizales), y la limitada capacidad de inversión local (BID, 2016). Además, la infraestructura actual presenta limitaciones técnicas para la integración de fuentes intermitentes y la gestión de excedentes.

No obstante, existen oportunidades claras para avanzar hacia una matriz más sostenible. La implementación de redes inteligentes y sistemas de medición avanzada ya ha comenzado, lo que permitirá mejorar la gestión de la demanda, reducir pérdidas y facilitar la integración de renovables (BID, 2016). El potencial de recursos eólicos y solares es considerable, y la diversificación con tecnologías como la generación a partir de RSU y la posible conversión de plantas térmicas a gas natural o GLP puede reducir significativamente las emisiones y los costos a largo plazo (BID, 2016).

Con base a lo expuesto anteriormente el diagnóstico evidencia que la sostenibilidad energética del archipiélago depende de una transición gradual y planificada hacia una matriz diversificada, donde las energías renovables y la eficiencia energética jueguen un papel central. La reducción de la dependencia del diésel no solo es una necesidad ambiental, sino también económica y social, dada la vulnerabilidad del sistema actual a los precios internacionales del combustible y a los riesgos logísticos asociados al transporte marítimo.

La experiencia internacional y los estudios locales sugieren que la combinación de medidas de EE, integración de renovables y modernización de la infraestructura puede reducir hasta en un 55% la demanda de energía, disminuir las emisiones de GEI y aliviar la carga fiscal de los subsidios (BID, 2016). Sin embargo, el éxito de esta transición requiere superar barreras institucionales, regulatorias y sociales, así como asegurar la participación de la comunidad y el acompañamiento técnico y financiero del Estado y organismos multilaterales.

Es importante resaltar que el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina enfrenta retos significativos, pero también cuenta con oportunidades únicas para convertirse en un modelo de sostenibilidad energética insular en Colombia y el Caribe, siempre que se logre articular una estrategia integral que combine innovación tecnológica, eficiencia, participación social y un marco regulatorio adecuado.

6.2 Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

Para llevar a cabo el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico que cumpla con los requerimientos energéticos de una familia de 4 personas en San Andrés Islas se usaron los datos consignados en el boletín mensual de operación del mes de Agosto 2024 (IPSE, 2024) donde establece que se generaron 20'620.916 KWH durante el mes de agosto, se seleccionó este informe mensual de telemetría porque corresponde al mes con la mayor energía generada en 2024, lo que representa el escenario de máxima exigencia dentro del año. Además, 2024 es el año más reciente con datos completos y comparables, por lo que aporta actualidad y pertinencia al análisis. La revisión de los boletines informativos del IPSE muestra, de manera consistente, una tendencia creciente en la generación y el consumo de electricidad a lo largo del tiempo; en ese contexto, usar el pico mensual del año más reciente es coherente con la evolución al alza del sistema y permite situar los resultados frente a un límite superior dentro de la serie, estos informes pueden ser consultados en el **Anexo 3**.

Teniendo en cuenta que para el año 2021 se identificaron un total de 62.269 habitantes en San Andrés (Ministerio de Agricultura, 2021) se puede afirmar que el consumo per cápita al mes de energía en las islas de San Andrés es de 331,15 KWH, por lo cual una familia de 4 persona consumiría un aproximado de 1324,63 KWH mensual. Se realizó el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico con el fin de satisfacer la necesidad energética durante los 12 meses del año, de acuerdo a las condiciones climáticas específicamente la radiación solar, la cual es variable en los diferentes meses del año; de acuerdo a lo anterior, a continuación se presenta los datos de irradiación solar mensual promedio desde el año 2005 hasta el año 2023, los cuales fueron descargados del portal PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM de la unión europea.

Tabla 2: Datos de Irradiación mensual promedio en la isla de San Andrés.

Mes	Promedio
enero	192,89053
febrero	185,74526
marzo	211,99684
abril	204,56579
mayo	174,91211
junio	137,17421
julio	157,62105
agosto	163,03158
septiembre	146,9079
octubre	139,9179
noviembre	140,14316
diciembre	185,32421

Fuente: PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM

Una vez se obtuvieron los valores de irradiación mensual promedio entre los años 2005 y 2023 se procedió a seleccionar un panel solar, el cual corresponde al modelo Tensite EM240-PH que es un módulo fotovoltaico monocristalino con una potencia nominal de 240 Wp y una eficiencia del 19,8%, debido a su gran oferta comercial en Colombia, lo que permite que su precio sea más bajo y más fácil de adquirir; su ficha técnica puede se presenta en el **Anexo 1**.

A continuación, se presenta los cálculos y el procedimiento llevado a cabo para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

6.3 Producción mensual de energía por panel

Para el cálculo de la producción de energía mensual fijó un factor de pérdidas del 20 por ciento y con una potencia del panel de 240 W; esta producción se calculó con la siguiente ecuación:

Energía mensual (kWH)=Potencia del panel (KW)×Promedio KWH/m²/mes × (1-Factor de pérdidas).

Para el mes de enero, la energía promedio generada por el panel de 240W con una radiación solar promedio de 192,89 KWH/(m²*mes) que equivale a 192,89 H que son las horas pico y un factor de pérdidas de 0,2, es:

$$\text{Energía promedio generada enero} = 240W * 192H * (1 - 0,2) * \frac{1 KW}{1000 W} = 37,03 KWH$$

En la Tabla 3 se presentan los KWH en promedio generados por panel en los diferentes meses

Tabla 3. Producción mensual de energía en KWH/panel

Mes	Promedio KWH/m ² /mes	Producción Mensual por panel (KWH)
Enero	192,8905263	37,03498105
Febrero	185,7452632	35,66309053
Marzo	211,9968421	40,70339368
Abril	204,5657895	39,27663158
Mayo	174,9121053	33,58312421
Junio	137,1742105	26,33744842
Julio	157,6210526	30,26324211
Agosto	163,0315789	31,30206316
Septiembre	146,9078947	28,20631579
Octubre	139,9178947	26,86423579
Noviembre	140,1431579	26,90748632
Diciembre	185,3242105	35,58224842

Elaboración propia

De acuerdo a lo presentado en la **Tabla 3**, se evidencia que el mes con menor cantidad de energía producida a partir del potencial solar es el mes de junio con 26.32 KWH/mes por lo cual con relación a este mes se calculó el total de paneles necesarios para suplir la demanda, con el fin de asegurar el suministro energético para el mes con menor radiación, para asegurar el suministro energético para todos los meses del año, dividiendo el requerimiento energético total sobre los KWH generados en el mes de junio, se obtiene la cantidad de paneles necesarios:

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Energía mensual requerida}}{\text{KWH generados por un panel}} = \frac{1324,63 \text{ KWH}}{26,32 \text{ KWH}} = 51 \text{ paneles}$$

Con lo cual para requieren 51 paneles en total para suplir la demanda energética de una familia de 4 personas en las islas de San Andrés, en la **Tabla 4**, se presenta la generación total de energía en los diferentes del año, los cuales fueron calculados a partir de multiplicar la cantidad de paneles por producción mensual por cada panel instalado.

$$\begin{aligned} \text{Energía generada por 48 paneles solares en enero} &= 37,035 \text{ KWH} * 51 \text{ paneles} \\ &= 1888,78 \text{ KWH} \end{aligned}$$

Tabla 4. Generación de energía (KWH/mes) durante el año

Mes	Generación Total (KWH)
Enero	1888,784031
Febrero	1818,817615
Marzo	2075,873077
Abril	2003,108206
Mayo	1712,739332
Junio	1343,209874
Julio	1543,425351
Agosto	1596,405222
Septiembre	1438,522108
Octubre	1370,076028
Noviembre	1372,281803
Diciembre	1814,694674

Fuente: Elaboración propia

Una vez calculado el total de paneles y de generación de energía (KWH/mes) se procedió a calcular los excedentes de energía que potencialmente puede generarse en KWH mensuales durante los diferentes meses, teniendo en cuenta que la radiación solar es mayor durante los demás meses respecto a junio que fue el mes de menor radiación solar. Estos excedentes de energía fueron usados para calcular el volumen de Hidrogeno (H₂) que se podría generar con dichos excedentes. En la Tabla 5 se presentan los excedentes promedio mensuales.

$$\text{Excedentes energía enero} = (1888,78 - 1324,63) \text{ KWH} = 514,2 \text{ KWH}$$

Tabla 5: Excedentes de energía (KWH) a lo largo del año

Mes	Excedentes (KWH)
Enero	564,14
Febrero	494,18
Marzo	751,23
Abril	678,47
Mayo	388,10
Junio	18,57
Julio	218,79
Agosto	271,77
Septiembre	113,88
Octubre	45,44
Noviembre	47,64
Diciembre	490,06

Fuente: Elaboración propia

Todos los cálculos mostrados anteriormente se presentan en el **ANEXO 2**.

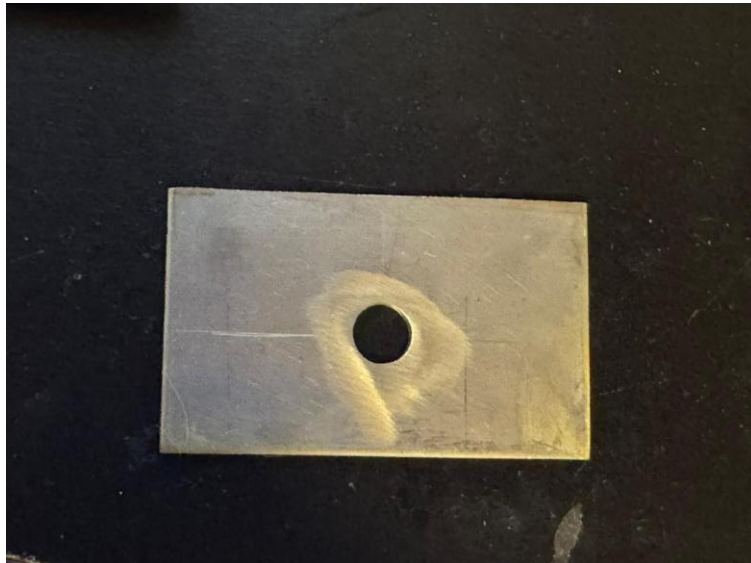
6.4 Elaboración del prototipo

Para el desarrollo del prototipo funcional que genere hidrogeno con los excedentes de energía presentados en la **Tabla 5** se seleccionó un contenedor plástico de 2 litros que brindaba un cierre hermético. En su tapa fueron realizados 3 agujeros; en 2 de ellos se introdujeron 2 barras roscadas de acero inoxidable a las cuales se sujetaron las placas del mismo material por medio de tuercas y arandelas; por el agujero restante fluye el gas hidrogeno producido por medio de la electrólisis (ver **Fotografía 1**). Las placas de acero inoxidable que fueron usadas como cátodos y ánodos tienen 9.5 cm de largo por 5.5 cm de ancho y se puede observar en la **Fotografía 2**; por último, es de aclarar que las placas se mantuvieron separadas a una distancia constante de 2 cm entre los cátodos y ánodos como se observa en la **Fotografía 3**.



Fotografía 1: Prototipo funcional.

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 2: Placa de acero inoxidable usada como cátodos y ánodos.

Fuente: Elaboración propia



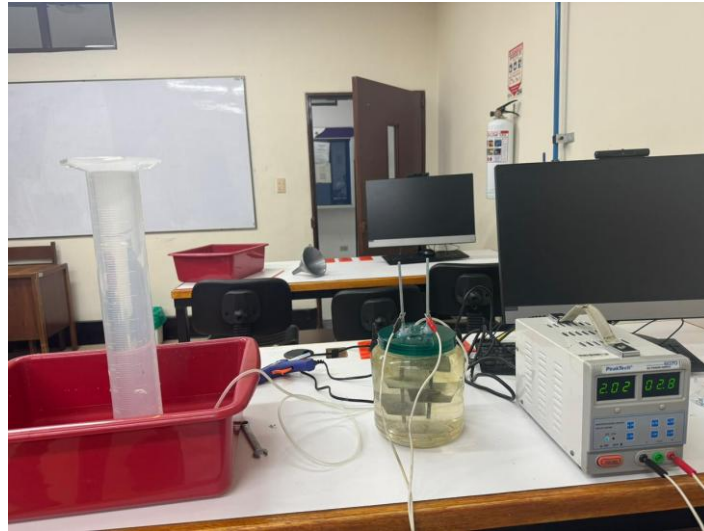
Fotografía 3: Distanciamiento de los ánodos y cátodos.

Fuente: Elaboración propia

Una vez elaborado el prototipo en los laboratorios de la Universidad Santo Tomas de Aquino Sede Principal, fue puesto en marcha el generador de hidrogeno, usando una fuente regulable y agua sintética con la salinidad del agua de san Andrés, la cual corresponde a a 35.8 gramos/litro de agua, teniendo en cuenta que el prototipo tiene un volumen de 2 litros, para cada uno de los ensayos se usó un total de 71.6 gramos.

La hidrólisis del agua sintética con salinidad de 35.8 gramos por litro de agua mediante el uso de electrodos de acero inoxidable constituye un proceso electroquímico que genera hidrógeno. Este procedimiento se fundamenta en la aplicación de una corriente eléctrica continua a través del prototipo que contiene el agua sintética, empleando como electrodos tanto un ánodo como un cátodo fen acero inoxidable.

el esquema general de los ensayos llevados a cabo se presenta en la **Fotografía 4.**



Fotografía 4: Montaje experimental.

Fuente: Elaboración propia

6.5 Resultados

Los resultados obtenidos a partir de los 6 escenarios evaluados (dos configuraciones de electrodos (1 ánodo/1 cátodo y 2 ánodos/2 cátodos) y tres intensidades de corriente (2, 3 y 4 A)) se presentan desde la **Tabla 6** hasta la **Tabla 9**, En cada tabla se presentan, para cada ensayo y su réplica, el registro minuto a minuto del voltaje y el volumen de hidrógeno generado.

Tabla 6: resultados de laboratorio para 1 ánodo y 1 cátodo. Réplica 1.

Réplica 1			
Cantidad de Ánodos = 1 - Cantidad de Cátodos =1			
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos
2	1 minuto	3,2	10
	2 minutos	3,2	35
	3 minutos	3,2	60
	4 minutos	3,2	80

	5 minutos	3,2	100
3	1 minuto	4,8	30
	2 minutos	4,5	65
	3 minutos	4,1	100
	4 minutos	4,1	130
	5 minutos	4	160
4	1 minuto	5,8	45
	2 minutos	5,7	95
	3 minutos	5,6	135
	4 minutos	5,5	180
	5 minutos	5,2	220

Tabla 7: resultados de laboratorio para 1 ánodo y 1 cátodo. Réplica 2

Réplica 2			
Cantidad de Ánodos = 1 - Cantidad de Cátodos =1			
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos
2	1 minuto	3	10
	2 minutos	3	35
	3 minutos	3	50
	4 minutos	2,9	75
	5 minutos	2,9	95
3	1 minuto	4,4	40
	2 minutos	4,4	70
	3 minutos	4,3	105
	4 minutos	4,2	135
	5 minutos	4,1	170
4	1 minuto	5,1	40
	2 minutos	5	80
	3 minutos	4,7	120
	4 minutos	4,5	170
	5 minutos	4,3	210

Tabla 8: resultados de laboratorio para 2 ánodos y 2 cátodos. Réplica 1

Réplica 1			
Cantidad de Ánodos = 2 - Cantidad de Cátodos =2			
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos
2	1 minuto	2,7	15
	2 minutos	2,7	45

	3 minutos	2,6	65
	4 minutos	2,6	80
	5 minutos	2,7	105
3	1 minuto	3	20
	2 minutos	3	55
	3 minutos	2,9	85
	4 minutos	2,9	115
	5 minutos	2,9	145
4	1 minuto	3,6	30
	2 minutos	3,5	80
	3 minutos	3,5	125
	4 minutos	3,5	165
	5 minutos	3,4	210

Tabla 9: resultados de laboratorio para 2 ánodos y 2 cátodos Réplica 2

Réplica 2			
Cantidad de Ánodos = 2 - Cantidad de Cátodos =2			
Corriente (Amperios)	Corriente (Amperios)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos
2	1 minuto	2,7	15
	2 minutos	2,7	35
	3 minutos	2,6	60
	4 minutos	2,6	80
	5 minutos	2,7	100
3	1 minuto	3,3	30
	2 minutos	3,1	55
	3 minutos	3	100
	4 minutos	3	120
	5 minutos	3	150
4	1 minuto	4,1	35
	2 minutos	3,8	75
	3 minutos	3,7	110
	4 minutos	3,5	150
	5 minutos	3,4	200

Fuente: Elaboración propia

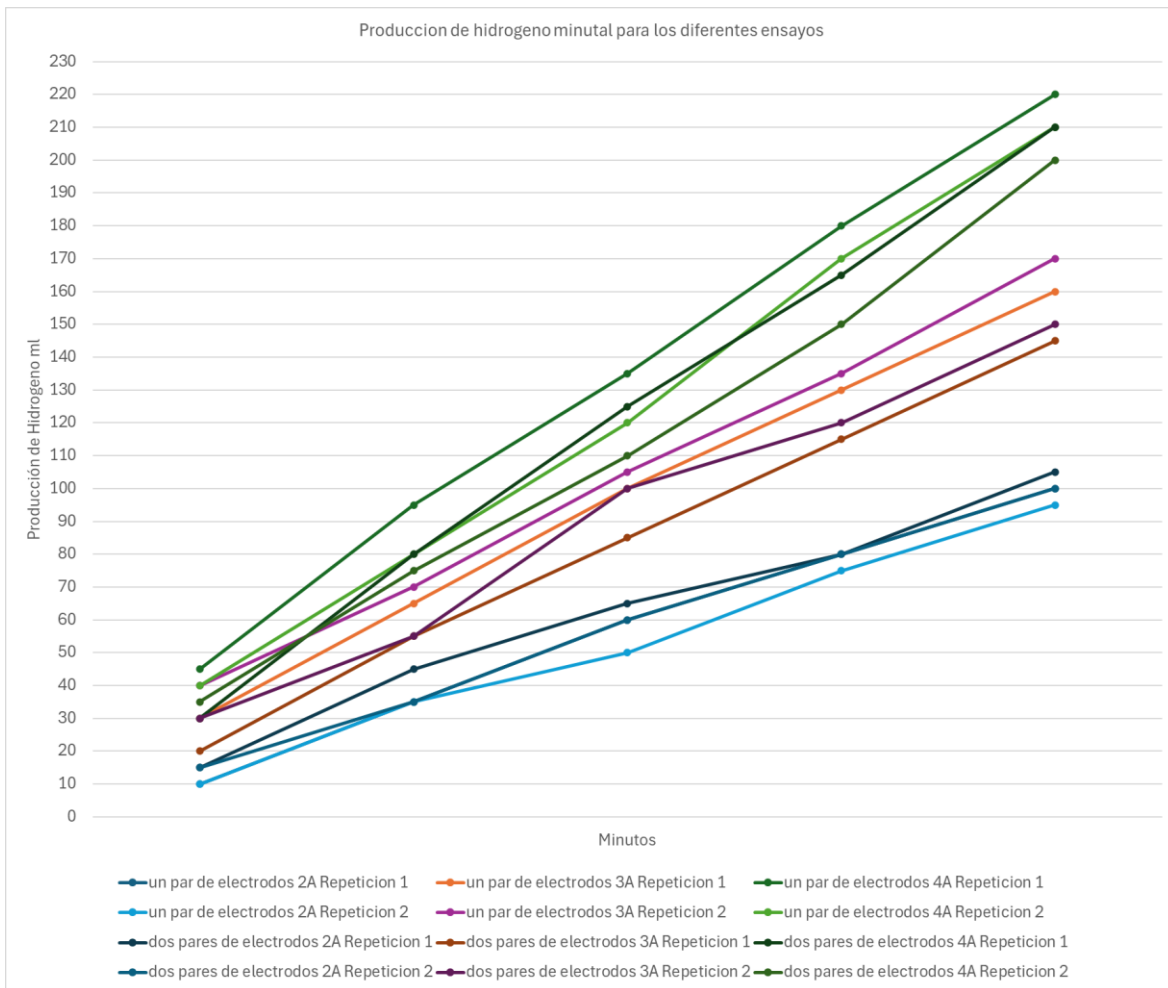


Figura 2: Producción de hidrogeno a través del tiempo para los diferentes ensayos

Fuente: Elaboración propia

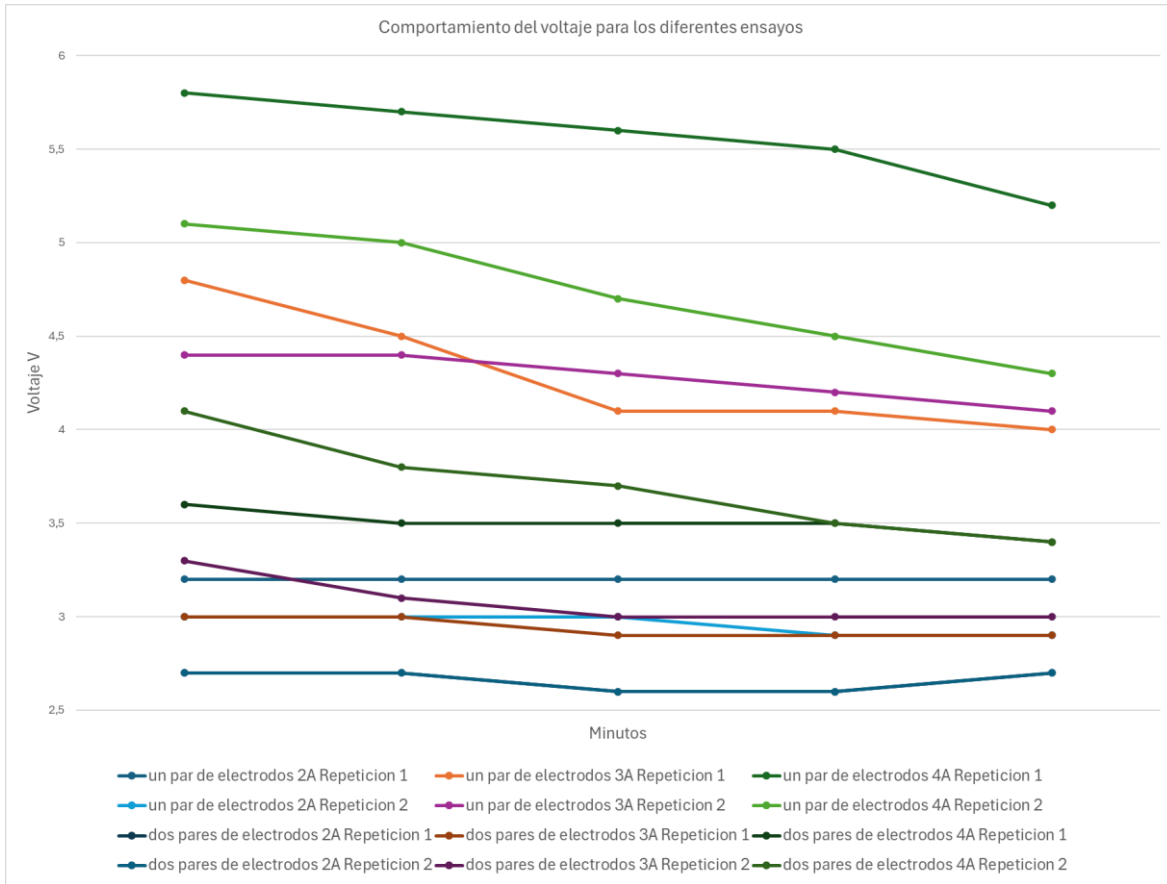


Figura 3: Comportamiento del voltaje para los diferentes ensayos.

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos realizados permiten comparar el efecto de la cantidad de electrodos y la intensidad de corriente sobre la producción de hidrógeno y el comportamiento del voltaje durante la electrólisis del agua sintética.

En primer lugar, se observa que, para cualquier configuración, la producción de hidrógeno aumenta de manera constante a lo largo del tiempo, lo que es consistente con el avance del proceso de electrólisis. Sin embargo, al comparar las dos configuraciones de electrodos, se aprecia que el uso de dos pares de electrodos (dos ánodos y dos cátodos) tiende a favorecer una mayor producción de hidrógeno respecto a la configuración de un solo par, especialmente a corrientes bajas.

Por ejemplo, con una corriente de 2 amperios, la producción de hidrógeno al cabo de cinco minutos fue de 100 mL y 95 mL para la configuración de un par de electrodos, mientras que con dos pares de electrodos se alcanzaron 105 mL y 100 mL, respectivamente. Esta diferencia, se mantiene en ambas repeticiones y sugiere que el aumento en la superficie de los electrodos mejora la eficiencia del proceso a bajas corrientes.

Al aumentar la corriente a 3 amperios, la tendencia se mantiene: con un par de electrodos se obtuvieron 160 mL y 170 mL, mientras que con dos pares de electrodos se registraron 145 mL y 150 mL. En este caso, la diferencia entre configuraciones se reduce e incluso, en algunos ensayos, la producción con un solo par de electrodos supera ligeramente a la de dos pares. Esto puede deberse a factores como la distribución de corriente o la formación de burbujas en la superficie de los electrodos, que pueden afectar la eficiencia a corrientes más altas.

En los ensayos con 4 amperios, la producción de hidrógeno fue la más alta en todos los casos. Con un par de electrodos se alcanzaron 220 mL y 210 mL, mientras que con dos pares de electrodos se obtuvieron 210 mL y 200 mL. Aquí, la diferencia entre configuraciones es mínima y, en algunos casos, la configuración de un solo par de electrodos muestra una producción ligeramente superior. Esto sugiere que, a corrientes elevadas, el efecto de aumentar la cantidad de electrodos pierde relevancia frente al impacto de la intensidad de corriente.

En cuanto al voltaje, se observa que, para una misma corriente, el sistema con dos pares de electrodos opera a un voltaje menor en comparación con el de un solo par. Por ejemplo, a 2 amperios, el voltaje se mantiene alrededor de 2,6-2,7 V con dos pares de electrodos, mientras que con un par de electrodos oscila entre 2,9 y 3,2 V. Esta tendencia se repite en los otros niveles de corriente, lo que indica que el uso de más electrodos reduce la resistencia interna del sistema y, por tanto, el voltaje necesario para mantener la electrólisis.

En resumen, los resultados muestran que la producción de hidrógeno aumenta con la corriente aplicada, independientemente de la configuración de los electrodos. El uso de dos pares de electrodos permite trabajar a voltajes más bajos, lo que puede ser ventajoso desde el punto de vista energético, por lo cual a continuación se presentan los cálculos de KWH consumido, para identificar cuál de las combinaciones fue la más eficiente y por ende la mejor alternativa para la producción de hidrogeno verde en la isla de San Andrés.

Para determinar la cantidad de energía consumida se usó la siguiente ecuación

$$\text{Energía (KWH)} = 1000 \text{ Voltaje (V)} \times \text{Corriente (A)} \times \text{Tiempo (h)}$$

Además, la cantidad de hidrogeno generado será dividido en la cantidad de energía consumida con el fin de encontrar el ensayo con mayor eficiencia energética para generar hidrogeno verde, a continuación, en las tablas se presenta el consumo energético y los ml de H₂ generados por cada KWH consumidos para cada uno de los ensayos

Tabla 10: Hidrogeno producido por KWH consumido usando 1 ánodo y 1 cátodo cátodo Réplica

1.

Réplica 1						
Cantidad de Ánodos = 1 - Cantidad de Cátodos =1						
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos	Consumo Energético (KWH) por minuto	Consumo Energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido
2,00	1,00	3,20	10,00	0,11	1,60	62,50
2,00	2,00	3,20	35,00	0,21		
2,00	3,00	3,20	60,00	0,32		
2,00	4,00	3,20	80,00	0,43		
2,00	5,00	3,20	100,00	0,53		
3,00	1,00	4,80	30,00	0,24	3,13	51,20
3,00	2,00	4,50	65,00	0,45		
3,00	3,00	4,10	100,00	0,62		
3,00	4,00	4,10	130,00	0,82		
3,00	5,00	4,00	160,00	1,00		
4,00	1,00	5,80	45,00	0,39	5,47	40,24
4,00	2,00	5,70	95,00	0,76		
4,00	3,00	5,60	135,00	1,12		
4,00	4,00	5,50	180,00	1,47		
4,00	5,00	5,20	220,00	1,73		

Tabla 11: Hidrogeno producido por KWH consumido usando 1 ánodo y 1 cátodo Réplica 2

Réplica 2						
Cantidad de Ánodos = 1 - Cantidad de Cátodos =1						
Corriente (Amperios)	Tiempo (minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producidos	Consumo energético (KWH) por minuto	Consumo energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido
2,00	1,00	3,00	10,00	0,10	1,47	64,63
2,00	2,00	3,00	35,00	0,20		
2,00	3,00	3,00	50,00	0,30		

Réplica 2						
Cantidad de Ánodos = 1 - Cantidad de Cátodos =1						
Corriente (Amperios)	Tiempo (minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producido	Consumo energético (KWH) por minuto	Consumo energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido
2,00	4,00	2,90	75,00	0,39	3,17	53,63
2,00	5,00	2,90	95,00	0,48		
3,00	1,00	4,40	40,00	0,22		
3,00	2,00	4,40	70,00	0,44		
3,00	3,00	4,30	105,00	0,65		
3,00	4,00	4,20	135,00	0,84		
3,00	5,00	4,10	170,00	1,03		
4,00	1,00	5,10	40,00	0,34		
4,00	2,00	5,00	80,00	0,67		
4,00	3,00	4,70	120,00	0,94		
4,00	4,00	4,50	170,00	1,20	4,58	45,85
4,00	5,00	4,30	210,00	1,43		

Tabla 12: Hidrógeno producido por KWH consumido usando 2 ánodos y 2 cátodos. Réplica 1.

Réplica 1						
Cantidad de Ánodos = 2 - Cantidad de Cátodos =2						
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producido	Consumo energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido	Consumo energético (KWH) Total
2,00	1,00	2,70	15,00	0,09	1,33	79,15
2,00	2,00	2,70	45,00	0,18		
2,00	3,00	2,60	65,00	0,26		
2,00	4,00	2,60	80,00	0,35		
2,00	5,00	2,70	105,00	0,45		
3,00	1,00	3,00	20,00	0,15	2,19	66,21
3,00	2,00	3,00	55,00	0,30		
3,00	3,00	2,90	85,00	0,44		
3,00	4,00	2,90	115,00	0,58		
3,00	5,00	2,90	145,00	0,73		
4,00	1,00	3,60	30,00	0,24		
4,00	2,00	3,50	80,00	0,47		
4,00	3,00	3,50	125,00	0,70		
4,00	4,00	3,50	165,00	0,93	3,47	60,46
4,00	5,00	3,40	210,00	1,13		

Tabla 13: Hidrogeno producido por KWH consumido usando 2 ánodos y dos cátodos. Réplica 2

Réplica 2						
Cantidad de Ánodos = 2 - Cantidad de Cátodos =2						
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producido	Consumo energético (KWH) por minuto	Consumo energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido
2,00	1,00	2,70	15,00	0,09	1,33	75,38
2,00	2,00	2,70	35,00	0,18		

Réplica 2						
Cantidad de Ánodos = 2 - Cantidad de Cátodos =2						
Corriente (Amperios)	Tiempo (Minutos)	Voltaje medido	ml de H ₂ producido	Consumo energético (KWH) por minuto	Consumo energético (KWH) Total	ml de hidrogeno producido por KWH consumido
2,00	3,00	2,60	60,00	0,26		
2,00	4,00	2,60	80,00	0,35		
2,00	5,00	2,70	100,00	0,45		
3,00	1,00	3,30	30,00	0,17		
3,00	2,00	3,10	55,00	0,31		
3,00	3,00	3,00	100,00	0,45		
3,00	4,00	3,00	120,00	0,60		
3,00	5,00	3,00	150,00	0,75	2,28	65,93
4,00	1,00	4,10	35,00	0,27		
4,00	2,00	3,80	75,00	0,51		
4,00	3,00	3,70	110,00	0,74		
4,00	4,00	3,50	150,00	0,93		
4,00	5,00	3,40	200,00	1,13	3,59	55,76

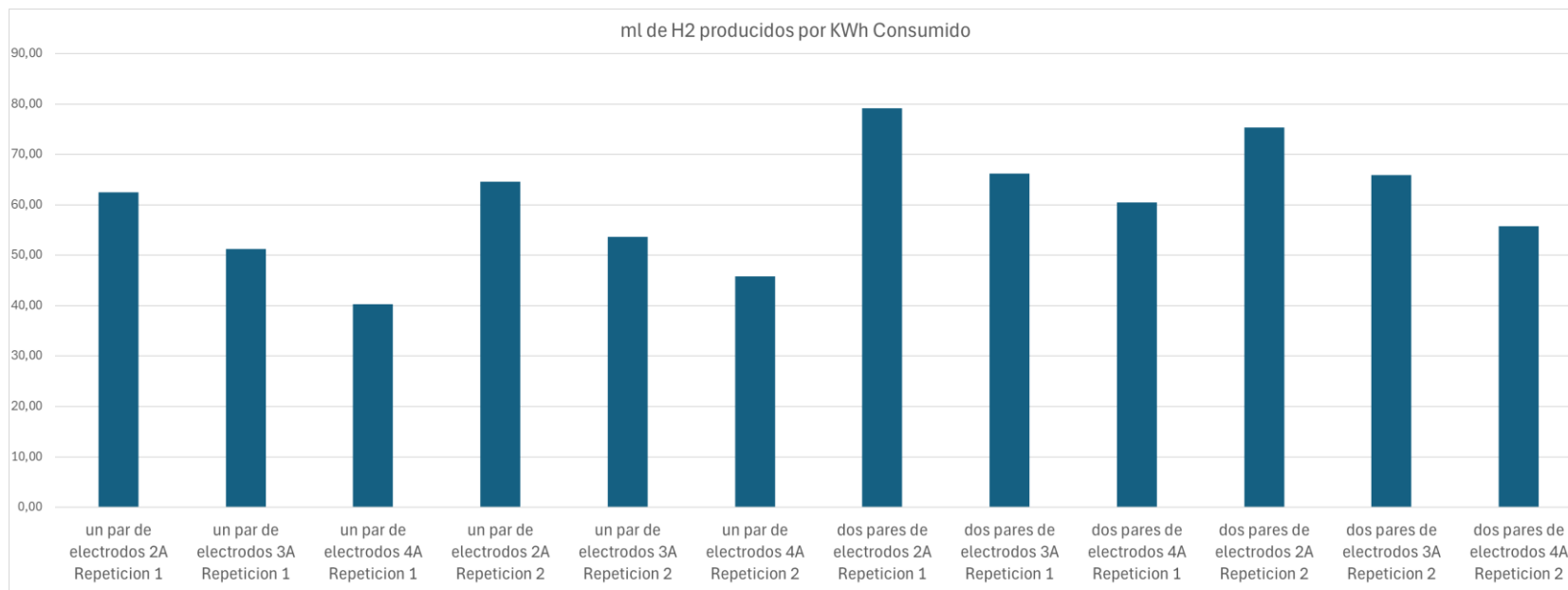


Figura 4: H₂ producido por cada KWH consumido

Al observar los datos, se aprecia que la configuración con dos pares de electrodos y una corriente de 2 amperios fue la que mostró los valores más altos de hidrógeno producido por KWH consumido, llegando a los 75 ml/KWH en ambas repeticiones. Este resultado indica que, bajo estas condiciones, el sistema aprovecha mejor la energía suministrada para generar hidrógeno, en comparación con las demás combinaciones evaluadas.

En contraste, al aumentar la corriente a 3 y 4 amperios, la eficiencia energética tiende a disminuir, aunque la producción total de hidrógeno sea mayor. Esto se debe a que, a corrientes más altas, parte de la energía se pierde en forma de calor o en reacciones secundarias, lo que reduce la cantidad de hidrógeno producido por unidad de energía consumida.

Por otro lado, la configuración con un solo par de electrodos mostró valores de eficiencia energética menores en la mayoría de los casos, especialmente cuando se trabajó con 4 amperios, donde los valores de hidrógeno por KWH fueron los más bajos registrados. Esto sugiere que, aunque aumentar la corriente incrementa la producción de hidrógeno, no necesariamente se traduce en un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica.

Tomando un valor promedio de las 2 repeticiones para el ensayo de dos pares de electrodos y una corriente de 2 amperios obtenemos una producción de 77.6 ml de H₂ por cada KWH, contando con este valor de referencia, se procede a calcular el total de hidrogeno que se puede producir con los excedentes de energía generados a lo largo del año con base a los anteriormente calculados, estos se presentan a continuación:

Tabla 14: Producción de hidrógeno con la corriente y cantidad de electrodos más eficiente

Mes	Excedentes (KWH)	Producción de hidrogeno por mes (ml)
Enero	564,14	43778,01
Febrero	494,18	38348,61
Marzo	751,23	58296,12
Abril	678,47	52649,56
Mayo	388,10	30116,94
Junio	18,57	1441,45
Julio	218,79	16978,17
Agosto	271,77	21089,41
Septiembre	113,88	8837,68
Octubre	45,44	3526,26
Noviembre	47,64	3697,43
Diciembre	490,06	38028,67

Fuente: Elaboración propia

Cabe aclarar que, una vez finalizada la toma de datos, en cada uno de los ensayos, el gas generado fue quemado con el fin de determinar si este correspondía a hidrógeno, por lo cual la manguera por donde este gas era expulsado fue colocada en una solución jabonosa con el fin de ser quemado, como se muestra en la **Fotografía 5**, para la totalidad de los ensayos se determinó que el gas generado era hidrogeno verde.



Fotografía 5: Prueba de quemado.

Fuente: Elaboración propia

6.6 Otros resultados

Además de los resultados mostrados anteriormente, gracias a la elaboración del presente trabajo de grado, el trabajo del estudiante Jose Segura fue seleccionado para viajar en el año 2022 a la Isla de San Andrés y participar activamente en la hackathon “ Local Actions – For the Sustainable Development Goals ” organizada por la Universidad de Cork de Irlanda y la Universidad Nacional de Colombia, donde se abordaron temas de sostenibilidad dirigidos a la isla de San Andrés.



SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE SENA
CONSTANCIA DE PARTICIPACIÓN

BOGOTÁ D.C., 28 de Junio de 2024

EL SUBDIRECTOR DEL CENTRO DE TECNOLOGÍAS DEL TRANSPORTE

En calidad de

**SECRETARIO TÉCNICO DE LA MESA SECTORIAL DE
TRANSPORTE,**

HACE CONSTAR:

Que (el Señor o la Señora) JOSÉ ANDRÉS SEGURA FLOREZ identificado (a) con cédula No. 1014300234, en representación de UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS participó en la elaboración / actualización o validación técnica de los siguientes productos de Normalización:

Productos	Elaboración	Actualización	Verificación técnica	Sede o Secretaria	Descripción del producto		
					Código	Versión	Nombre
Norma Sectorial de Competencia Laboral	X				280601127	1	Diagnosticar sistema de celdas de hidrógeno de propulsión eléctrica vehicular de acuerdo con especificaciones técnicas de fabricante y procedimiento técnico http://dsnft.sena.edu.co/servlet/com.portalsena.wpdescargadirelink?1,280601127,1

Los productos de normalización elaborados / actualizados y validados técnicamente en la Mesa Sectorial, no constituyen derechos de autor ni de comercialización.

Esta constancia se expide a solicitud del interesado.

Firmado digitalmente por Diego
Armando Cristancho Cristancho
Fecha: 2024.07.04 14:38:48 -05'00'

DIEGO ARMANDO CRISTANCHO CRISTANCHO
Secretario(a) Técnico(a)

Fotografía 7: Participación en representación de la universidad Santo Tomas de Aquino en productos de normalización.

Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

El análisis de las condiciones energéticas la isla de San Andres permite afirmar que el sistema actual, basado casi exclusivamente en la generación térmica a partir de diésel, no es viable a largo plazo desde el punto de vista ambiental. La dependencia de combustibles fósiles contribuye de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que agrava la vulnerabilidad de la isla frente al cambio climático.

El estudio revela, sin embargo, un potencial considerable para la diversificación de la matriz energética mediante la integración de fuentes renovables, especialmente la energía, cuyas condiciones en la región son favorables. La implementación de sistemas fotovoltaicos distribuidos permitiría reducir la dependencia del diésel y disminuir las emisiones, No obstante, la materialización de este potencial enfrenta barreras regulatorias, económicas y sociales, como la ausencia de incentivos claros para la autogeneración y la integración de excedentes a la red, así como la resistencia de algunos sectores de la comunidad a los cambios tecnológicos.

El ejercicio de dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico para una familia tipo en San Andrés evidencia la viabilidad técnica de cubrir la demanda energética residencial mediante energías renovables. Los excedentes de energía generados durante los meses de mayor irradiación abren la posibilidad de explorar alternativas de almacenamiento, como la producción de hidrógeno verde, que podría ser aprovechado para usos domésticos o como vector energético complementario asociado a la cocción de alimentos.

Los ensayos experimentales realizados para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua con condiciones de salinidad presentes en la isla de San Andrés muestran que la eficiencia del proceso depende tanto de la configuración de los electrodos como de la intensidad de corriente aplicada. Se observa que, a corrientes bajas y con mayor superficie de electrodos, se logra una mayor producción de hidrógeno por unidad de energía consumida, lo que sugiere que la optimización de estos parámetros es fundamental para el desarrollo de soluciones de almacenamiento energético adaptadas a las condiciones locales.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda adaptar el prototipo para incorporar un sistema de recirculación del agua utilizada en la electrólisis. Esto permitiría mantener la concentración de sales adecuada, reducir el consumo de agua y minimizar la generación de residuos líquidos, haciendo el proceso más sostenible y eficiente.

Se sugiere explorar el uso de materiales alternativos para los electrodos y el recipiente, priorizando aquellos que sean resistentes a la corrosión y económicamente accesibles. El acero inoxidable ha mostrado buen desempeño, pero podrían evaluarse otras aleaciones o recubrimientos que mejoren la durabilidad y reduzcan los costos de mantenimiento.

Es importante realizar pruebas a mayor escala y durante periodos prolongados para evaluar la estabilidad del sistema, la acumulación de residuos y la eficiencia real en condiciones similares a las del entorno doméstico en San Andrés.

Se sugiere llevar a cabo un análisis espacial y económico de los sistemas solares fotovoltaicos en San Andrés, con el fin de determinar su viabilidad económica.

Finalmente, se recomienda analizar el destino de los subproductos generados, especialmente el cloro, para evitar impactos negativos en el ambiente o en la salud humana. La implementación de sistemas de neutralización o aprovechamiento de estos subproductos puede convertir el proceso en una solución aún más integral y responsable.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bogotá, D. C. (s. f.). Boletín técnico: Encuesta de Hábitat y Usos Socioeconómicos 2019 (ENHAB), diciembre de 2020.
- Botero, E. (2015). Análisis de factibilidad técnica y de mercado de un programa de eficiencia energética y energía solar FV en San Andrés Islas. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Carvajal-Osorio, H., Bajativa, J. H., Alonso, & Julio, A. (s. f.). Ingeniería y Competitividad.
- Corpoema. (2015). Apoyo a la ejecución de programas piloto de eficiencia energética.
- DANE. (2018). Pobreza multidimensional: Región – Departamento San Andrés. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/pobreza/2018/Region_bt_pobreza_multidimensional_18_san-andres.pdf
- Díaz Páez, A. M. (2025, abril 12). San Andrés: la promesa de quemar las basuras del relleno sanitario, 15 años tarde. El Espectador. <https://www.elespectador.com/ambiente/san-andres-la-promesa-de-quemar-las-basuras-del-relleno-sanitario-15-anos-tarde/>
- Espinosa, L. F., et al. (2021). Hybrid renewable energy systems for off-grid electrification in islands: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111119>
- Fraunhofer ISE. (2024). Photovoltaics report. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
- Gómez, J. D., et al. (2020). Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for off-grid communities: A case study in San Andrés Island, Colombia. Energy Reports, 6, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.154>
- Gómez, J. R., Afanador, J. E., & Rodríguez, J. L. (2016). Hacia la sostenibilidad eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia: Análisis de alternativas. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <https://publications.iadb.org/es/node/15668>
- Hacia la sostenibilidad eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia: Análisis de alternativas. (2015). UPME; BID.
- Hernández Portillo, Y. (2020). Sistema generador de calor implementando hidrógeno como vector energético.

- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- Informe REDCAM_2018. (s. f.).
- International Energy Agency. (s. f.). Hydrogen. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- International Energy Agency. (2025). Global hydrogen review 2025. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable power generation costs in 2022. <https://www.irena.org/publications/2023/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- Kari, M., Lack, F., El-Hawaii, M. M., & Haidari, M. (2020). Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on the hydrogen economy in Qatar. *Computers & Chemical Engineering*, 143, 107144. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107144>
- Kuang, Y., Kenney, M. J., Meng, Y., Hung, W., Liu, Y., Huang, J. E., Prasanna, R., Li, P., Li, Y., Wang, L., Lin, M., McGehee, M. D., Sun, X., & Dai, H. (2019). Solar-driven, highly sustained splitting of seawater into hydrogen and oxygen fuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(14), 6624–6629. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900556116>
- LUIOCH. (2020, agosto 14). Hidrógeno verde. *El Tiempo*. <https://search.proquest.com/docview/2433767769>
- MarketsandMarkets. (2025). Hydrogen market by sector, application and region – Global forecast to 2030. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-market-132975342.html>
- McKinsey & Company. (2023). Global energy perspective 2023: Hydrogen outlook. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>
- Ministerio de Minas y Energía. (s. f.).
- Mojica Flórez, J. (s. f.). San Andrés y Providencia: Documento regional.

- Mossos, Á. J. A. (s. f.). Informe mensual de telemetría: Boletín mensual de operación de localidades con telemetría CNM-IPSE.
- Patrocinador oficial de. (s. f.). <https://www.tensite-energy.com>
- PEDCTI San Andrés. (s. f.).
- Plan estratégico departamental de ciencia, tecnología e innovación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2012).
- Rajesh, T., Tamils Elvan, K. S., Vijayalakshmi, A., Narendra Kumar, C., & Anitha Reddy, K. (2020). Design and implementation of an automatic solar tracking system for a monocrystalline silicon material panel using MPPT algorithm. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.635>
- Ramírez, J. (2014). Análisis de opciones de suministro de gas natural a San Andrés Isla. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Sánchez-Drizo, R., Silva-Casarín, R., Mendoza-Baldwin, E. G., & González-Huerta, R. d. G. (2012). Hidrógeno del mar. TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas, 15(1), 49–61. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2012000100005
- SOPESA S. A. E. S. P. (2018). Informe de gestión y resultados: Diagnóstico ZNI 2018.
- Superintendencia Delegada para Energía y Gas, Dirección Técnica de Gestión de Energía. (2018). Zonas no interconectadas (ZNI): Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2018.
- UPME. (2015). Promoción a la integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.
- UPME. (2019). Plan energético nacional 2020–2050. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf
- UPME. (2022). Plan energético nacional 2022–2050. <https://www1.upme.gov.co/planenergetico>
- Wang, Y., Fan, Y., Wang, D., Liu, Y., Qi, Z., & Liu, J. (2020). Optimization of the areas of solar collectors and photovoltaic panels in liquid desiccant air-conditioning systems using solar energy in isolated low-latitude islands. Energy, 198, 117324. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117324>

- Zeng, K., & Zhang, D. (2023). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 94, 102040. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.102040>
- Zhao, Y., et al. (2022). Direct seawater electrolysis for hydrogen production: A review. *Energy & Environmental Science*, 15(4), 1343–1369. <https://doi.org/10.1039/D1EE03454B>
- Zonas no interconectadas (ZNI): Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017. (2017).