



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



TESIS

ELECTROLISIS DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE HIDROGENO
MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN PUNO

PRESENTADA POR:
LEONIDAS VILCA CALLATA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

PUNO, PERÚ

2024

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

ELECTROLISIS DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN PUNO

AUTOR

LEONIDAS VILCA CALLATA

RECuento de palabras

21564 Words

RECuento de caracteres

108171 Characters

RECuento de páginas

99 Pages

Tamaño del archivo

2.5MB

Fecha de entrega

Mar 20, 2024 2:23 PM GMT-5

Fecha del informe

Mar 20, 2024 2:26 PM GMT-5

● **16% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 14% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)



Dr. Elmer Coyla Idme
INGENIERO DE SISTEMAS
CIP. 61855



Resumen



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

TESIS

**ELECTROLISIS DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO
MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN PUNO**



**PRESENTADA POR:
LEONIDAS VILCA CALLATA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE


D.Sc. MATEO ALEJANDRO SALINAS MENA

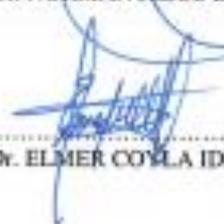
PRIMER MIEMBRO


D.Sc. EDILBERTO VELARDE COAQUIRA

SEGUNDO MIEMBRO


Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

ASESOR DE TESIS


Dr. ELMER COYLLA IDME

Puno, 05 de enero del 2024

ÁREA: Ciencias de la ingeniería.

TEMA: Electrolisis del agua para la generación de hidrogeno mediante un sistema fotovoltaico en Puno

LÍNEA: Mecánica Eléctrica.



DEDICATORIA

A **Marleny Maria** y mi hija **Marfil Liliam** mis Padres **Miguel & Damiana** (Que en paz Descanse), **Paulino & Dionicia**, mis hermanos y hermanas por el apoyo y confianza que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis amigos y compañeros por los ánimos y consejos para seguir superándome.



AGRADECIMIENTOS

A los docentes del programa de doctorado, quienes me guiaron el desarrollo durante el transcurso de mi tesis, demostrando muchos deseos de compartir su conocimiento y experiencia con sencillez y entusiasmo, finalmente a los jurados y asesor, y a todos los Docentes de la UNA Puno por el conocimiento compartido.

A **Dios** por haberme permitido lograr este sueño.

Proverbios 1:7 ” El principio de la sabiduría es el temor de jehová. Los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza”



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	2
1.1.1. Energía solar	2
1.1.2. Energía solar fotovoltaica	3
1.1.3. Principios Básicos de la Energía Fotovoltaica:	4
1.1.4. Diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos	5
1.1.5. Caracterización de materiales fotovoltaicos	7
1.1.6. Influencia de Condiciones Ambientales:	7
1.1.7. Almacenamiento de Energía Fotovoltaica:	10
1.1.8. Otras formas de almacenamiento de energía	13
1.1.9. Innovaciones Tecnológicas en Energía Fotovoltaica:	14
1.1.10. Sistemas fotovoltaicos aislados	16
1.1.11. Energía del hidrogeno y su comportamiento	19
1.1.12. Electrolisis del agua	20
1.1.13. Equipos de producción de hidrogeno	21
1.1.14. Producción de hidrogeno mediante la electrolisis del agua	23
1.1.15. Elementos que intervienen en la electrolisis del agua	24
1.1.16. Célula de electrolisis	29
1.1.17. Almacenamiento de hidrogeno	30
1.1.18. Rendimiento de la producción de hidrogeno	31
1.2. Antecedentes	33

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.	Identificación del problema	39
2.2.	Enunciados del problema	39
2.2.1.	Problema general	39
2.2.2.	Problemas específicos	39
2.3.	Justificación	40
2.4.	Objetivos de la investigación	40
2.4.1.	Objetivo general	40
2.4.2.	Objetivos específicos	40
2.5.	Hipótesis	40
2.5.1.	Hipótesis general	40
2.5.2.	Hipótesis específicas	41

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Lugar de estudio	42
3.2.	Población	43
3.3.	Muestra	43
3.4.	Métodos de investigación	43
3.4.1.	Sistema solar fotovoltaico	43
3.4.2.	Generador de hidrogeno por medio de la electrolisis del agua	44
3.4.3.	Producción de hidrogeno por electrolisis del agua	45
3.5.	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	46
3.5.1.	Análisis y prueba estadística	46

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Irradiación solar en la ciudad de Puno	47
4.2.	Célula de combustible de hidrogeno	48
4.3.	Producción de hidrogeno	49
4.4.	Análisis de la variancia (ANOVA) en la producción de hidrogeno	50
4.5.	Análisis de costo y beneficio en la producción de hidrogeno	51
4.6.	Análisis de resultados estadísticos Anova y su interpretación (Minitab)	52



CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	62



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Células fotovoltaicas de silicio cristalino	5
2. Materiales electrolíticos de celdas comerciales	26
3. Separadores electrolíticos de celdas comerciales	27
4. Producción de hidrogeno por día, con tres células de combustible	50
5. Anova en la producción de hidrogeno	50
6. Prueba estadística Tukey	51
7. Analisis de Varianza (Anova)	52



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Capacidad energética a nivel mundial hasta el 2050.	2
2. Estimación de la curva de radiación solar.	3
3. Estructura básica de una célula solar	4
4. Analisis de sombras instalación FV	6
5. PV SYST para el diseño de instalaciones FV	7
6. Comportamiento de una célula FV potencia y temperatura	8
7. Comportamiento de una célula FV corriente e irradiancia	9
8. Comportamiento de una célula FV potencia e irradiancia	9
9. Orientación, inclinación y sombras en fotovoltaica	10
10. Baterías de litio	11
11. Batas de Gel	12
12. Baterías mediante condensadores	13
13. Generación de hidrogeno	14
14. Células de Peovskita	15
15. Componentes de un SPFA	17
16. Bombeo solar	19
17. Proceso de obtención del hidrogeno con energías renovables	20
18. Electrolisis del agua	21
19. Proceso de reacción de la electrolisis del agua alcalina	21
20. Electrolisis por membrana de intercambio de protones	22
21. Celda de electrolisis por oxido solido	23
22. Módulo de prueba de la electrolisis del agua, generación de hidrogeno y oxigeno	24
23. Celda bipolar del tipo convencional.	29
24. Célula de combustible de hidrogeno.	30
25. Placa de célula de combustible de hidrogeno.	30
26. Almacenamiento de hidrogeno y sistema de medición de alta presión	31
27. Producción de electricidad en función a la densidad de corriente y voltaje	32
28. Ubicación geográfica del lugar de estudio	42
29. Sistema fotovoltaico instalado	43
30. Perfil de irradiación solar similar a la ciudad de Puno	44



31.	Célula de combustible de hidrogeno	45
32.	Equipo electrolizador del agua	45
33.	Irradiación solar mensual durante el periodo de experimentación, 2022	47
34.	Comportamiento energético de la célula de combustible de hidrogeno	48
35.	Producción de hidrogeno y consumo energético del gas de hidrogeno	49
36.	Análisis comparativo de medias (PSI) en la producción de hidrogeno	51
37.	Costo beneficio en la producción de hidrogeno	52
38.	Resultado de la gráfica de Tukey	53
39.	Resultado de la gráfica de Intervalos	53
40.	Resultado de la gráfica de normalidad	54
41.	Resultado de la gráfica del comportamiento de cada Celda	55



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Medidor Solar (Amprobe Solar 100)	62
2. Modulo fotovoltaico de 250W, 12VDC	63
3. Sensor de presión	64
4. Galería de fotografías	65
5. Datos de irradiación solar	66
6. Artículo	71

RESUMEN

La energía del hidrogeno, es una de las fuentes energéticas sostenibles para el medio con cero emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, puede contribuir al desarrollo de energías limpias en la región de Puno. El objetivo de la presente investigación es determinar la producción de hidrogeno por medio de la electrolisis del agua mediante un sistema fotovoltaico en Puno. Para desarrollar esta investigación se utilizó el método de la electrolisis de agua como medio de conversión energética de la celda de combustible a producción de hidrogeno, suministrado por una fuente de energía solar fotovoltaica. Este sistema fue desarrollado con placas de acero inoxidable para evitar la corrosión del acero en el proceso de la electrolisis. Los resultados determinaron la producción de hidrogeno de 10.69 PSI/d, en función al diseño experimental de las celdas de combustible, utilizando la energía solar fotovoltaica como fuente de energía sostenible para el medio ambiente. Por lo tanto, el método de la electrolisis del agua utilizado en la celda de combustible, suministrado con energía eléctrica mediante un sistema fotovoltaico autónomo, produjo hidrogeno verde, siendo un sistema energético sostenible en la región de Puno.

Palabras clave: Celda de combustible, Electrolisis del agua, Energía solar fotovoltaica, Hidrogeno.



ABSTRACT

Hydrogen energy is one of the sustainable energy sources for the environment with zero emissions of polluting gases and greenhouse effect, it can contribute to the development of clean energy in the Puno region. The objective of the present investigation is to determine the production of hydrogen through the electrolysis of water through a photovoltaic system in Puno. To develop this research, the method of water electrolysis was used as a means of energy conversion from the fuel cell to hydrogen production, supplied by a photovoltaic solar energy source. This system was developed with stainless steel plates to avoid corrosion of the steel in the electrolysis process. The results determined the hydrogen production of 10.69 PSI/d, based on the experimental design of the fuel cells, using photovoltaic solar energy as a sustainable energy source for the environment. Therefore, the water electrolysis method used in the fuel cell, supplied with electrical energy through an autonomous photovoltaic system, produced green hydrogen, being a sustainable energy system in the Puno region.

Keywords: Fuel cell, water electrolysis, photovoltaic solar energy, hydrogen

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se enfoca en la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua mediante un sistema fotovoltaico autónomo. En la primera sección, se aborda detalladamente el problema de investigación relacionado con la obtención de hidrógeno, la utilización de energía eléctrica mediante un sistema fotovoltaico autónomo, el análisis del recurso solar en la región de Puno y la problemática en la obtención de hidrógeno con diversas técnicas hasta la fecha.

En la actualidad, en la región de Puno, hay escasos estudios sobre la producción de hidrógeno mediante suministro de electricidad con energías renovables. La falta de investigación se atribuye a las condiciones medioambientales muy favorables de Puno, especialmente en días soleados, que hacen que el recurso solar sea una fuente de energía sostenible idónea para la producción de hidrógeno.

Luego, se presenta un marco teórico exhaustivo que aborda temas como la energía solar fotovoltaica, el concepto de hidrógeno, métodos de producción, electrólisis del agua para producir hidrógeno, celdas de combustible y el rendimiento en la producción de hidrógeno. También se describen los materiales y métodos utilizados en la investigación, comenzando desde la zona de estudio en la ciudad de Puno, los equipos y materiales empleados en este proyecto, el método y las técnicas para el procesamiento y la recolección de datos. Finalmente, se concluye con el análisis de los datos, presentando los resultados de manera interpretativa mediante tablas y figuras representativas de la experimentación en la producción de hidrógeno.

Estos resultados se aplicarán en la utilización del hidrógeno como fuente de energía en sistemas de combustión interna en motores diésel y generación de electricidad, almacenándolo en bancos de baterías o acumuladores de energía.

La estructura del proyecto incluye un resumen en español e inglés, seguido de una introducción detallada, revisión del marco teórico, planteamiento del problema, hipótesis y objetivos. También se especifican los materiales y métodos utilizados, seguido de la presentación de resultados y discusiones con referencia a otros autores, concluyendo con las correspondientes conclusiones, recomendaciones y anexos desarrollados en la presente investigación.

CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico

1.1.1. Energía solar

La energía solar se presenta como una fuente de energía que es renovable, sostenible y se encuentra ampliamente distribuida. Al ser un recurso renovable, tiene el potencial de sustituir en un futuro cercano a los combustibles fósiles, que son ampliamente utilizados. Aunque actualmente su contribución a la producción mundial de electricidad es relativamente baja, alcanzando el 3,6%, la energía solar se ha consolidado de manera sólida entre otras tecnologías de energía renovable. Se proyecta que representará aproximadamente el 31% de la capacidad total instalada de energía renovable en 2022 (Gómez et al., 2018) En la Figura 1 se muestra la capacidad energética mundial hasta en el 2050.

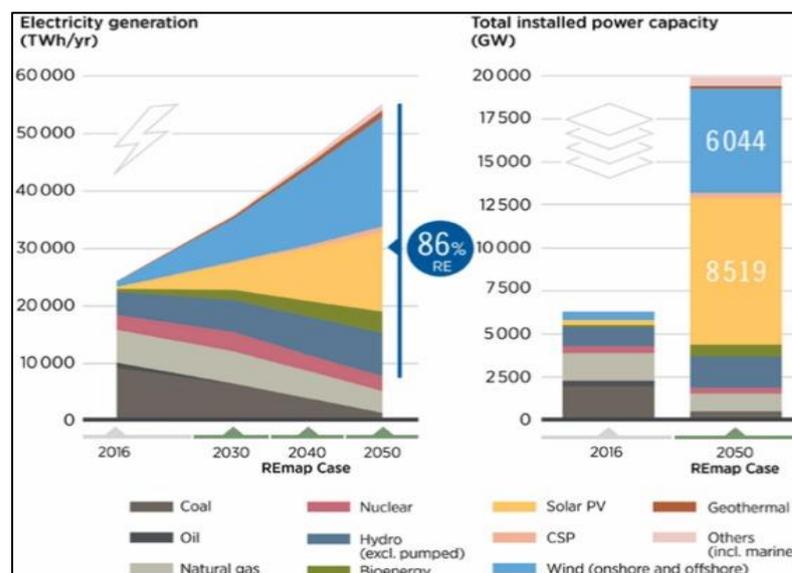


Figura 1. Capacidad energética a nivel mundial hasta el 2050.

Fuente: (Gómez et al., 2018)

1.1.2. Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una de las energías renovables que pueden ayudar a lograr un desarrollo sostenible. Dado que la energía solar también tiene la ventaja de ser confiable, un número creciente de países están promoviendo activamente un sistema industrial impulsado por energía solar. La energía fotovoltaica se genera mediante conversión fotoeléctrica, mientras que la energía solar térmica se genera mediante conversión fototérmica. Aunque existe una tercera vía conocida como conversión foto-térmica-eléctrica, todavía está en desarrollo (Calsi et al., 2020). En la Figura 2 se muestra la radiación solar aproximada.

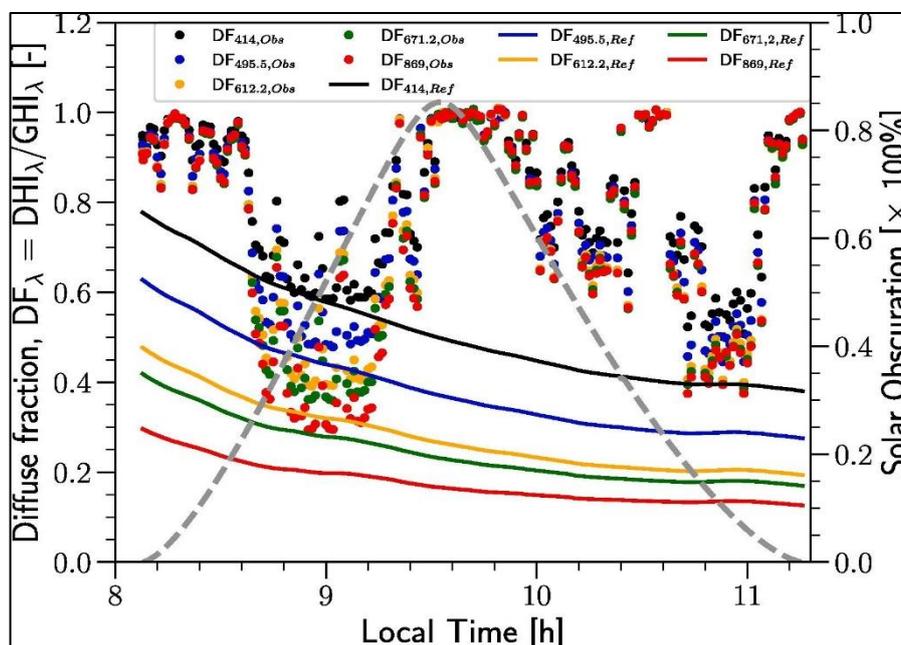


Figura 2. Estimación de la curva de radiación solar.

Fuente: (Calsi et al., 2020)

La conversión de la energía contenida en la radiación luminosa en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Se produce en ciertos materiales semiconductores con la capacidad de absorber la energía contenida en los fotones presentes en la radiación luminosa incidente, transformándola en electricidad. La energía absorbida por estos materiales rompe las uniones químicas entre las moléculas presentes en sus estructuras. Como resultado, se liberan cargas eléctricas que pueden utilizarse para realizar trabajo. El efecto fotovoltaico es una característica física intrínseca al material que compone los dispositivos de conversión fotovoltaica.

1.1.3. Principios Básicos de la Energía Fotovoltaica:

1.1.3.1. Conversión de luz solar en electricidad mediante paneles solares.

La conversión de la luz solar en electricidad mediante paneles solares es un proceso clave en la generación de energía sostenible. Este fenómeno, conocido como efecto fotoeléctrico, ocurre cuando los fotones de la luz solar inciden en células fotovoltaicas, liberando electrones y generando una corriente eléctrica continua. Según (Lamigueiro, 2020), el silicio, presente en estos paneles, desempeña un papel fundamental en esta transformación. Lamigueiro (2020) destaca que este proceso es esencial para aprovechar una fuente limpia y renovable, contribuyendo a la mitigación de impactos ambientales y promoviendo la sostenibilidad energética.

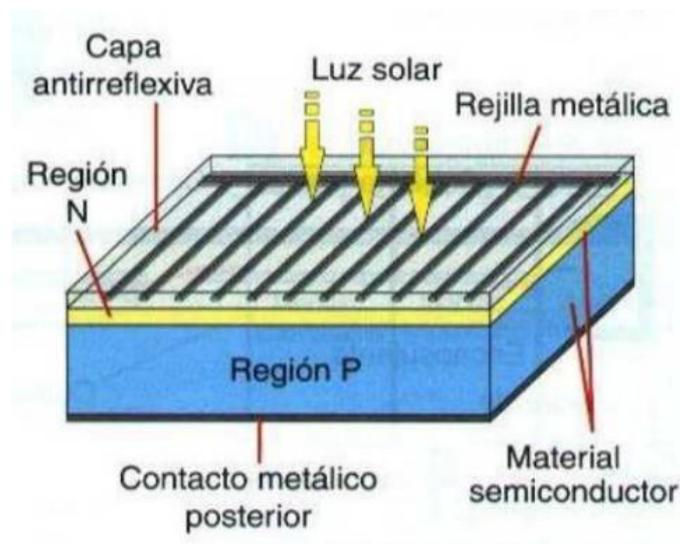


Figura 3. Estructura básica de una célula solar

Fuente: (Costejon & Santamaria, 2010)

1.1.3.2. Efecto fotoeléctrico y generación de corriente eléctrica

Los fundamentos del efecto fotoeléctrico y la generación de corriente eléctrica en células fotovoltaicas constituyen la esencia de la conversión de la luz solar en electricidad. Este proceso, según (Lamigueiro, 2020) se basa en la capacidad de ciertos materiales, como el silicio, para liberar electrones

cuando son energizados por fotones de la luz solar. El trabajo de (Zilles et al., 2021) subraya que las células fotovoltaicas aprovechan este fenómeno al incorporar semiconductores que, al ser impactados por la luz solar, generan una corriente eléctrica continua. Este principio es crucial para la eficiencia de los paneles solares y para la producción sostenible de energía. La comprensión profunda de estos fundamentos, como destacan (Costejon & Santamaria, 2010), impulsa avances tecnológicos en la mejora de la eficiencia y la aplicación generalizada de sistemas fotovoltaicos, contribuyendo significativamente a la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

Tabla 1

Células fotovoltaicas de silicio cristalino

Tipo de célula	Eficiencia	Características
Silicio monocristalino	15...18%	Estructura cristalina uniforme, se fabrica en lingotes cilíndricos de gran pureza que se cortan en obleas. Se gasta mucha energía en su construcción. Es el primer material en utilizarse industrialmente
Silicio policristalino	12...14%	Estructura cristalina no uniforme se fabrican en moldes rectangulares. Menor coste que el silicio cristalino.
Silicio amorfo	6.....8%	Estructura no cristalina. Su potencia se degrada con el tiempo de utilización. Se puede depositar como una capa muy fina en muchos tipos de soportes. Bajo coste de fabricación

Fuente: (Costejon & Santamaria, 2010)

1.1.4. Diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos

1.1.4.1. Optimización para maximizar la generación eléctrica solar.

Las estrategias de optimización son fundamentales para maximizar la generación eléctrica solar. (Al-Ezzi & Ansari, 2022) destacan la importancia de mejorar la eficiencia y rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos mediante factores como la orientación de los paneles, el seguimiento solar y la gestión

de sombras. La optimización de la inclinación y orientación, buscando la máxima exposición solar, es un enfoque clásico (Kedir et al., 2023).

La implementación de sistemas de seguimiento solar, que ajustan la posición de los paneles durante el día, se ha revelado como una estrategia efectiva (Schultz & Carvalho, 2022)

Además, técnicas avanzadas, como el uso de algoritmos de control inteligentes y el monitoreo en tiempo real, han surgido como prácticas prometedoras (Kaldellis et al., 2017). Estas estrategias permiten adaptarse a las condiciones cambiantes, maximizando la captación de energía solar y optimizando la producción eléctrica.

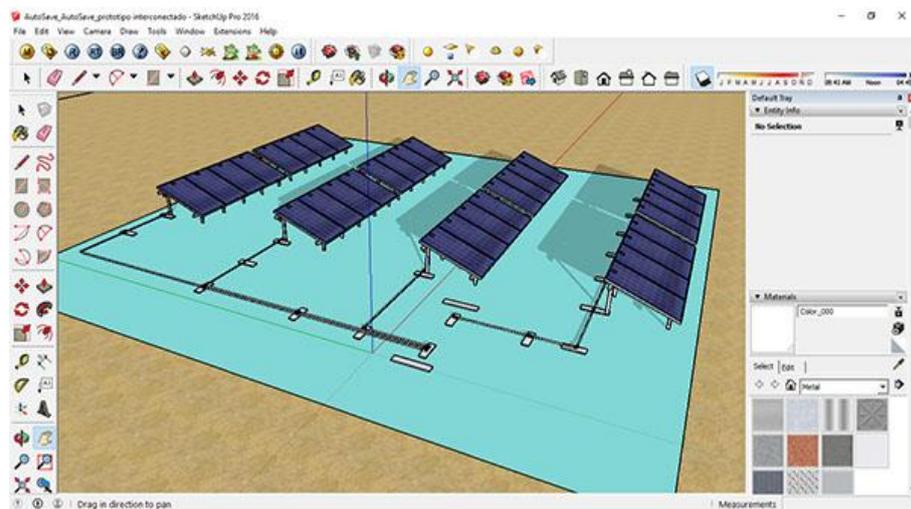


Figura 4. Análisis de sombras instalación FV

Fuente: (Costejon & Santamaria, 2010)

1.1.4.2. Herramientas de simulación para instalaciones fotovoltaicas.

La aplicación de herramientas de simulación desempeña un papel crucial en el diseño preciso de instalaciones fotovoltaicas. Mediante simulaciones, se pueden evaluar factores como la ubicación, la inclinación, la sombra y la eficiencia del sistema, optimizando su rendimiento (Cabezón et al., 2022). Herramientas como PVsyst y Helioscope permiten modelar el comportamiento de los paneles solares bajo diversas condiciones climáticas y geográficas (Essam et al., 2022). Estas simulaciones proporcionan datos valiosos para tomar decisiones informadas en el diseño, dimensionamiento y

posicionamiento de los paneles, mejorando la eficiencia global y la rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas. La integración de herramientas de simulación representa una estrategia esencial para garantizar la eficacia y sostenibilidad de los proyectos fotovoltaicos.



Figura 5. PV SYST para el diseño de instalaciones FV

Fuente: (Cabezón et al., 2022)

1.1.5. Caracterización de materiales fotovoltaicos

La mejora de la eficiencia de las celdas solares involucra la evaluación de diversas tecnologías y materiales. Este proceso implica comparar tecnologías establecidas como las celdas PERC, CIGS y HIT, así como explorar innovaciones como las celdas de perovskita, conocidas por sus avances prometedores. Se analizan distintos tipos de celdas solares, considerando aspectos como eficiencia, estabilidad y costo. La investigación y evaluación constante de estos avances tecnológicos y materiales son cruciales para impulsar el desarrollo de celdas solares más eficientes y sostenibles (Espinoza et al., 2015).

1.1.6. Influencia de Condiciones Ambientales:

1.1.6.1. Impacto climático en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos.

El impacto climático en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos es un factor crucial que afecta su rendimiento y operación a lo largo del tiempo. La variabilidad de las condiciones climáticas, como la irradiancia solar y la temperatura ambiente, influyen directamente en la generación de electricidad por los paneles solares. Investigaciones han demostrado que regiones con

climas específicos, como altas temperaturas o nubosidad frecuente, pueden experimentar una disminución en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos (Hashim & Hassan, 2022). Además, la acumulación de polvo en las superficies de los paneles solares también puede reducir su eficiencia (Angulo et al., 2020). Este fenómeno resalta la importancia de evaluar y entender el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos en diferentes condiciones climáticas para mejorar su diseño y optimizar su rendimiento (Espinoza et al., 2015). La implementación de estrategias adecuadas, como el monitoreo constante y la limpieza periódica, puede mitigar los efectos negativos del clima, asegurando así un rendimiento más consistente y eficiente de los sistemas fotovoltaicos a lo largo del tiempo.

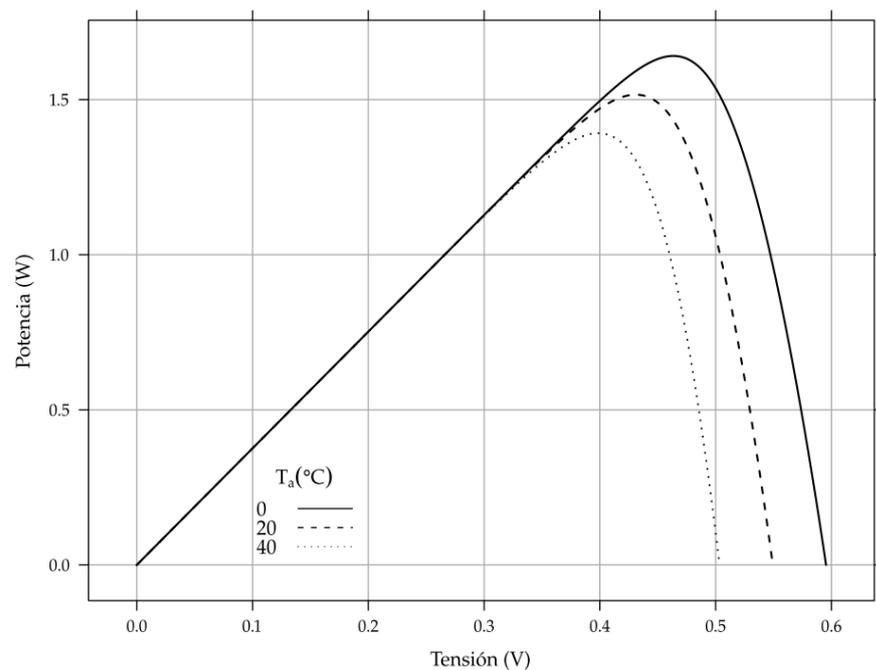


Figura 6. Comportamiento de una célula FV potencia y temperatura
Fuente: (Lamigueiro, 2020)

La figura 6 indica el comportamiento de la potencia activa de la célula fotovoltaica, se aprecia que la temperatura y la potencia tienen un comportamiento inverso, siendo uno de los mayores desafíos para los fabricantes e investigadores sobre mejoras en células fotovoltaicas, normalmente la forma de refrigeración natural es la que mayormente se utiliza.

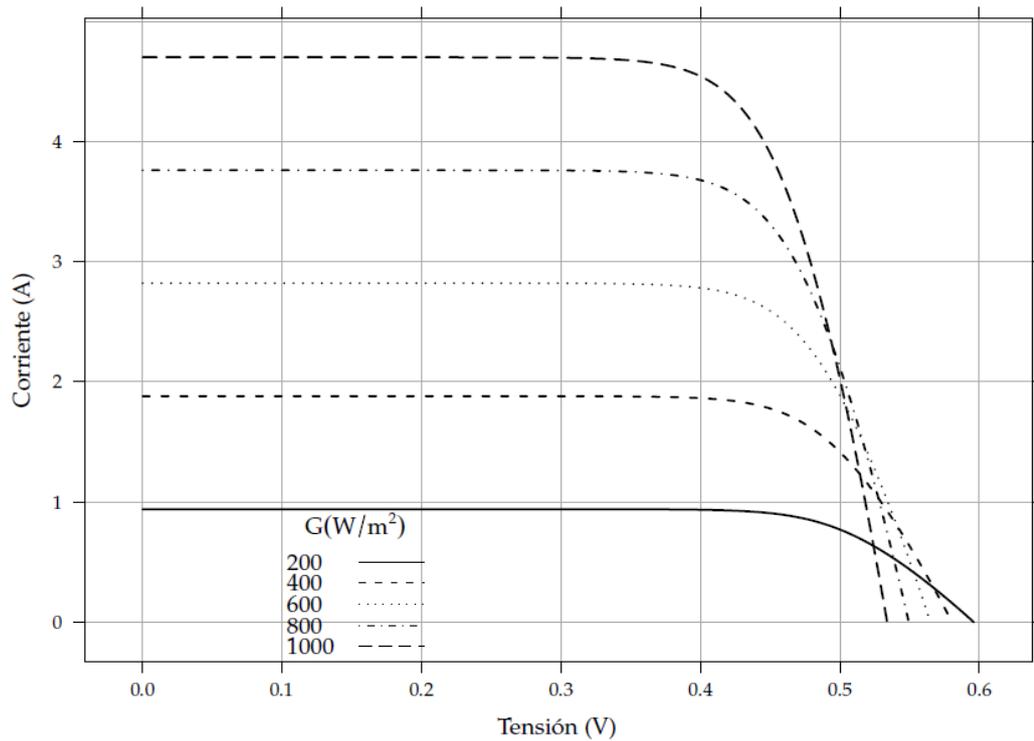


Figura 7. Comportamiento de una célula FV corriente e irradiancia

Fuente: (Lamigueiro, 2020)

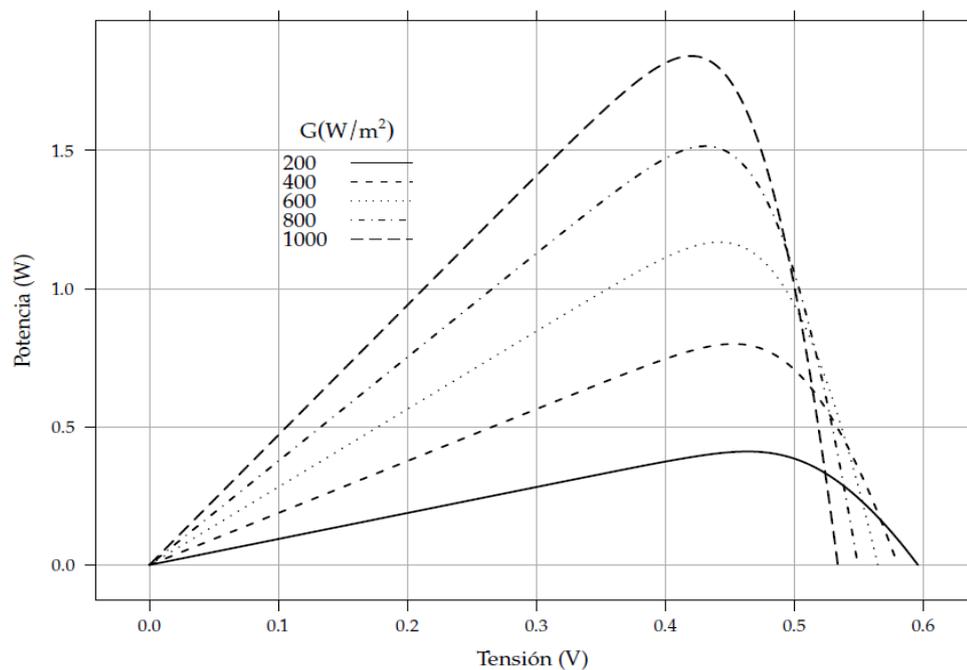


Figura 8. Comportamiento de una célula FV potencia e irradiancia

Fuente: (Lamigueiro, 2020)

1.1.6.2. Estudio de sombreado y su efecto en la generación eléctrica

El estudio de sombreado en sistemas fotovoltaicos es esencial para comprender cómo la obstrucción parcial o total de la luz solar afecta la generación eléctrica. El sombreado puede ser causado por objetos cercanos, como edificios, árboles u otras estructuras, y tiene un impacto significativo en la eficiencia de los paneles solares. Investigaciones han demostrado que incluso pequeñas áreas sombreadas pueden provocar pérdidas considerables en la producción de electricidad. (Barbosa et al., 2023). La implementación de técnicas avanzadas, como el uso de microinversores y optimizadores de potencia, puede mitigar los efectos negativos del sombreado al minimizar su impacto en paneles individuales. Comprender cómo el sombreado afecta la distribución de la luz solar en el sistema fotovoltaico es crucial para optimizar el diseño e incrementar la eficiencia en la generación eléctrica, asegurando así un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo (Senthilkumar et al., 2023).



Figura 9. Orientación, inclinación y sombras en fotovoltaica

Fuente: (Costejon & Santamaria, 2010)

1.1.7. Almacenamiento de Energía Fotovoltaica:

La investigación sobre tecnologías de almacenamiento es esencial para abordar la intermitencia inherente a la energía solar fotovoltaica. La eficiencia en la generación de energía a partir de fuentes renovables, como la solar, se ve desafiada por la variabilidad climática y los cambios en la disponibilidad de luz solar. Diversas

tecnologías de almacenamiento emergentes están siendo investigadas para superar estos desafíos y proporcionar soluciones robustas y sostenibles.

1.1.7.1. Baterías de ion de litio

Ampliamente utilizadas en aplicaciones de almacenamiento de energía, continúan siendo objeto de investigación para mejorar su rendimiento, reducir costos y prolongar su vida útil. (Forbes & Lord, 2023)

Los avances en la química de las celdas y el diseño de electrodos están contribuyendo a optimizar la densidad de energía y la eficiencia de estas baterías, haciéndolas más competitivas en una variedad de aplicaciones.



Figura 10. Baterías de litio

Fuente: (Forbes & Lord, 2023)

Las baterías de iones de litio operan mediante la transferencia de iones de litio entre su cátodo y ánodo durante las reacciones electroquímicas. Durante la descarga, los iones de litio fluyen desde el ánodo hasta el cátodo, liberando energía eléctrica. En la recarga, este proceso se invierte. El electrolito, generalmente líquido o sólido, facilita el movimiento de los iones. La estructura de capas de materiales en el ánodo y cátodo permite la intercalación y desintercalación de iones, facilitando un ciclo de carga y descarga eficiente (Andjela, 2021)

1.1.7.2. Las baterías de flujo,

Son especialmente atractivas para aplicaciones a gran escala. Su capacidad de almacenamiento se basa en líquidos electroactivos, lo que proporciona flexibilidad en la capacidad y una mayor durabilidad. Investigadores como (Cardoso et al., 2021) han resaltado la importancia de estas baterías en sistemas de almacenamiento a largo plazo para integrar energías renovables a gran escala.



Figura 11. Batas de Gel

Fuente: (Cardoso et al., 2021)

Las baterías de gel, una variante de las baterías de plomo-ácido, emplean un electrolito en forma de gel en lugar de líquido. Este gel espeso impide el derrame y permite la instalación en diversas posiciones. Durante la descarga, se liberan electrones y iones de plomo del ánodo hacia el cátodo, generando corriente eléctrica. En la recarga, este proceso se invierte. El gel retiene los componentes, reduciendo el riesgo de sulfatación y mejorando la durabilidad. Esta característica hace que las baterías de gel sean ideales para aplicaciones estacionarias y energía renovable (Alfaoyzan & Almasri, 2023).

1.1.7.3. Los supercondensadores

A pesar de tener una capacidad de almacenamiento menor en comparación con las baterías tradicionales, son ideales para aplicaciones que requieren respuestas rápidas y alta eficiencia en la entrega de energía. Investigaciones

recientes, como las de Chen y Smith (2021), han explorado mejoras en la densidad de energía y la vida útil de los supercondensadores.



Figura 12. Baterías mediante condensadores

Fuente: (Calsi et al., 2020)

1.1.8. Otras formas de almacenamiento de energía

1.1.8.1. Almacenamiento térmico

Otra perspectiva interesante es el almacenamiento térmico, que utiliza materiales como sales fundidas o cambio de fase para retener la energía solar en forma de calor. Investigadores como Li y Wang (2020) han demostrado que estas soluciones pueden ser escalables y sostenibles, especialmente en aplicaciones que requieren almacenamiento a largo plazo y una mayor flexibilidad en la entrega de energía.

1.1.8.2. Almacenamiento para producción de hidrógeno

El hidrógeno también se ha destacado como una opción de almacenamiento a largo plazo. La electrólisis del agua, impulsada por la energía solar excedente, produce hidrógeno que puede almacenarse y utilizarse en celdas de combustible para generar electricidad cuando sea necesario.

En resumen, la evaluación de estas tecnologías debe considerar criterios específicos para cada aplicación, como eficiencia, costo y sostenibilidad. La combinación adecuada de estas soluciones de almacenamiento puede no solo abordar los desafíos de intermitencia en la generación solar, sino también

respaldar la transición hacia un sistema de energía más sostenible y resistente a futuro.

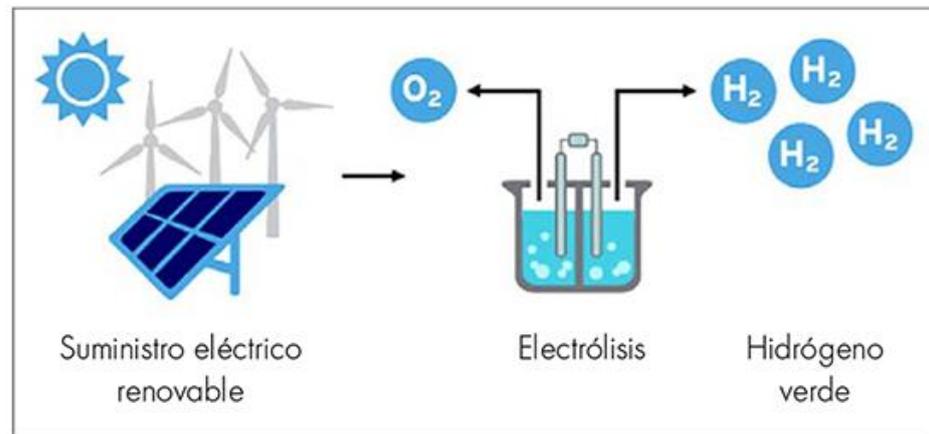


Figura 13. Generación de hidrógeno

Fuente: (Calsi et al., 2020)

1.1.9. Innovaciones Tecnológicas en Energía Fotovoltaica:

1.1.9.1. Tecnologías para mejorar la eficiencia de paneles solares.

La exploración de las últimas tecnologías en paneles solares busca impulsar la eficiencia de la conversión fotovoltaica. Investigadores, como Pérez y colaboradores (2020), han investigado tecnologías emergentes como células solares de perovskita, que ofrecen eficiencias superiores y procesos de fabricación más económicos. Además, la aplicación de capas antirreflectantes basadas en nanotecnología, como sugiere Zhang et al. (2019), optimiza la captura de luz, mejorando la eficiencia global de los paneles. Otras innovaciones incluyen la integración de materiales nanoestructurados y el uso de técnicas avanzadas de diseño de células, destacando la importancia de la investigación continua para llevar a cabo mejoras significativas en la eficiencia de los paneles solares y avanzar hacia una generación de energía más eficaz y sostenible.

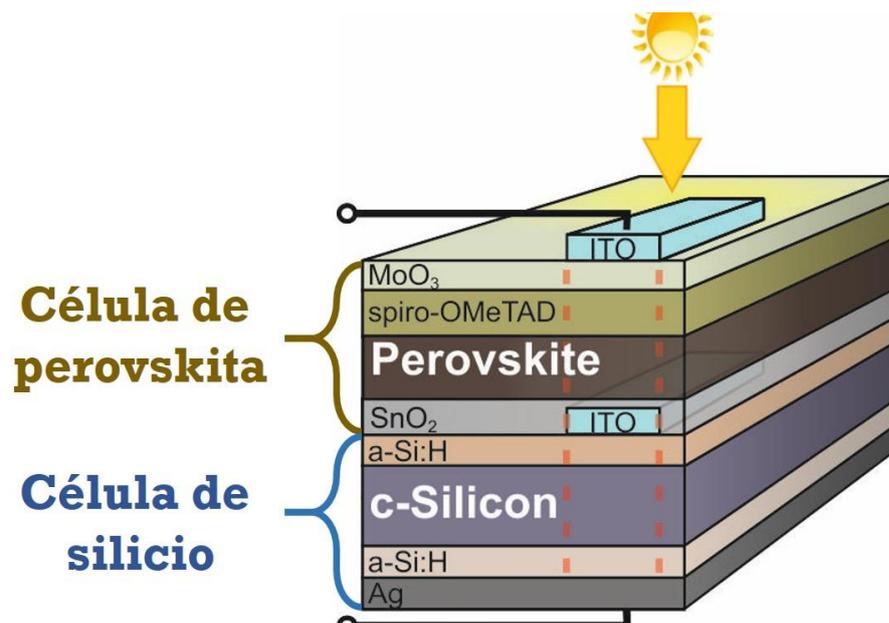


Figura 14. Células de Peovskita

Fuente: (Calsi et al., 2020)

1.1.9.2. Desarrollo de nuevos materiales y métodos en energía solar.

El avance en tecnologías de energía solar ha dado lugar a notables mejoras en la eficiencia de conversión. Entre las innovaciones destacadas:

- Células Tándem: Integrando múltiples capas de materiales semiconductores, las células tándem logran eficiencias superiores al 30%, según estudios de.(Al-Ezzi & Ansari, 2022).
- Células Térmicas Fotovoltaicas (TPV): Al aprovechar la radiación térmica, las TPV han alcanzado eficiencias del 40% en investigaciones recientes (Smith et al., 2022).
- Células Orgánicas: Con avances en polímeros conductores, estas células han superado el 15% de eficiencia, demostrando su potencial en aplicaciones flexibles (Andjela, 2021)
- Células Cuánticas: Utilizando nanotecnología, las células cuánticas han mostrado eficiencias superiores al 25%, destacándose por su versatilidad y aplicaciones en dispositivos flexibles.

- Células Térmicas Solares: Integrando almacenamiento térmico, estas células han logrado eficiencias cercanas al 50%, permitiendo una generación continua incluso en ausencia de luz solar directa (Al-Ezzi & Ansari, 2022).

Estos avances reflejan la diversidad de enfoques para mejorar la eficiencia en la generación de energía solar, ofreciendo soluciones más efectivas y sostenibles.

En cualquier caso, aunque en el futuro se razonen las máximas eficiencias teóricas alcanzables, solo una pequeña parte de la energía solar incidente, podría ser convertida en energía eléctrica, a diferencia de lo que ocurre en procesos térmicos directos. En los que, si las condiciones son favorables, los captadores térmicos pueden trabajar con rendimientos de hasta el 80%.

1.1.10. Sistemas fotovoltaicos aislados

Los Sistemas Fotovoltaicos Aislados (**SFPA**) representan una solución clave para la generación descentralizada de energía eléctrica, especialmente en áreas remotas o donde el acceso a la red eléctrica convencional es limitado. Este enfoque autónomo aprovecha la energía del sol para satisfacer las necesidades energéticas locales, destacándose por su versatilidad y sostenibilidad.

1.1.10.1. Componentes Principales de un SFPA:

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico aislado son básicamente el generador está compuesto por los paneles solares, asimismo cuenta con un regulador de carga también llamado controlador, una fuente de almacenamiento compuesto por las baterías finalmente se puede realizar un proceso de inversión de corriente continua a corriente alterna, según sea el caso.

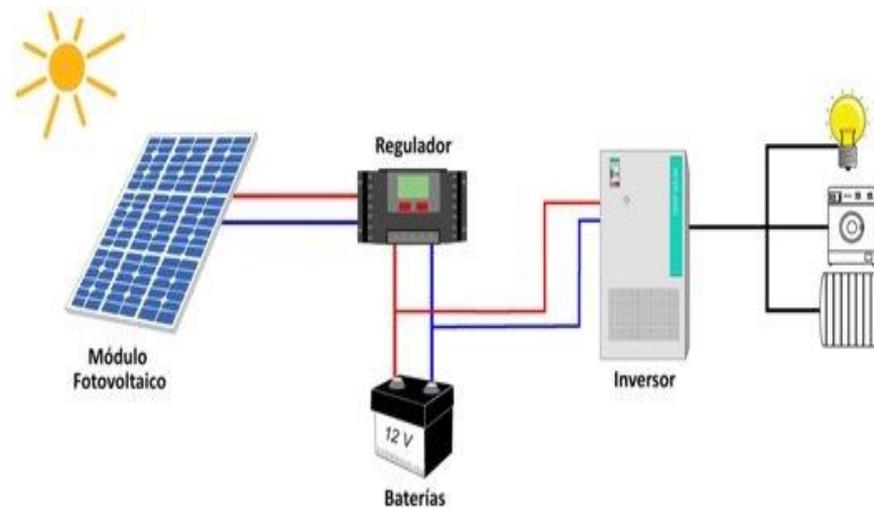


Figura 15. Componentes de un SPFA

Fuente: (Calsi et al., 2020)

- **Paneles Solares Fotovoltaicos:**

Función: Transforman la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

Tecnologías: Paneles cristalinos (silicio monocristalino o policristalino), de capa delgada (silicio amorfo, CIGS, CdTe), cada uno con características específicas (Alfaoyzan & Almasri, 2023)

- **Regulador de Carga:**

Función: Controla la carga de las baterías, evitando sobrecargas y descargas profundas.

Importancia: Prolonga la vida útil de las baterías y garantiza un almacenamiento eficiente (Kenny, 2023).

- **Baterías:** Función: Almacenan la energía generada para su uso durante períodos sin radiación solar.

Tipos: Plomo-ácido, ion de litio, gel, con elección basada en capacidad, ciclo de vida y aplicación específica.

- **Inversor:** Función: Convierte la corriente continua (CC) de las baterías en corriente alterna (CA) para alimentar dispositivos eléctricos convencionales.

Tipos: Inversores de onda cuadrada, modificada o pura, según la calidad de la salida requerida.

- **Caja de Conexiones:**

Función: Facilita la interconexión ordenada y segura de los componentes del sistema.

Importancia: Mejora la eficiencia operativa y simplifica las labores de mantenimiento.

1.1.10.2. Configuraciones de SFPA:

Los SFPA pueden adaptarse a diversas necesidades y condiciones locales mediante configuraciones específicas:

- **Sistemas Autónomos (Off-Grid):**

Características: Operan de forma independiente, sin conexión a la red eléctrica convencional.

Aplicaciones: Zonas remotas, cabañas, estaciones meteorológicas, sistemas de comunicación aislados (Kenny, 2023).

- **Sistemas Híbridos:**

Integración de varias fuentes de energía, como generadores diésel, para garantizar suministro continuo.

Ventajas: Mayor fiabilidad y reducción de dependencia exclusiva de la radiación solar (Kenny, 2023).

- **Sistemas de Bombeo:**

Características: Utilizan la energía solar para alimentar bombas de agua.

Aplicaciones: Suministro de agua en áreas rurales, riego agrícola, sistemas de agua potable..

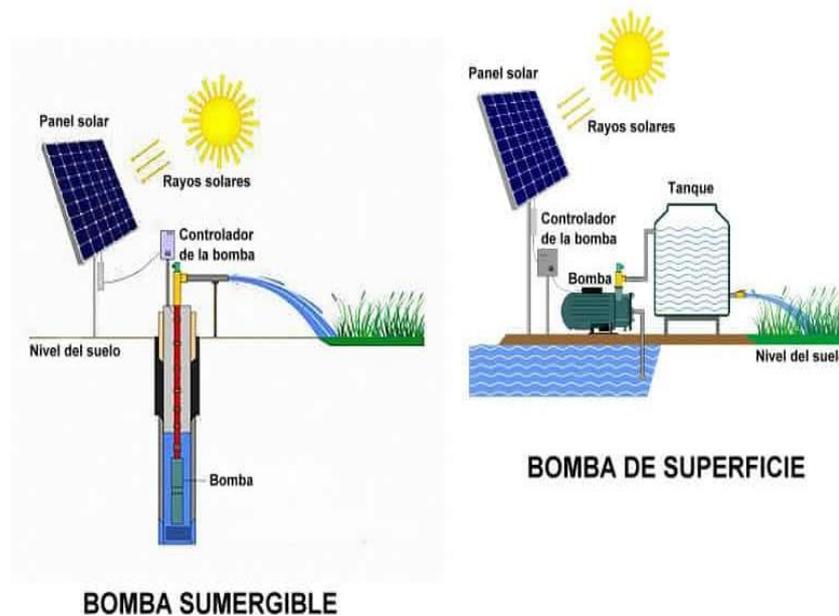


Figura 16. Bombeo solar

Fuente: (Calsi et al., 2020)

1.1.10.3. Eficiencia y Desafíos Técnicos:

La eficiencia de los SFPA está influenciada por varios factores:

- **Orientación e Inclinación:**
Alineación adecuada de los paneles para maximizar la captación solar.
- **Almacenamiento:**
Capacidad y eficiencia de las baterías para garantizar suministro durante periodos sin radiación.
- **Selección de Componentes:**
Elección acertada de paneles, baterías e inversores para la aplicación específica.

Aunque los SFPA ofrecen independencia energética, enfrentan desafíos técnicos, como la variabilidad climática y la necesidad de dimensionamiento preciso para evitar desequilibrios entre la generación y el consumo.

1.1.11. Energía del hidrógeno y su comportamiento

El comportamiento del hidrógeno y el oxígeno gaseoso obtenido por electrólisis alcalina del agua en el fluido es crítico para la eficiencia del proceso. Es importante

calcular y analizar la distribución del hidrógeno como principal problema en la electrólisis. La producción de hidrógeno en solución depende de muchos parámetros. Los gases depositados en la superficie del electrodo sobre el que se producen deben ser retirados de esta ubicación y transferidos a un canal específico en el medio fluido. La transición entre la molécula de hidrógeno formada en el electrodo en un volumen finito y un electrolito que lo rodea (líquido - gas) generalmente se explica por los mecanismos de transferencia de iones. Estos mecanismos de transferencia de iones son posibles con transiciones de migración, difusión y convección (Romdhane, 2013) En la Figura 15 se muestra el proceso de producción del hidrogeno con energías renovables.

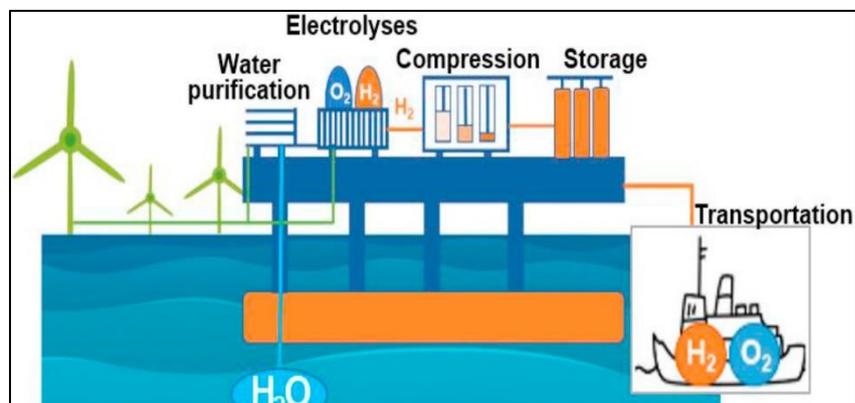
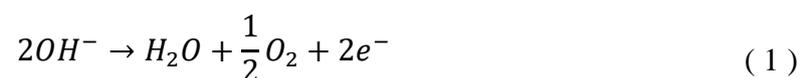


Figura 17. Proceso de obtención del hidrogeno con energías renovables

Fuente: (Romdhane, 2013)

1.1.12. Electrolisis del agua

La electrólisis de agua alcalina es una reacción química endotérmica a través de la cual la molécula se puede dividir en hidrógeno y oxígeno cuando se suministra una cierta cantidad de electricidad y calor. La reacción química se presenta en la ecuación (1) (Sakr et al., 2018)



En general, la eficiencia de trabajo de la electrólisis alcalina es de 47 a 82%. En la electrólisis alcalina, el níquel platinado más común se usa como cátodo, mientras que el níquel se prefiere para el cobre revestido con óxido metálico como el manganeso, tungsteno y rutenio. En general, se utiliza KOH o NaOH para la solución de electrolitos, (Figura 16). El electrolito líquido no se consume durante la

reacción, pero debe renovarse por otras pérdidas del sistema que se produzcan durante la producción de hidrógeno (Hany et al., 2020).

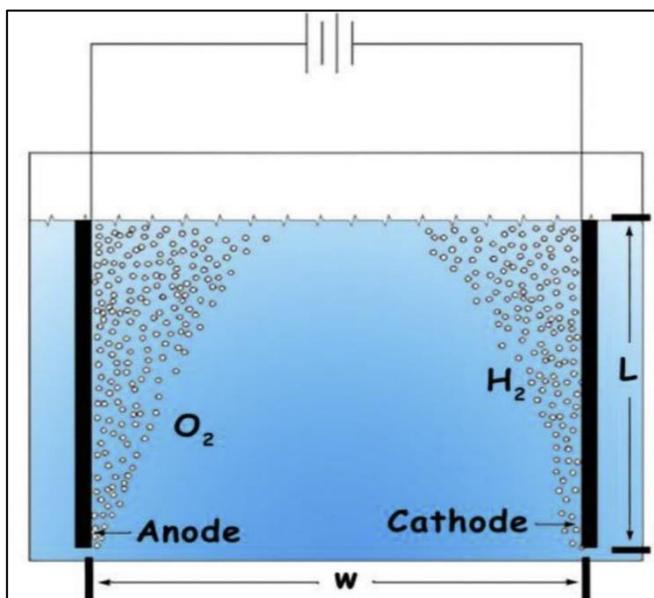


Figura 18. Electrolisis del agua

Fuente: (Hany et al., 2020).

1.1.13. Equipos de producción de hidrogeno

La producción de hidrogeno se puede dividir en electrolisis de agua alcalina, electrolisis de agua con membrana de intercambio de protones de hidrogeno y electrolisis de oxido sólido (Benghnia et al., 2017). En los siguientes apartados se muestra los tipos de métodos para la producción de hidrogeno.

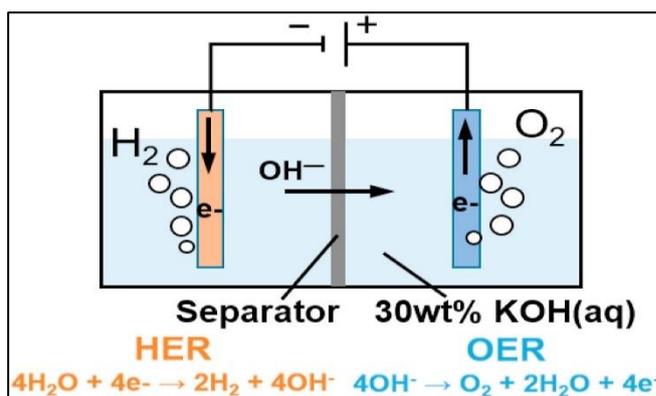


Figura 19. Proceso de reacción de la electrolisis del agua alcalina

Fuente: (Amores et al., 2016)

1.1.13.1. Electrolisis del agua alcalina

Es una técnica de gran capacidad de producción de hidrogeno y bajo, pero el tamaño constructivo es demasiado grande (Figura 18). En muchos países como es China se ha implementado este tipo de técnica para la producción de hidrogeno a escalas elevadas, sin embargo, este electrolizador necesita un sistema de disipación o enfriamiento con óptimas condiciones de operación y funcionamiento (Amores et al., 2016).

1.1.13.2. Electrolisis del agua con membrana de intercambio de protones

En la actualidad lo lideran Estados Unidos, Canadá y Alemania, la técnica de producción de hidrogeno mediante de la electrolisis de agua con membrana de intercambio de protones es tamaño reducido y tiene un proceso de reacción química rápido, sin embargo, el precio es relativamente elevado en la etapa inicial de implementación y construcción, está compuesto principalmente por placas en los extremos con ánodo y cátodo, un electrolito químico y la membrana de intercambio de protones (Ursúa et al., 2020), en la Figura 17 se muestra el esquema de obtención de hidrogeno.

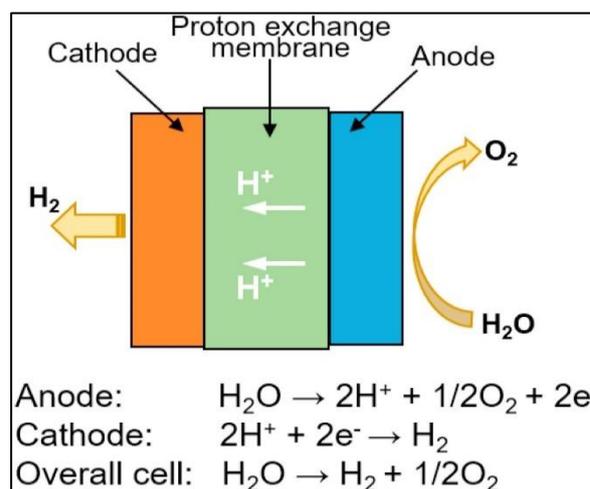


Figura 20. Electrolisis por membrana de intercambio de protones

Fuente: (Ursúa et al., 2020)

1.1.13.3. Electrolisis de oxido solido

Es un método de obtención de hidrogeno que trabaja a muy alta temperatura entre 650 °C a 1000 °C, es altamente eficiente en su funcionamiento, no requiere un catalizador como medio de reacción química. Este proceso puede absorber los gases de efecto invernadero, sin embargo, en la actualidad se experimenta a nivel de laboratorio por su complejidad y funcionamiento a elevadas temperaturas (Udousoro & Dansoh, 2019), en la Figura 19 se muestra el proceso de funcionamiento.

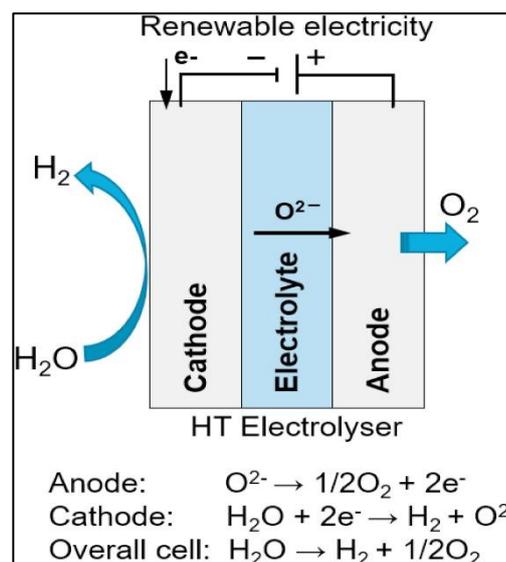


Figura 21. Celda de electrolisis por oxido solido

Fuente: (Udousoro & Dansoh, 2019)

1.1.14. Producción de hidrogeno mediante la electrolisis del agua

Los procesos químicos que tienen lugar en la electrólisis se consideran principalmente como el proceso de difusión. Se supone que las moléculas de hidrógeno tienden a difundirse desde la región de alta densidad a la región de baja densidad, a medida que el calor se difunde de temperaturas altas a bajas, (Figura 20). Se supone que las partículas emitidas en muchos procesos de difusión se caracterizan por colisiones aleatorias, irregulares y muy frecuentes en órbitas en zigzag (Romdhane, 2013).

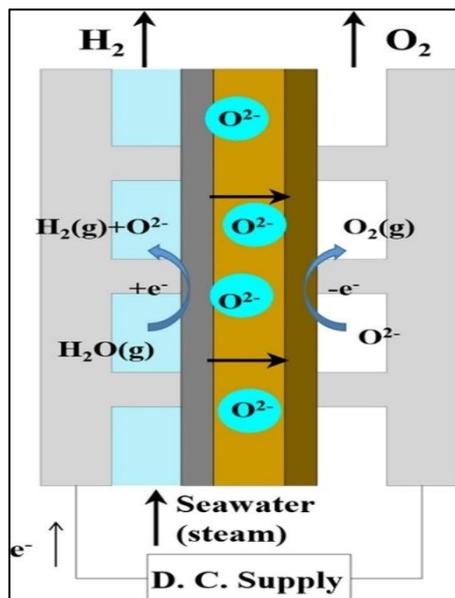


Figura 22. Módulo de prueba de la electrólisis del agua, generación de hidrógeno y oxígeno

Fuente: (Ursúa et al., 2020)

1.1.15. Elementos que intervienen en la electrólisis del agua

Los componentes esenciales que determinan el rendimiento de la celda de electrólisis comprenden los electrodos (ánodo y cátodo) y el separador. Estos, junto con la naturaleza del medio conductor iónico, desempeñan un papel crítico en el consumo energético asociado a la generación de hidrógeno. La configuración adoptada para los electrodos y su disposición respecto al separador o membrana son determinantes en la diversidad de tecnologías disponibles.

1.1.15.1. Los electrodos

Los electrodos son fundamentales al facilitar las reacciones redox en el proceso de electrólisis. Tanto el ánodo, responsable de la oxidación, como el cátodo, donde se lleva a cabo la reducción, son cruciales para la eficacia global de la celda. Simultáneamente, el separador o membrana contribuye a prevenir cortocircuitos y a mantener la selectividad de iones. La elección cuidadosa de estos elementos y su disposición estratégica son aspectos fundamentales para optimizar el desempeño y la eficiencia de las celdas de electrólisis en la producción de hidrógeno.

En este contexto, es crucial reconocer que la arquitectura y la interacción precisa entre los electrodos y el separador juegan un papel decisivo en el éxito operativo de la celda. La atención meticulosa a estos factores se traduce en una mejora significativa de la eficiencia y rendimiento en la producción de hidrógeno mediante electrólisis.

1.1.15.2. Selección del Material del Electrodo

El proceso de elección del material del electrodo para las reacciones anódicas y catódicas se guía por los siguientes criterios fundamentales:

- a) Actividad electrocatalítica intrínseca, siendo la capacidad de adsorción del material del electrodo determinante para la velocidad de la reacción, especialmente cuando esta se desarrolla sin limitaciones por transferencia de masa (control activado).
- b) Alta área real. Buscamos emplear electrodos altamente porosos con elevada área específica (o factor de rugosidad), ya que la velocidad extensiva de reacciones electródicas se correlaciona con el área electródica. Sin embargo, a medida que la porosidad aumenta, la eficiencia del área disminuye debido a problemas de distribución de corriente y potencial dentro del poro, como la inaccesibilidad de líneas de corriente al interior del poro.
- c) Estabilidad química y mecánica. Si bien el electrodo actúa pasivamente como fuente o sumidero de electrones, puede sufrir procesos de oxidación o deterioro, especialmente en el dominio anódico. Esta es la razón por la cual las celdas de electrólisis de agua evitan operar en medio ácido, a pesar de la mayor conductividad específica de los ácidos en comparación con los álcalis, lo que reduciría la contribución resistiva del electrolito.
- d) Baja resistividad. Es esencial evitar aumentos innecesarios de la diferencia de potencial de la celda debido a efectos óhmicos del electrodo, ya que esto conllevaría a un incremento en el consumo energético.
- e) Costo y disponibilidad. La preparación del electrodo no solo depende de la disponibilidad del material, sino también de una metodología o técnica de preparación que, en muchos casos, resulta ser compleja y costosa.

Los materiales electródicos utilizados en celdas comerciales de electrólisis de agua se presentan en detalle en la Tabla.

Tabla 2

Materiales electrolíticos de celdas comerciales

Catódico	Anódico
Ni, Ni-Co, Ni-Fe	Ti/RuO ₂ – TiO ₂
Ni/NIS _x	DSA [®] (TiO ₂ -RuO ₂)
Electrodepósitos: Ni-Mo, Ni-Mo-Cd	Ni, Ni-Co
Acero inoxidable	Noquel-Raney
Niquel-Raney: Ni-Zn, Ni-Al, Co-Zn, etc.	Perovskitas(AB _x C _(1-x) O ₃):CoLa _{0.5} Sr _{0.5} O ₃ ,LaCo _x Ni _(1-x) O ₃
Carbón/Platino disperso	Espinelas(AB ₂ O ₄): NiCo ₂ , Co ₂ O ₄

Fuente: (Dubois et al., 2020)

1.1.15.3. Separadores

Estos elementos facilitan la conducción iónica entre las secciones anódica y catódica, al mismo tiempo que impiden el contacto entre H₂ y O₂. Pueden agruparse en tres categorías principales: diafragmas, membranas poliméricas y membranas cerámicas.

Diafragma: Un material aislante con poros de diámetros que varían entre 1 y 50 mm, permitiendo el paso de aniones y cationes sin discriminación y siendo hidráulicamente permeable.

Membranas poliméricas: Elaboradas con polímeros orgánicos o inorgánicos, se caracterizan por posibilitar el transporte exclusivo de un tipo de ión. Por ejemplo, NAFION[®] facilita el transporte de protones, mientras que el ácido poliantimónico (PAM) facilita el transporte de K⁺. Estos iones, junto con sus esferas de solvatación, se desplazan entre sitios intercambiadores de iones mediante un campo eléctrico.

Membranas cerámicas: Funcionan como electrolitos sólidos que conducen iones O⁼ o H⁺ a temperaturas muy elevadas (> 700 °C).

Las características particulares de cada tipo de separador se detallan en la Tabla 3.

1.1.15.4. Aspectos Tecnológicos de la Electrólisis del Agua

Tabla 3

Separadores electrolíticos de celdas comerciales

Material	Espesor(mm)	Resistencia (Ω)*	Comentarios
Diafragmas			
Teflon poroso (TETRATEX [®])	0,20	0,20-0,40	Excelente T>100°C [6]
BaTiO ₃ o NiO Soportado s/tela de Ni	0,30	0,15-0,20	T<150°C [7]
ZIRFON [®]	0,30	≈0,20	T<120°C [8]
Titanato de K/ polibenzoimidazol		0,20-0,30	T<120°C [9]
Filtro de sulfuro de polifenileno (RYTON [®])		0,10-0,20	T<120°C[9]
Membranas poliméricas			
NAFION [®]	0,30	0,40-0,50	Buena a T<100°C[9,10] requiere hidratación
Acido poliantimónico (PAM)		0,20-0,30	T<120°C[11]
Membranas cerámicas			
ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	0,30	0,60	transporte de O ⁻ (900°C) [12]
Perovskitas (SrCe _{0,95} Yb _{0,05} O ₃)	0,20-0,30		transporte de H ⁺ estudios básicos [13,14]

Fuente: (Dubois et al., 2020)

1.1.15.5. Celdas de Electrólisis de Agua Bipolares

Un objetivo clave en el diseño de las celdas de electrólisis es la minimización del consumo energético por unidad de volumen de hidrógeno producido, reduciendo $\Delta\psi$ celda. Para alcanzar este propósito, según la ecuación (2) o la Tabla I, el aumento de la temperatura de operación conlleva una disminución del Erev y de los η_i , junto con un aumento en la eficiencia. Simultáneamente, se busca reducir todos los efectos óhmicos, y los avances en esta área han dado lugar a tres tecnologías claramente diferenciadas, explicadas a continuación.

Celdas avanzadas: Se caracterizan por la doble función del separador, actuando también como conductor iónico. En este enfoque, el material electrodo se aplica en ambos lados de la membrana, creando una unidad conocida como MEA (membrane electrode assembly). Se han desarrollado dos variantes: la primera utiliza diafragmas impregnados con electrolito, y la segunda, más reciente, emplea membranas poliméricas conductoras iónicas. Cuando el electrocatalizador se dispersa en ambos lados de la membrana, la corriente se suministra a través de colectores de corriente (conductores electrónicos porosos, generalmente titanio o carbón). La primera celda con membrana conductora de protones (NAFION 117) fue lanzada al mercado en 1987 bajo el nombre de MEMBREL CELL. Sin embargo, en condiciones operativas reales, el MEA experimentó problemas de deterioro. Por otro lado, las membranas poliméricas inorgánicas (PAM), también conocidas como "inorganic technology electrode membrane" (ITEM), parecen ofrecer un rendimiento superior. Ambos tipos se utilizan para la electrólisis de agua a presiones de 15 a 30 atm, reduciendo así la energía requerida para la compresión de los gases. El consumo energético en este tipo de celdas oscila entre 3.5 - 4.5 kWh/Nm³ de hidrógeno.

Celdas convencionales: Funcionan con KOH del 25-30% en peso a temperaturas inferiores a los 100°C. A excepción de las celdas desarrolladas por LURGI, todas operan a presión atmosférica, con un consumo energético de 4,5 - 5 kWh/Nm³ de hidrógeno. Se encuentran en el mercado celdas con

capacidad de hasta 600 Nm³/h, y la Figura 21 muestra la disposición básica de las celdas convencionales tipo filtro prensa.

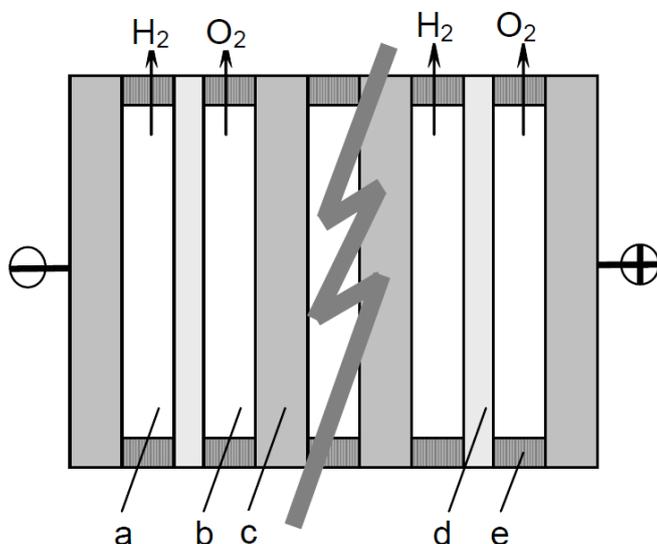


Figura 23. Celda bipolar del tipo convencional.

Fuente: (Brauns & Turek, 2020).

Electrolizadores de vapor de agua: Este tipo de electrolizador conserva la configuración de la Figura 6a, con la diferencia de que la temperatura de trabajo es elevada (>700°C). Esto demanda membranas cerámicas conductoras (aniónicas o catiónicas) y se alimenta con vapor de agua. Debido a la elevada temperatura, no se necesitan materiales de electrodo costosos. La Figura 21 muestra el esquema de dos celdas de este tipo. El desarrollo más avanzado fue la HOT ELLY CELL, realizada por DORNIER SYSTEMS y LURGI con un consumo de 2.9 a 3.2 kWh/Nm³. A pesar de ello, este tipo de celdas aún enfrenta problemas tecnológicos sin resolver adecuadamente.

1.1.16. Célula de electrolisis

Las principales características de los materiales que componen una celda de electrólisis alcalina (Figura 22). Para analizar la influencia de las condiciones marinas sobre un electrolizador alcalino, se han introducido en la cámara de niebla salina sus componentes: diafragma, electrodos de Ni (electrodo liso, malla y espuma) y juntas de estanqueidad. Para tener suficientes muestras, se han

introducido en la cámara ambiental los componentes necesarios para ensamblar tres celdas de electrólisis completas (Brauns & Turek, 2020).

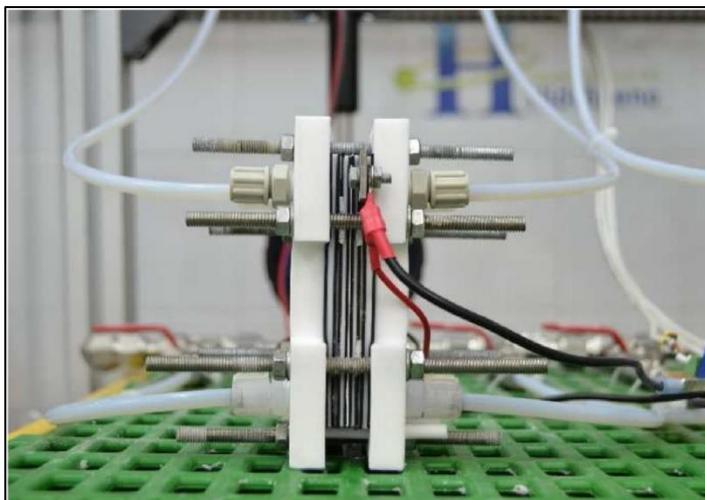


Figura 24. Célula de combustible de hidrógeno.

Fuente: (Brauns & Turek, 2020).

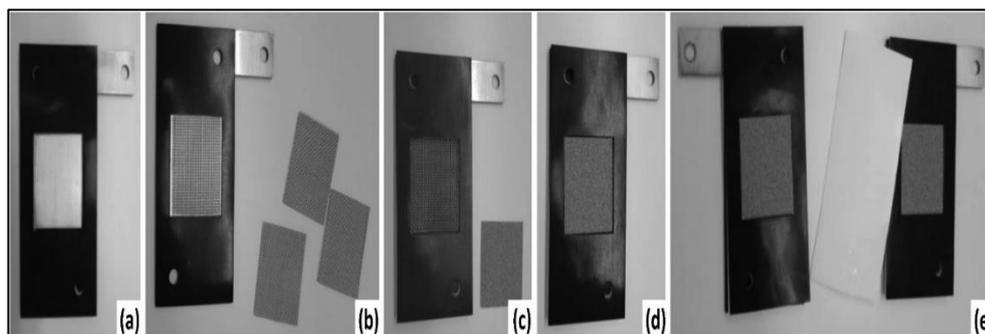


Figura 25. Placa de célula de combustible de hidrógeno.

Fuente: (Brauns & Turek, 2020).

1.1.17. Almacenamiento de hidrógeno

Uno de los problemas principales en la producción del hidrógeno como combustible, es su almacenamiento, actualmente se están estudiando muchos métodos de almacenamiento, siendo los tres principales sistemas de almacenamiento (Nikolaidis, 2022).

- Almacenamiento por materiales químicos (nano barras de óxido de cobre)
- Almacenamiento por materiales físicos, mostrado en la Figura 23 (estructura metálica de alta resistencia mecánica) (Nikolaidis, 2022).

- Almacenamiento por materiales electroquímicos (reacciones redox por electrodos) (Cao et al., 2023).

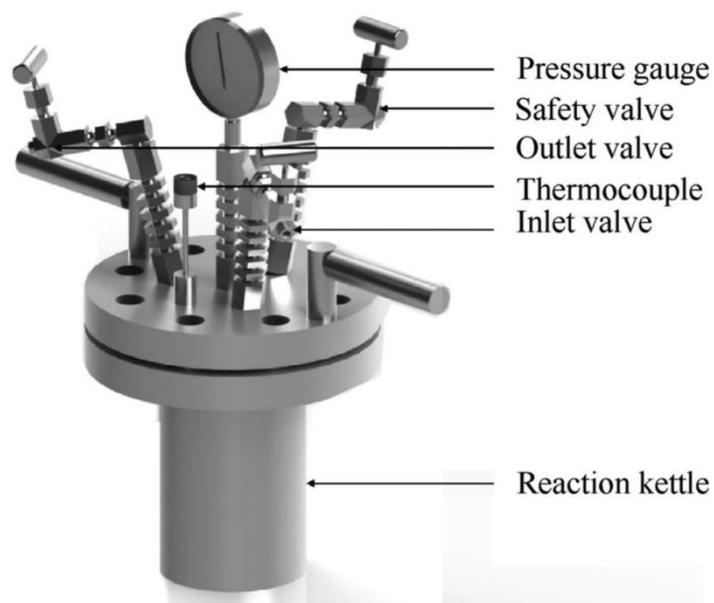


Figura 26. Almacenamiento de hidrogeno y sistema de medición de alta presión
Fuente: (Cao et al., 2023)

1.1.18. Rendimiento de la producción de hidrogeno

El hidrógeno debido a sus ventajas, a saber, alta energía específica, abundancia, verde, etc. ha demostrado ser el combustible para el futuro. Por lo tanto, la comunidad científica está intentando desarrollar vías robustas y tecno económicamente viables para su producción (Daugherty, 2019). Los métodos convencionales utilizados para la producción de hidrógeno son:

- Termoquímico
- Electroquímico
- Fotobiológico
- Fotoelectroquímico

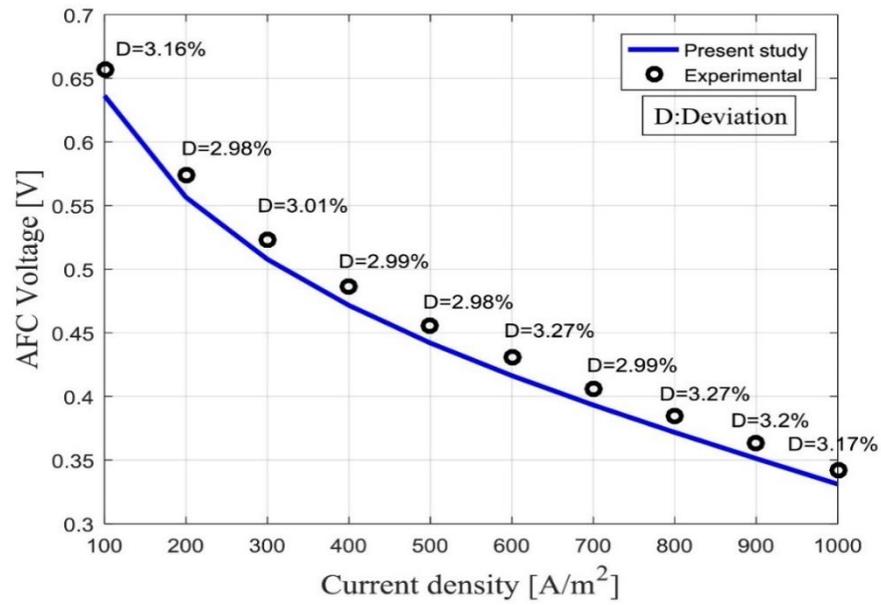


Figura 27. Producción de electricidad en función a la densidad de corriente y voltaje

Fuente: (Daugherty, 2019)

1.2. Antecedentes

Hoy en día la búsqueda de nuevos sistemas que produzcan energía sostenible es muy importante, por el crecimiento económico, el aumento de la calidad de vida, el acelerado crecimiento de la población y el elevado desarrollo tecnológico, los cuales consumen energía, que es abastecida principalmente por los combustibles fósiles (Gupta, 2008).

Sin embargo, una de las tecnologías emergentes a nivel mundial y con tendencia al futuro es la energía del hidrógeno. Por ser seguro, flexible, accesible y con múltiples procesos de producción como la electrolisis, más aún, esta energía puede desempeñar un papel importante en la matriz energética de un país, con tendencia al desarrollo y la investigación sostenible de esta energía con proyección hacia el futuro (Veziroglu & Barbir, 1991).

El hidrógeno tiene un grado genuino que se puede combinar y utilizar con diferentes sectores energéticos como la electricidad, la calefacción, el gas y el transporte. Actualmente, el procedimiento industrial más primordial y los métodos más simples para la producción de hidrógeno casi puro es la electrólisis del agua. Se espera que la importancia de la producción de hidrógeno aumente en el futuro y sea la fuente principal de energía (Midilli et al., 2005).

También se puede utilizar como alternativa a los combustibles a base de carbono bajo los auspicios de una alta eficiencia energética, respetuoso con el medio ambiente y libre de contaminación. El hidrógeno tiene una característica importante como portador de energía, adquiriendo una alta densidad energética de 140 MJ/kg, que es dos veces mayor que los combustibles sólidos regulares (Chi & Yu, 2018).

La tecnología de electrólisis sería fundamental en un futuro mercado energético, en el que el hidrógeno jugará un papel crucial. La electrólisis es un método más utilizado en aplicaciones industriales, especialmente en la producción de hidrógeno y oxígeno de alta pureza. Básicamente es un proceso de separación de componentes químicos (H_2 , O) disuelto en el electrolito (agua + KOH, NaOH) por una corriente eléctrica externa. Este es un método que se puede adaptar a las fuentes de energía renovables. En general, existen tres tipos de métodos de electrólisis según las condiciones de funcionamiento, los materiales utilizados y la estructura tecnológica: álcali, membrana polimérica y óxido sólido (Toklu et al., 2016).

La electrólisis del agua es el método más simple de producir hidrógeno, pero el hidrógeno generalmente se produce a partir de fuentes fósiles debido a la rentabilidad. Por lo tanto, cuando la electrólisis del agua se combina con recursos de energía renovable, se considera un método de solución a largo plazo, sostenible y respetuoso con el medio ambiente para la producción de energía. Los estudios sobre electrólisis del agua tienen como objetivo reducir los costes de producción y al mismo tiempo, aumentar la eficiencia de la producción de hidrógeno (Dobó & Palotás, 2017).

En el artículo “Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy A Review” Proporcionan un análisis de la electrólisis de agua alcalina alimentada por energía renovable, como la energía solar y eólica. No menciona específicamente la hidrólisis del agua para la generación de hidrógeno con energía fotovoltaica. Así mismo, los autores presentan una descripción de un sistema de última generación para la electrólisis de agua alcalina y las energías renovables, como los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas. (Brauns & Turek, 2020).

En el artículo titulado: “Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: A Review” analizan la producción de hidrógeno mediante varios métodos basados en la energía solar y eólica, pero no menciona específicamente la hidrólisis del agua para la generación de hidrógeno con energía fotovoltaica. Así mismo, se presenta una comparación de diferentes métodos para la producción de hidrógeno basados en sistemas fotovoltaicos (PV) y generadores eólicos (WG), y se ofrece una evaluación económica de la producción de hidrógeno verde (Benghanem et al., 2023).

En el artículo titulado: “Photovoltaic Hydrogen Production with Commercial Alkaline Electrolysers” se analiza el funcionamiento de un electrolizador de agua alimentado con un perfil eléctrico de un generador fotovoltaico (PV), donde los datos de irradiancia se convierten en el perfil de potencia eléctrica que el generador fotovoltaico habría suministrado en caso de haberse conectado al electrolizador mediante un convertidor CC/CC con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) (Ursúa et al., 2020)

En el artículo titulado: “Hydrogen Production through a Solar Powered Electrolysis System” se analiza la producción de hidrógeno mediante un sistema de electrólisis alimentado por energía solar, se modela una unidad de electrólisis alimentada con energía solar para proporcionar 58400 kg de hidrógeno para hacer funcionar la flota de autobuses

de pila de combustible en el garaje de intercambio de Lea en Londres cada año.(Udousoro & Dansoh, 2019)

En el artículo titulado: “Hydrogen Production System Using Alkaline Water Electrolysis Adapting to Fast Fluctuating Photovoltaic Power” se realiza el estudio sobre el uso de la electrólisis de agua alcalina (AWE) para producir hidrógeno utilizando energía fotovoltaica (PV). Propone un sistema de producción de hidrógeno que integre paneles fotovoltaicos, baterías y un sistema AWE con una estrategia de gestión de la energía. En este artículo, se propone un sistema de producción de hidrógeno que comprende una matriz fotovoltaica, una batería y un electrolizador alcalino, junto con una estrategia de control eléctrico y una estrategia de gestión de energía (Cao et al., 2023).

En el artículo titulado: “Pulsed-Supplied Water Electrolysis via Two-Switch Converter for PV Capacity Firming” se propone un sistema híbrido de energía fotovoltaica a hidrógeno, almacenamiento y pila de combustible para satisfacer la carga doméstica de un edificio residencial, identificando la alcalinidad como una tecnología de electrólisis obligatoria. El rendimiento de las celdas de electrólisis alcalina se evalúa considerando la inclusión de un convertidor buckboost de dos interruptores.(Nikolaidis, 2022)

En el artículo titulado: “Hydrogen Production by Water Electrolysis Via Photovoltaic Panel” se analiza el enfoque integrado de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis de aguas residuales alimentadas por fuentes renovables de electricidad, pero no menciona específicamente la hidrólisis del agua para la generación de hidrógeno con energía fotovoltaica así mismo se pudo identificar que la producción de hidrógeno a partir de la producción de energía fotovoltaica con diferentes sistemas de electrólisis que pueden tratar las aguas residuales y producir hidrógeno simultáneamente conducirá a una producción de hidrógeno sostenible y respetuosa con el medio ambiente, como comentan los autores.(Amori & Salman, 2016)

En el artículo titulado: “Hydrogen Production by Water Electrolysis Via Photovoltaic Panel” analiza la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua utilizando energía fotovoltaica, no por hidrólisis Así mismo, se desarrolla un programa informático MATLAB para resolver un modelo de cuatro parámetros y predecir las características de los módulos fotovoltaicos en las condiciones climáticas de Bagdad, la tasa máxima de producción de hidrógeno es de 153,3 ml/min, la eficiencia del sistema es del 20,88% y la

cantidad total de hidrógeno producida en un día es de 220,752 litros. (Amori & Salman, 2016)

En el artículo titulado: “Operation Strategy for Hydrogen Production by Water Electrolysis Powered by Solar Photovoltaic Energy” se realiza un estudio sobre la combinación de la electrólisis de agua alcalina con fuentes de energía renovables, como la energía solar fotovoltaica, para la producción de hidrógeno. Propone una estrategia de operación optimizada para minimizar el potencial requerido en la electrólisis. También se, se propone una estrategia de operación optimizada basada en el flujo de bombeo de acuerdo con la corriente suministrada a la celda de electrólisis para limitar los efectos y reducir el voltaje requerido en la electrólisis.(Amores et al., 2016)

En el artículo titulado: “On the Water Electrolysis with Photovoltaic Solar Energy for Hydrogen Production” se ha reallizaedo un estudio sobre el análisis del uso del sistema solar de electrólisis del agua (SWES) para la producción de hidrógeno, Así mismo , los autores investigaron los parámetros que determinan el rendimiento de la producción de hidrógeno mediante el uso del sistema solar, sin la necesidad de una gran cantidad de energía eléctrica adicional. (Benghnia et al., 2017)

En el artículo titulado: “Hydrogen Production by Water Electrolysis Effects of the Electrodes Materials Nature on the Solar Water Electrolysis Performances” se analiza la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua utilizando energía solar fotovoltaica. Compara el rendimiento de diferentes materiales de electrodos y su impacto en el flujo de hidrógeno, la eficiencia de conversión y el consumo de energía. Asi mismo los autores lgraron probar la electrólisis del agua mediante energía solar fotovoltaica, y mostraron una clara diferencia desde el punto de vista del flujo de hidrógeno producido, la eficiencia de conversión, el consumo específico de energía y la vida útil de los electrodos. (Romdhane, 2013)

En el artículo titulado: “Production of Hydrogen by Electrolysis of Water: Effects of the Electrolyte Type on the Electrolysis Performances” se ha realizado un estudio sobre la optimización de la producción de hidrógeno por electrólisis utilizando energía solar fotovoltaica. los autores optimizan la elección entre las aguas residuales y, para ello, mediante electrólisis en laboratorio o bajo el sol de acuerdo con los criterios de flujo de hidrógeno producido, eficiencia de electrólisis y consumo de energía eléctrica. (Slama, 2013)

En el artículo titulado: “Performance of hydrogen production process using solar energy” se hizo un tratado sobre la eficiencia de la electrólisis del agua alcalina en la producción de hidrógeno utilizando energía solar. Los autores exploran la eficiencia de la electrólisis del agua alcalina para producir hidrógeno cuando funciona con energía solar y descubren que cuanto mayor es la eficiencia del electrolizador, mayor es la eficiencia general del sistema en casi todas las condiciones (Sakr et al., 2018).

En el artículo titulado: “Electrolytic production of hydrogen utilizing photovoltaic cells” se realiza un estudio sobre la electrólisis del agua para generar hidrógeno utilizando un electrolizador basado en la tecnología de membrana polímero-electrolito para separar el agua en hidrógeno y oxígeno, y el oxígeno se expulsa a la atmósfera y el hidrógeno se almacena en un pequeño recipiente a presión. (Daugherty, 2019)

En el artículo titulado: “A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems” se realiza un análisis sobre la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua con fuentes de energía renovables como la solar y la eólica. Los autores proporcionan una revisión tecnológica de los sistemas de producción de hidrógeno a partir de energía solar y eólica que utilizan varios tipos de electrolizadores de agua, y una evaluación económica de la producción de hidrógeno verde comparando los costos de las fuentes renovables discutidas con otros métodos de producción (Nasser et al., 2022).

En el artículo titulado: “Possibility of Producing Hydrogen from Water by Electrolysis as a Renewable Source of Energy” se hizo un desarrollo y evaluación simplificada de la electrólisis del agua para investigar la posibilidad de producir gas hidrógeno a partir del agua mediante electrólisis como fuente de energía renovable, y los resultados indicaron que los requisitos de energía para la producción de hidrógeno aumentan al disminuir la distancia entre los electrodos y al aumentar el tiempo de operación, que osciló entre 1,977 y 36,997 L h⁻¹ para todos los tratamientos (Hany et al., 2020).

Sin embargo, en la región de Puno se tiene muy pocos estudios de generación de hidrógeno con distintos métodos y técnicas aplicados con energías renovables, por ello se ve en la necesidad de realizar este tipo de estudios o investigaciones para aplicarlos en sistemas como los motores de combustión interna, reemplazando el combustible fósil por combustible renovable, también para la generación de electricidad por medio de una reacción química del hidrógeno con el oxígeno. Mientras tanto, el crecimiento de la



población y el incremento de las necesidades humanas, conllevan al aumento de la demanda energética y la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean sostenibles y amigables para el medio ambiente.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

La contaminación medio ambiental y el calentamiento global acelerado por la emisión de gases de efecto invernadero se relacionan con el calentamiento global, reduciendo la sostenibilidad del planeta. Sin embargo, en los últimos años y el rápido crecimiento de la población, está generando la búsqueda de otras fuentes de energía sostenible o renovable que emitan cero gases de efecto invernadero y gases contaminantes al medio ambiente. Estas fuentes pueden ser alternativas de solución a la creciente demanda energética mundial, nacional y de la región de Puno, disminuyendo la necesidad de utilizar fuentes de energía provenientes de los hidrocarburos (Diesel, gasolina, gas natural y otros) en centrales de generación térmica.

Por ello, este proyecto de investigación propone la producción de hidrogeno como fuente de energía sostenible, que puede ser aplicado en motores de combustión interna y producción de electricidad, que no emite gases contaminantes al medio ambiente, utilizando como fuente primaria al recurso solar en sistemas fotovoltaicos para generar la electrolisis del agua, separando el hidrogeno y oxigeno del agua. Mientras tanto, la energía del hidrogeno es considerado como un vector energético sostenible para el desarrollo de un país con visión energética hacia el futuro.

2.2. Enunciados del problema

2.2.1. Problema general

- a) ¿Cómo la electrolisis del agua genera hidrogeno mediante un sistema fotovoltaico en el altiplano de Puno?

2.2.2. Problemas especificos

- a) ¿Cómo se determinará la energía solar fotovoltaica para la generación de hidrogeno?

- b) ¿Se podrá diseñar un sistema de conversión por electrolisis del agua para generar hidrogeno?
- c) ¿Cuánto será la generación de hidrogeno mediante el proceso de conversión por electrolisis?

2.3. Justificación

El estudio de este tipo de energía es muy importante, porque puede reemplazar el uso constante de los hidrocarburos, no emite gases de efecto invernadero y contaminantes, existen muchas técnicas de producción de hidrogeno que son sostenibles para el medio ambiente, es parte de las energías renovables, su desarrollo tecnológico cada día es mayor y con mucho interés en la comunidad científica, entre otros.

La energía de hidrogeno es una alternativa de solución frente al uso de las energías convencionales (combustible fósil), con perspectiva hacia el futuro, altamente eficiente y sostenible para el medio ambiente. Sin embargo, la aplicación de esta energía tendría mayor énfasis en el sector del reemplazo de los hidrocarburos con cero emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes, además, en la producción de electricidad, compitiendo con otras energías renovables.

2.4. Objetivos de la investigación

2.4.1. Objetivo general

- a) Evaluar la generación de hidrogeno de la celda de combustible a partir de un sistema fotovoltaico.

2.4.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la energía solar fotovoltaica para la generación de hidrogeno.
- b) Diseñar una celda de combustible de electrolisis para generar hidrogeno.
- c) Evaluar la generación de hidrogeno a partir de la energía fotovoltaica.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

- a) La generación de hidrogeno está en función a la configuración de placas de acero inoxidable de la celda de hidrogeno y la energía fotovoltaica.



2.5.2. Hipótesis específicas

- a) El recurso solar en la ciudad de Puno es alto, pudiéndose utilizar en la generación de hidrogeno mediante la electrolisis.
- b) El diseño de la celda para generar hidrogeno, está en función a la configuración de las placas electrolíticas de acero inoxidable y el electrolizador.
- c) La evaluación de la generación de hidrogeno depende de la celda de hidrogeno y la energía fotovoltaica.

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El proyecto de investigación está ubicado en la ciudad de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno; ubicado en las coordenadas geográficas: latitud sur $-15^{\circ} 50' 15''$, longitud oeste $-70^{\circ} 01' 18''$ a 3810 m de altitud, el mes con temperatura más alta es noviembre (16.8°C).

Para este proyecto de investigación se consideró la irradiación solar en la ciudad de Puno, mediante un estudio experimental.



Figura 28. Ubicación geográfica del lugar de estudio

Fuente: Google Maps

3.2. Población

La población son el sistema fotovoltaico y las células de combustible de hidrogeno mediante la electrolisis del agua, determinado la irradiación solar para el suministro de energía eléctrica y la producción de hidrogeno en la célula de combustible en la ciudad de Puno.

3.3. Muestra

La muestra de esta investigación son las pruebas experimentales de las células de combustible de hidrogeno para la producción de hidrogeno y suministro de energía eléctrica del sistema fotovoltaico autónomo instalado con una inclinación de 15.5° orientado al norte en la ciudad de Puno.

3.4. Métodos de investigación

En este proyecto se tienen los siguientes métodos de investigación:

3.4.1. Sistema solar fotovoltaico

Para el desarrollo de este estudio, se implementó un sistema fotovoltaico con un panel solar monocristalino de 250 W a 12 V DC, un regulador de carga de 15 A, una batería de 120 Ah para alimentar las celdas de combustible y producir la electrolisis del agua, (Figura 26). Además, se midió la irradiación solar con un medidor solar, durante el periodo de experimentación, durante el mes de junio a agosto del 2022.

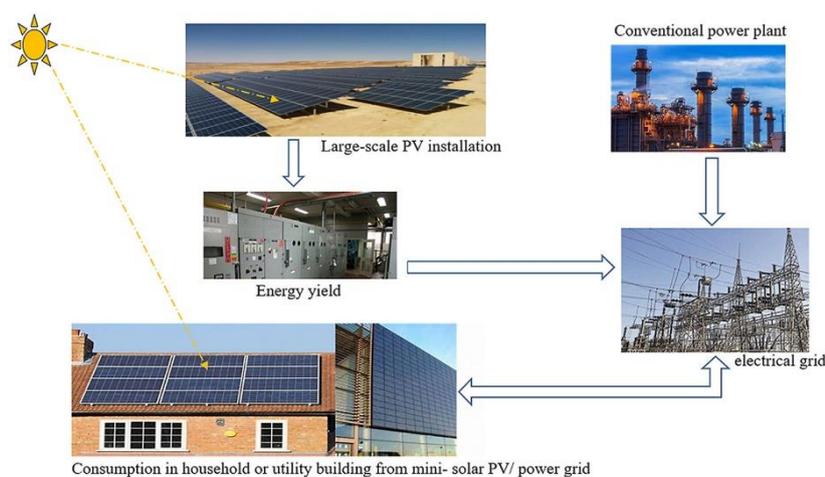


Figura 29. Sistema fotovoltaico instalado

Fuente: (Udousoro & Dansoh, 2019)

La irradiación solar en la ciudad de Puno es muy variable, debido a estación seca y lluviosa durante todo el año, sin embargo, durante el periodo de experimentación, la mayor cantidad de días fueron soleados, casi en su totalidad, fue por esa razón, que la producción de hidrogeno no tuvo mucha irregularidad por la variación energética del sistema fotovoltaico, (Figura 28).

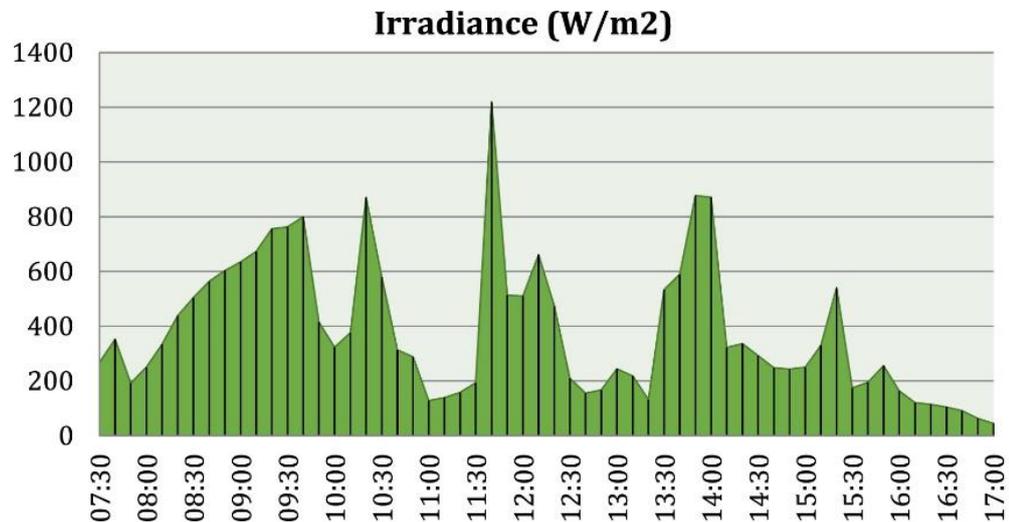


Figura 30. Perfil de irradiación solar similar a la ciudad de Puno

Fuente: (Nasser et al., 2022)

3.4.2. Generador de hidrogeno por medio de la electrolisis del agua

Para producir hidrogeno se diseñó una celda de combustible de electrolisis del agua. Se implemento un prototipo de celda de combustible, utilizando el acero inoxidable en forma de láminas plegadas una sobre otra con ajuste mecánico, además de un sistema de aislamiento entre placa a placa. La cámara de la celda de combustible está compuesta de agua y el electrolizador (soda caustica), encargados de la reacción química para separar del agua el oxígeno e hidrogeno, para finalmente almacenarlo en un recipiente de gas de hidrogeno. En la Figura 29 se muestra la célula de combustible.

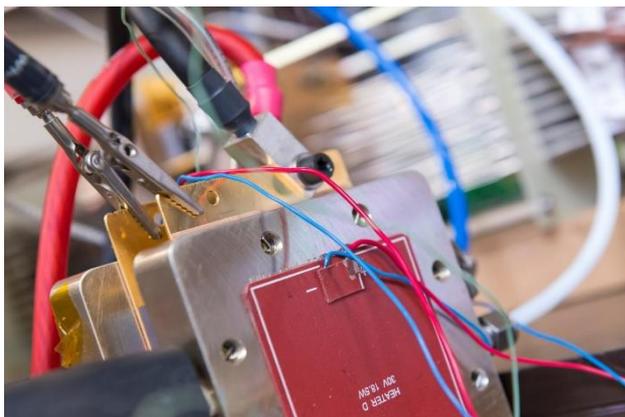


Figura 31. Célula de combustible de hidrogeno

Fuente: (Slama, 2013)

3.4.3. Producción de hidrogeno por electrolisis del agua

Evaluar la generación de hidrogeno a partir de la energía fotovoltaica. En este objetivo la electrolisis del agua fue producido por electrodos de acero inoxidable (anodo y cátodo) para separar el hidrogeno y oxigeno del agua, configurado por varias celdas electrolíticas y diseñadas para la generación de hidrogeno, además, se utilizó como electrolito al hidróxido de sodio, como medio en proceso de la electrolisis del agua, (Figura 30). Además, la medición del gas estuvo a cargo de un controlador para adquirir los datos del sensor y presión de acumulación en el tanque de almacenamiento.

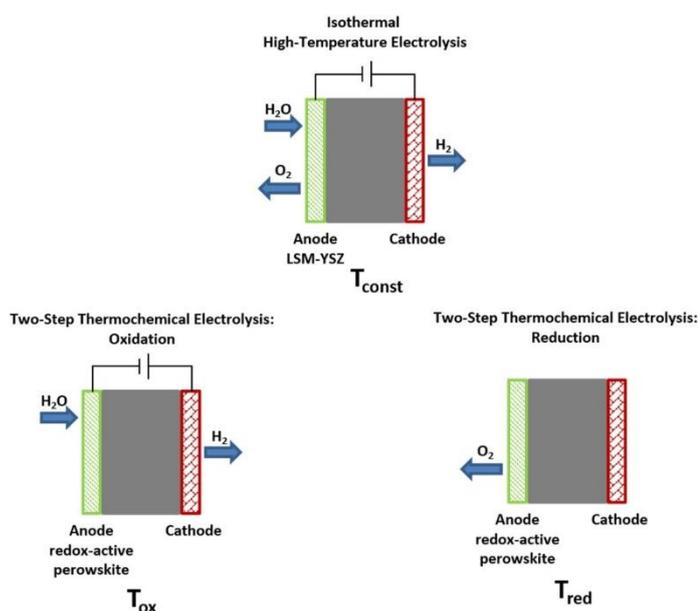


Figura 32. Equipo electrolizador del agua

Fuente: (Hany et al., 2020)

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

Las variables que se midieron en el periodo de experimentación son:

- a) Variable independiente: Energía del sistema fotovoltaico para producir la electrolisis (kWh).
- b) Variable dependiente: Producción de hidrogeno (PSI y %).

Finalmente, los datos fueron medidos por instrumentación digital, procesados en el software RStudio mediante un análisis de varianza para encontrar la significancia en la producción de hidrogeno sostenible y amigable para el medio ambiente.

3.5.1. Análisis y prueba estadística

Este proyecto de investigación fue desarrollado de forma experimental. Primeramente, para medir la irradiación solar se procesaron los datos por medias y representadas en una figura durante el día, se diseñaron e implementaron celdas de combustible de hidrogeno para evaluar las diferencias en la generación de hidrogeno, mediante un análisis de varianza. Los datos se procesaron en la hoja de cálculo de Excel y en un software estadístico de licencia libre RStudio.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Irradiación solar en la ciudad de Puno

La irradiación solar en la ciudad de Puno, durante el periodo de experimentación fue de manera regular, debido a estación seca y la mayor cantidad de días soleados, es por esa razón, que la energía producida en promedio en horas sol pico (HSP) por mes fue de 7.24 kWh/m²/d, con una irradiación solar máxima de 1089.76 W/m², mientras tanto el módulo fotovoltaico de 250 W, produjo energía de manera constante, desde las 9:00 h hasta las 15:00 h. Por lo tanto, la energía producida por el sistema fotovoltaico fue adecuado por la cantidad de días soleados durante el periodo de experimentación y casi la no presencia de días parcialmente nublados y lluviosos. En la Figura 31 se muestra la curva de irradiación solar promedia mensual.

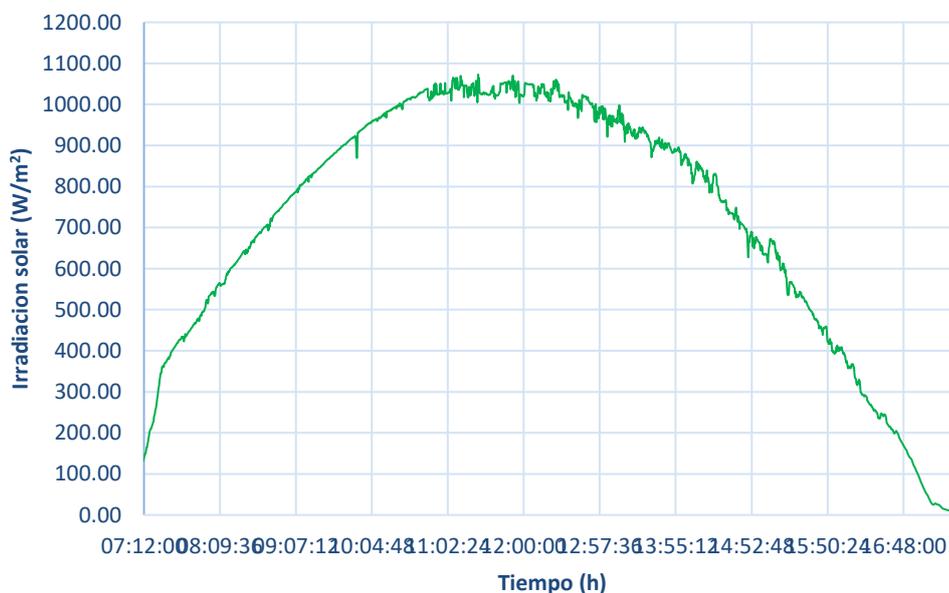


Figura 33. Irradiación solar mensual durante el periodo de experimentación, 2022

4.2. Célula de combustible de hidrogeno

La célula de combustible de hidrogeno, presento un consumo energético de 30 A para un voltaje de 6 V, durante la producción de hidrogeno, debido a esto, el sistema fotovoltaico desde las 06:00 h hasta la 09:00 h aproximadamente, el suministro energético no es suficiente, sin embargo, a partir de las 09:00 h hasta las 15:00 h, la fuente de energía fotovoltaica abastece a la célula de combustible para la producción de hidrogeno, haciendo este sistema más confiable y sostenible.

En tal sentido, la producción de hidrogeno por medio de la célula de combustible, tiene un funcionamiento optimo desde las 09:00 h hasta las 15:00 h con el sistema fotovoltaico en días soleados sin presencia de nubosidad parcial o lluvias leves o fuertes, fuera de ese rango de tiempo no hay producción de hidrogeno por el consumo energético elevado de la célula de combustible. En la Figura 32 se muestra el comportamiento de la energía solar fotovoltaica con la célula de combustible de hidrogeno.

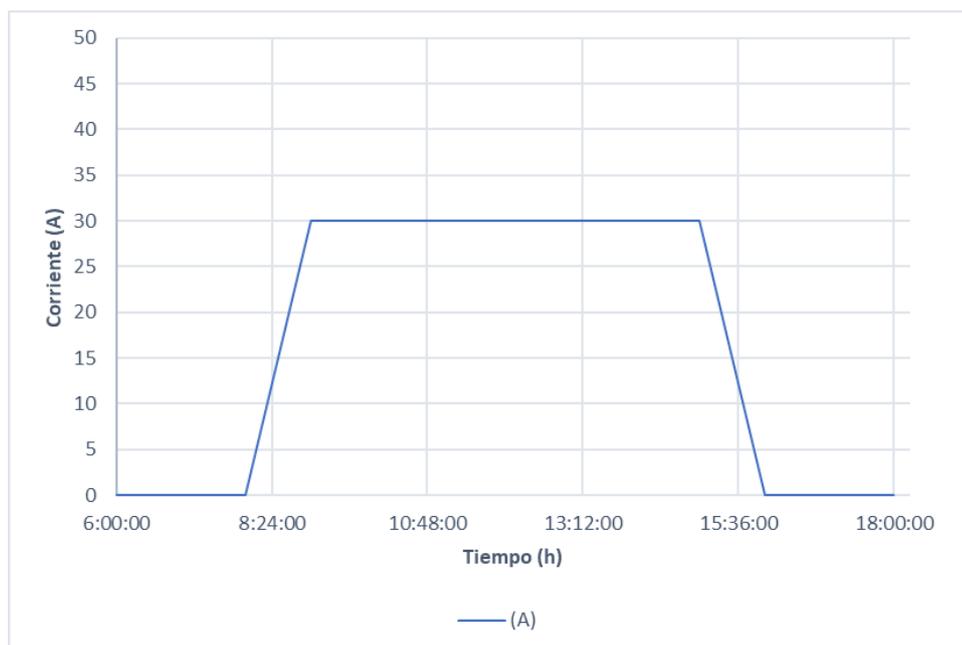


Figura 34. Comportamiento energético de la célula de combustible de hidrogeno

4.3. Producción de hidrogeno

El hidrogeno producido por la célula de combustible se muestra en la Figura 33, fue en aproximadamente 10.69 PSI por día, esto debido al consumo energético elevado de la célula de combustible de hidrogeno y el volumen del tanque de almacenamiento de 0.0754 m³, sin embargo, la energía producida por el sistema solar fotovoltaico, fue indispensable durante el rango de tiempo 09:00 h hasta las 15:00 h, además en el décimo día la producción de hidrogeno alcanzo hasta los 100 PSI aproximadamente, después de ese día se descargó la presión de hidrogeno hasta 30 PSI, para evaluar si la producción de hidrogeno es constante durante los siguientes días. Por lo tanto, la producción de hidrogeno se mantuvo constante durante el periodo de experimentación, debido principalmente a comportamiento de la irradiación solar con mayor cantidad de días soleados, sin embargo, si la irradiación solar no hubiese sido constante en esos días, la producción de hidrogeno tendría pendiente negativa, por esa razón, este sistema es sostenible para el medio ambiente, porque no se utiliza el suministro de energía eléctrica de la red convencional, más bien, de un sistema solar fotovoltaico autónomo.

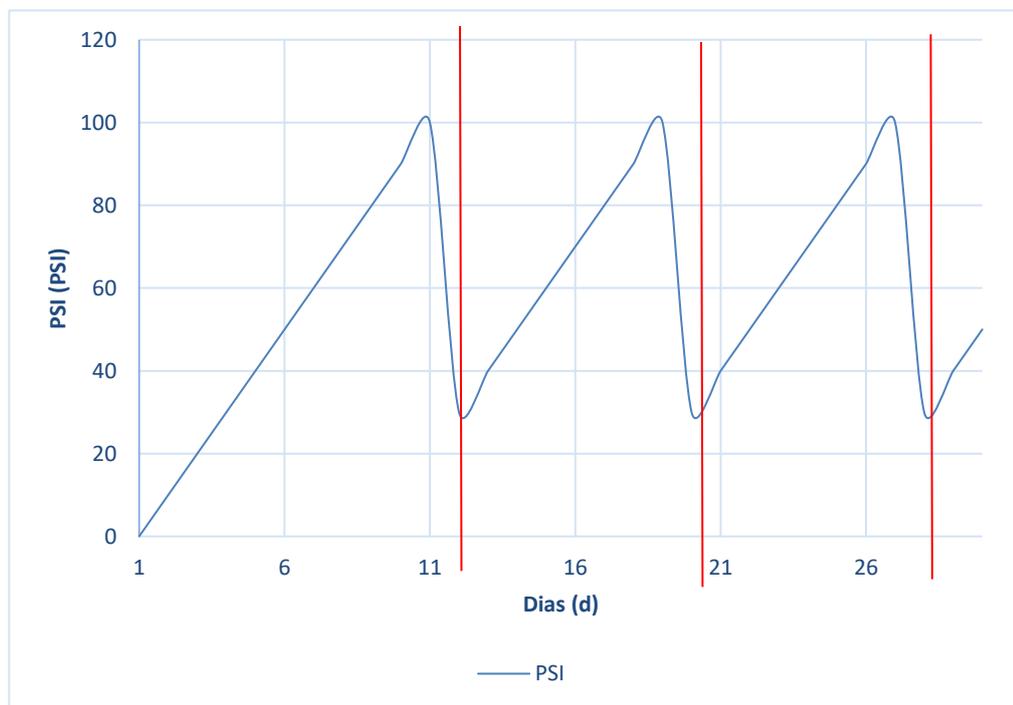


Figura 35. Producción de hidrogeno y consumo energético del gas de hidrogeno

4.4. Análisis de la variancia (ANOVA) en la producción de hidrogeno

Para evaluar la producción de hidrogeno, se construyeron tres células de combustibles, cada una de ellas con cinco repeticiones, para determinar el análisis de variancia (ANOVA) en la producción de hidrogeno. En la Tabla 4 se muestra la producción de hidrogeno por día, según los ensayos realizados durante el periodo de experimentación.

Tabla 4

Producción de hidrogeno por día, con tres células de combustible

Célula de Combustible	Presión Acumulada en (PSI)				
	1	2	3	4	5
Celda A	10.00	10.20	10.40	10.80	9.90
Celda B	9.80	10.10	9.90	11.78	10.70
Celda C	11.20	11.00	11.70	12.00	10.90

Realizando el Anova a las células de combustible en la producción de hidrogeno, se tiene los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 2.

Tabla 5

Anova en la producción de hidrogeno

Df	Sum	Sq	Mean Sq	F-value	Pr (>F)
FO(A,B,C)	2	3.443	1.7214	5.059	0.0255
Residuals	12	4.083	0.3402	--	--
Total	14	7.526	--	--	--

De la experimentación realizada en la producción de hidrogeno con las tres células de combustible, se logra determinar con el Anova que los resultados con relevantes con 2.55 % de significancia en la producción de hidrogeno, siendo menor al 5 % según muchos autores. En tal sentido, el Anova realizado en las células de combustibles es significativo, sobre todo en la célula A y C, mostrado en la Tabla 5 con la prueba estadística de Tukey (2.86 % de significancia). De esta forma, se demuestra que en la evaluación de la producción de hidrogeno por medio de la electrolisis es significativo, para su uso, siendo sostenible al medio ambiente. Finalmente, en la Figura 34 se muestra la comparación grafica de medias en la producción de hidrogeno y las diferencias significativas determinada por la Tabla 5 Anova.

Tabla 6

Prueba estadística Tukey

Células de Combustible	Dif.	Valor Bajo	Valor Alto	Pr (>F)
Celda B - A	0.196	-0.7881	1.1801	0.8576
Celda C - A	1.100	0.1158	2.0841	0.0286
Celda C - B	0.904	-0.0801	1.8881	0.0730

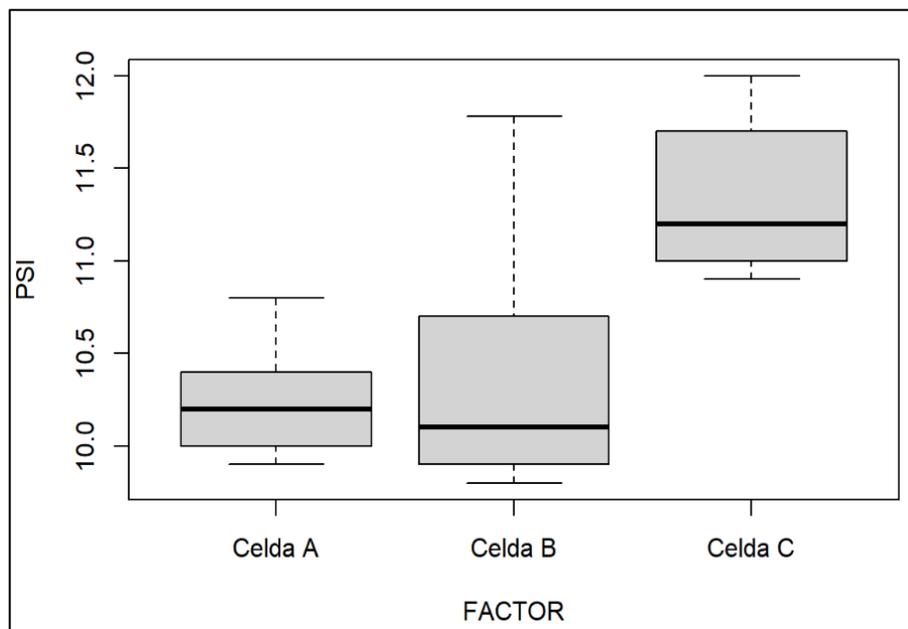


Figura 36. Análisis comparativo de medias (PSI) en la producción de hidrogeno

4.5. Análisis de costo y beneficio en la producción de hidrogeno

La energía consumida promedio mensual 32.40 kWh, extraída del sistema solar fotovoltaico, sin embargo, si comparamos con el suministro convencional de la red pública a una tarifa de S/ 1.00 nuevo sol por cada kWh, el consumo de la energía eléctrica seria S/ 25.92 nuevos soles por mes, considerando solo energía. De esta manera, la producción de hidrogeno es sostenible para el medio ambiente, porque utiliza un sistema solar fotovoltaico como fuente de energía eléctrica para el proceso de la electrolisis del agua. En la Figura 35 se muestra la comparación de costo y beneficio del sistema de producción de hidrogeno.

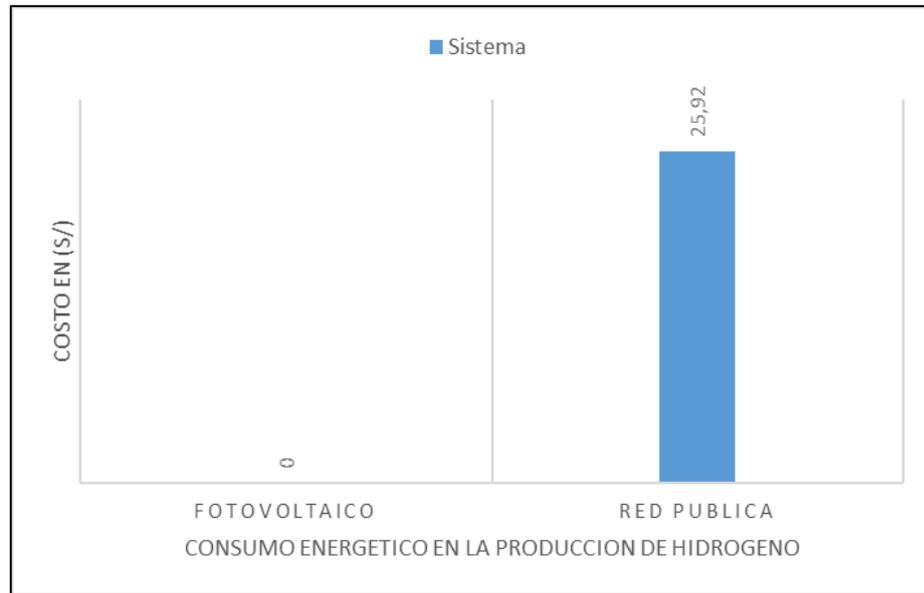


Figura 37. Costo beneficio en la producción de hidrogeno

4.6. Análisis de resultados estadísticos Anova y su interpretación (Minitab)

Tabla 7

Analisis de Varianza (Anova)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2.00	3.442720	1.721360	5.059451	0.025498
Error	12.00	4.082720	0.340227		
Total	14.00	7.525440			

Se Rechaza la Hipótesis Nula, por lo existe diferencias en al menos un par de tipo de generación de hidrogeno.

Grafica de Tunkey

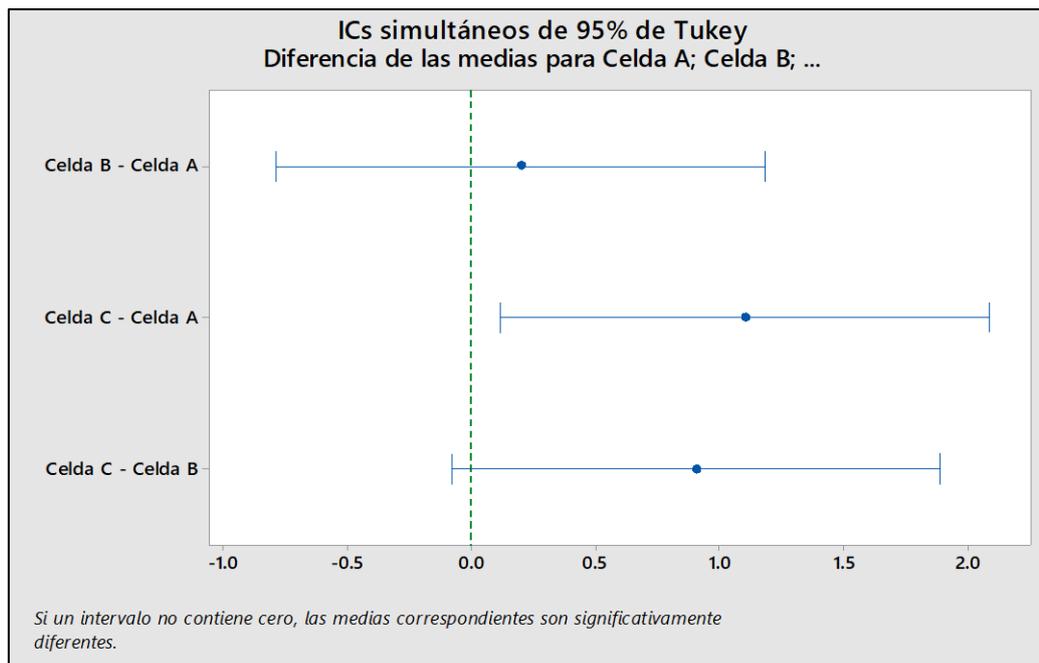


Figura 38. Resultado de la gráfica de Tukey

Que existen diferencias entre los tipos de producción de hidrogeno Celda C y Celda A

Grafica de intervalos

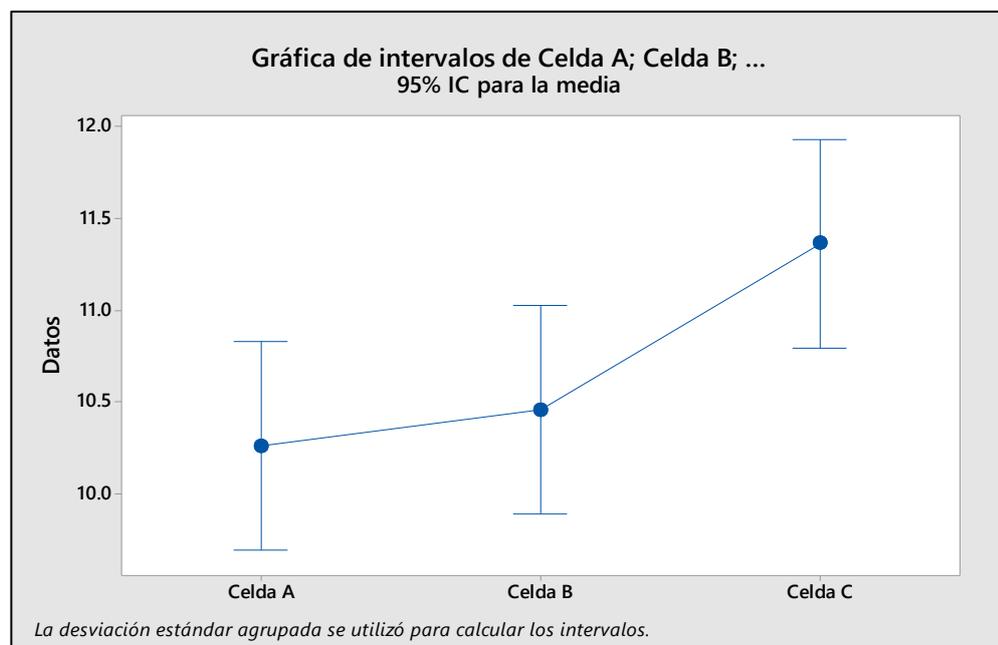


Figura 39. Resultado de la gráfica de Intervalos

Según la gráfica la celda de mayor producción es la celda C, y la celda A tiene menor producción.

Gráfica de Normalidad

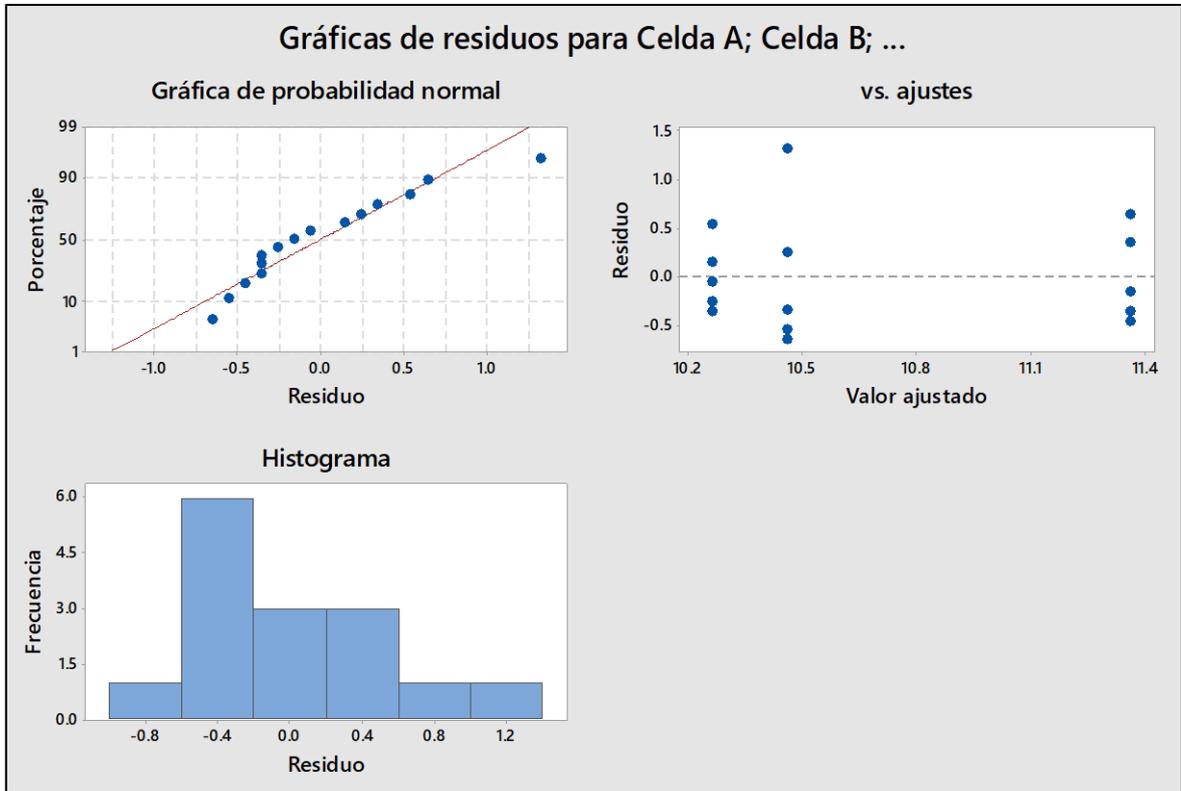


Figura 40. Resultado de la gráfica de normalidad

Hay un valor, en las mediciones del tipo de celda B, que sale de la medida de otras celdas, por lo que se puede sospechar que hubo un pequeño error en la medición de este valor,

Gráfica de la comparación de las tres celdas.

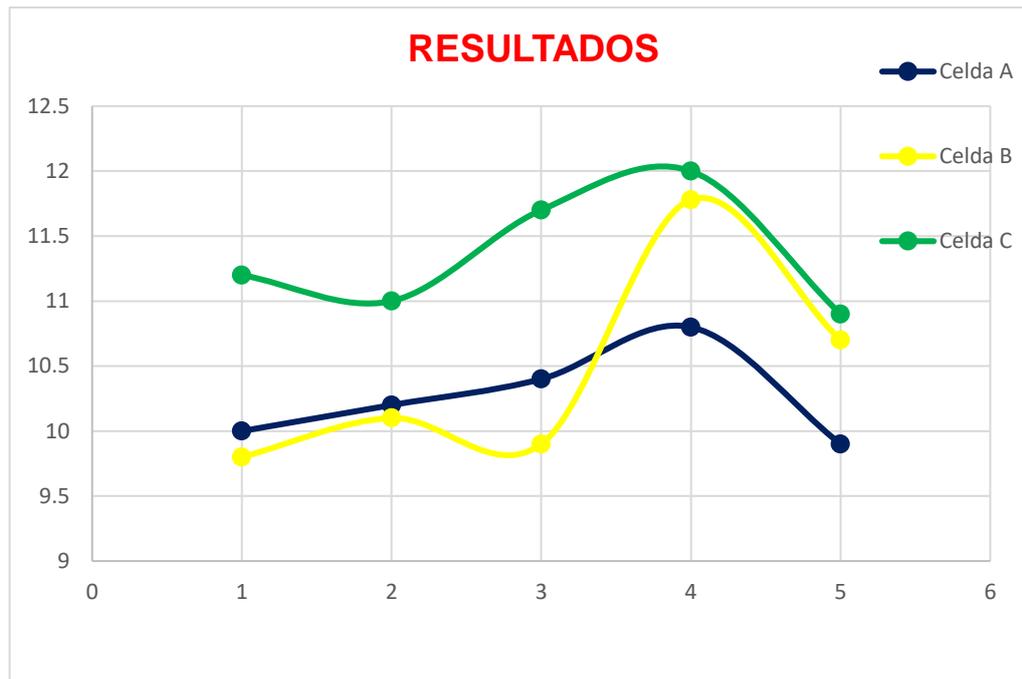


Figura 41. Resultado de la gráfica del comportamiento de cada Celda

CONCLUSIONES

El comportamiento de la irradiación solar en la ciudad de Puno, durante el periodo de experimentación fue de manera regular, debido a estación seca y la mayor cantidad de días soleados, es por esa razón, que la energía producida en promedio en horas sol pico (HSP) por mes fue de 7.24 kWh/m²/d, con una irradiación solar máxima de 1089.76 W/m².

Se diseño la célula de combustible de hidrogeno, con láminas de acero inoxidable en configuración de 6 placas unidas en serie y aisladas con material de goma y plástico resistente al calor, porque, debido a reacción química que produce la electrolisis en su funcionamiento, genera calor que debe soportar los materiales aislantes.

La producción de gas de hidrogeno fue aproximadamente de 10.69 PSI/d, debido posiblemente al volumen del tanque de almacenamiento y el diseño constructivo de la célula de combustible de hidrogeno. Por lo tanto, la producción de hidrogeno utilizando el suministro energético del sistema solar fotovoltaico, permitió producir hidrogeno desde las 09:00 h hasta las 15:00 h, después de ese periodo no es posible producir hidrogeno con la energía solar fotovoltaica. Mas aun, el ahorro energético considerando la tarifa eléctrica es importante, porque, mitiga el consumo energético de la red pública que tiene costo y se abastece del sistema solar fotovoltaico.



RECOMENDACIONES

Se sugiere seguir investigando en la maximización de la producción con sistemas solares fotovoltaicos autónomos y conectados a red.

Además, con la producción de hidrogeno por la célula de combustible, se podría mejorar el diseño de este componente, para optimizar la generación de hidrogeno.

Finalmente, para el suministro de energía eléctrica, se podría utilizar otras energías renovables, como la energía eólica, combinado ambas energías (solar y eólica) para la producción de hidrogeno durante las 24 h del día.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Ezzi, A., & Ansari, M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. In *Applied System Innovation* (Vol. 5, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Alfaoyzan, F. A., & Almasri, R. A. (2023). Utilizing solar photovoltaic systems in educational facilities to achieve a zero bill campus: The Sulaiman Al-Rajhi University case. *Energy Exploration and Exploitation*, 41(4), 1415–1438. <https://doi.org/10.1177/01445987231174767>
- Amores, E., Rodríguez, J., & Oviedo, J. (2016). Operation strategy for hydrogen production by water electrolysis powered by solar photovoltaic energy. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(14), 844–849. <https://doi.org/10.24084/repqj14.485>
- Amori, M., & Salman, H. (2016). Hydrogen Production by Water Electrolysis Via Photovoltaic Panel. *Journal of Engineering*, 22, 72.
- Andjela, S. (2021). Application of photovoltaic technology in the use of solar energy. *Annals of Environmental Science and Toxicology*, 094–098. <https://doi.org/10.17352/aest.000044>
- Angulo, J., Calsi, B., Alfaro, E., Conde, L., Muñoz, E., Grieseler, R., Guerra, J., Palomino, J., Espinoza, R., & De la Casa, J. (2020). Estudio del efecto del polvo y estimación de la potencia nominal en un string fotovoltaico. *Tecnia*, 30(1), 27–33. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.832>
- Barbosa, C., De Nadae, J., Do Nascimento, D., Alves Firmino, P., & Morioka, S. (2023). Photovoltaic solar energy and sustainability in higher education institutions: a multiple case study. *Revista Gestão Da Produção Operações e Sistemas*, 18, e02939. <https://doi.org/10.15675/gepros.v18i00.2939>
- Benghanem, M., Mellit, A., Almohamadi, H., Haddad, S., Chettibi, N., Alanazi, A. M., Dasalla, D., & Alzahrani, A. (2023). Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: A Review. In *Energies* (Vol. 16, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16020757>
- Benghnia, A., Nabil, B., Slama, R. Ben, & Chaouachi, B. (2017). On the Water

- Electrolysis with Photovoltaic Solar Energy for Hydrogen Production. *World Journal of Applied Chemistry*, 2(2), 34–47. <https://doi.org/10.11648/j.wjac.20170202.11>
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. In *Processes* (Vol. 8, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
- Cabezón, L., Ruiz, L., Criado, D., Gago, E., & Pegalajar, M. (2022). Photovoltaic Energy Production Forecasting through Machine Learning Methods: A Scottish Solar Farm Case Study. *Energies*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/en15228732>
- Calsi, S., Angulo, A., Conde, M., Muñoz, C., Grieseler, R., Guerra, T., De la Casa, H., & Palomino, T. (2020). Procedimiento del cálculo de la potencia nominal de un generador fotovoltaico. *TECNIA*, 30(1). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.834>
- Cao, X., Wang, J., Zhao, P., Xia, H., Li, Y., Sun, L., & He, W. (2023). Hydrogen Production System Using Alkaline Water Electrolysis Adapting to Fast Fluctuating Photovoltaic Power. *Energies*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/en16083308>
- Cardoso, D. S., Locatelli, P. S., Ramalho, W., & Asgary, N. (2021). Distributed generation of photovoltaic solar energy: impacts of ANEEL's new regulation proposal on investment attractiveness. *Revista de Administração Da UFES*, 14(2), 423–442. <https://doi.org/10.5902/1983465961993>
- Costejon, A., & Santamaria, G. (2010). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas* (2nd ed.). EDITEX.
- Daugherty, M. (2019). Electrolytic Production Of Hydrogen Utilizing Photovoltaic Cells. *Los Alamos National Laboratory*, 12.
- Dubois, R. A., Perazzo, R. P. J., & Triaca, W. E. (2020). *Hidrógeno y la energía del futuro*. www.ancefn.org.ar
- Espinoza, R. E., Muñoz-Cerón, E., Ramos, E. R., de la Casa, J., & Es, -Delacasa@ujaen. (2015). *Caracterización en Potencia Y Energía de dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados A La Red de Diferentes Tecnologías (Silicio Cristalino-Lámina Delgada) Operando En Lima*.

- Essam, Y., Ahmed, A. N., Ramli, R., Chau, K. W., Idris, I., Sherif, M., Sefelnasr, A., & El-Shafie, A. (2022). Investigating photovoltaic solar power output forecasting using machine learning algorithms. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 2002–2034. <https://doi.org/10.1080/19942060.2022.2126528>
- Forbes, M., & Lord, S. (2023). A Place-Based Sustainability Approach to Learning about Photovoltaic Solar Energy. *Trends in Higher Education*, 2(2), 306–319. <https://doi.org/10.3390/higheredu2020017>
- Gómez, J., Carlesso, F., Vieira, L., & Da Silva, L. (2018). A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(3). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0342>
- Hany, M., Bahnasawy, A., Haza', E., & Eng, A. (2020). Possibility of Producing Hydrogen from Water by Electrolysis as a Renewable Source of Energy. In *Annals of Agric. Sci* (Vol. 58, Issue 2). <https://assjm.journals.ekb.eg>
- Hashim, S., & Hassan, R. (2022). Impact of high temperature on PV productivity in hot desert climates. *Green Technology, Resilience, and Sustainability*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44173-022-00009-9>
- Kedir, N., Nguyen, P. H. D., Pérez, C., Ponce, P., & Fayek, A. R. (2023). Systematic Literature Review on Fuzzy Hybrid Methods in Photovoltaic Solar Energy: Opportunities, Challenges, and Guidance for Implementation. In *Energies* (Vol. 16, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16093795>
- Kenny, R. (2023). A Snapshot of Photovoltaics in 2022. In *Solar RRL* (Vol. 7, Issue 8). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/solr.202300180>
- Lamigueiro, O. P. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. creative commons. <https://github.com/oscarperpinan/esf>
- Nasser, M., Megahed, T., Ookawara, S., & Hassan, H. (2022). A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 29, Issue 58, pp. 86994–87018). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>

- Nikolaidis, P. (2022). Pulsed-Supplied Water Electrolysis via Two-Switch Converter for PV Capacity Firming. *Electricity*, 3(1), 131–144. <https://doi.org/10.3390/electricity3010008>
- Romdhane, S. (2013). Hydrogen Production by Water Electrolysis Effects of the Electrodes Materials Nature on the Solar Water Electrolysis Performances. *Natural Resources*, 04(01), 1–7. <https://doi.org/10.4236/nr.2013.41001>
- Sakr, I., Abdelsalam, A., & El-Askary, W. (2018). *Performance Of Hydrogen Production Process Using Solar Energy*.
- Schultz, H., & Carvalho, M. (2022). Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System. *Energies*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/en15166098>
- Senthilkumar, S., V., M., R., D., M., N. S., Kumar, T. S., Thanikanti, S. B., & N., P. (2023). A REVIEW ON MPPT ALGORITHMS FOR SOLAR PV SYSTEMS. *International Journal of Research -GRANTHAALAYAH*, 11(3). <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v11.i3.2023.5086>
- Slama, R. (2013). Production of Hydrogen by Electrolysis of Water: Effects of the Electrolyte Type on the Electrolysis Performances. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 02(02), 54–58. <https://doi.org/10.4236/cweee.2013.22006>
- Udousoro, D., & Dansoh, C. (2019). Hydrogen Production through a Solar Powered Electrolysis System. *Journal of Engineering Research and Reports*, 1–14. <https://doi.org/10.9734/jerr/2019/v8i417002>
- Ursúa, A., López, E., Gubia, L., & Marroyo, P. (2020). *Photovoltaic Hydrogen Production with Commercial Alkaline Electrolysers*. Forschungszentrum Jülich.
- Zilles, R., Wilson, N., Barros Galhardo, M. A., & Henrique Ferreira de Oliveira, S. (2021). *Sistemas fotovoltaicos conectados a Redes electrica* (2nd ed.).

ANEXOS

Anexo 1. Medidor solar (Amprobe Solar 100)

Características de operación y especificaciones técnicas:

Mide la energía solar y la transmisión hasta 2000 W/m², 634BTU / (ft²xh)

Modo de potencia: medición de la potencia por unidad de área de la radiación solar incidente.

Modo de transmisión: calcula el porcentaje de transmisión de energía solar del material, por ejemplo, cuánta energía solar en % se transmitirá a través de la ventana.

Pantalla conveniente para leer con tecnología de sensor remoto.

Unidades de medida seleccionables, ya sea W/m² o BTU.

Retención de datos.

Funciones máx/min para identificar ubicaciones con potencia máxima o mínima.

Mide la energía solar para optimizar la colocación de paneles solares o calentadores de agua solares, prueba la transmisión de luz de ventanas y faros, y comprueba la eficiencia térmica de las ventanas.

El modo de lectura máxima o mínima muestra la lectura más alta o más baja en una sesión para rastrear un aumento repentino o disminución en lecturas.

La función de retención mantiene una lectura en la pantalla.

La pantalla de cristal líquido (LCD) proporciona lecturas de un vistazo.



Solarímetro (AMPROBE SOLAR 100).

Anexo 2. Modulo fotovoltaico de 250W, 12VDC

Características de operación y especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico de 1250 W:

Máxima potencia: 250 W

Máximo voltaje: 18 V

Máxima corriente: 20.83 A

Voltaje en circuito abierto: 21.5 V

Corriente de corto circuito: 22.67A

Máximo voltaje del sistema: 1000 V

Capacidad del fusible máximo: 15 A

Temperatura de operación: -20°C a 90°C

Clase de aplicación: Clase A

CEM: AM1.5 a 25°C

Anexo 3. Sensor de presión

Características:

Alimentación:	24 VDC
Numero de hilos:	3
Presión mínima:	0
Presión máxima:	150 PI
Temperatura de operación:	-20°C a 90°C
Tipo de aplicación:	Industrial y otros



Sensor de presión industrial de 0 a 150-PSI

Anexo 4. Galería de fotografías

	
<p>Tanque de almacenamiento de gas de hidrogeno</p>	<p>Tapa del tanque de almacenamiento.</p>
	
<p>Prototipo de Electrolisis para la produccion de Hidrogeno.</p>	<p>Prototipo de Electrolisis para la produccion de Hidrogeno.</p>

Anexo 5. Datos de irradiación solar

N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar
1	05:30	7.69	101	07:09	437.74	201	08:47	554.49
2	05:31	8.81	102	07:10	418.69	202	08:48	535.86
3	05:32	9.29	103	07:11	419.04	203	08:49	536.78
4	05:33	9.77	104	07:12	388.89	204	08:50	554.9
5	05:34	10.55	105	07:13	424.77	205	08:51	591.45
6	05:35	11.61	106	07:14	417.1	206	08:52	552.78
7	05:36	13	107	07:15	431.63	207	08:53	556.43
8	05:37	14.17	108	07:16	396.01	208	08:54	561.05
9	05:38	15.23	109	07:17	434.18	209	08:55	565.7
10	05:39	16.74	110	07:18	424.51	210	08:56	769.87
11	05:40	19.19	111	07:19	440.62	211	08:57	570.09
12	05:41	22.9	112	07:20	444.89	212	08:58	549.1
13	05:42	27.41	113	07:21	445.99	213	08:59	522.78
14	05:43	31.01	114	07:22	451.78	214	09:00	550.17
15	05:44	34.25	115	07:23	440.13	215	09:01	551.81
16	05:45	37.93	116	07:24	475.93	216	09:02	545.99
17	05:46	41.72	117	07:25	481.34	217	09:03	543.6
18	05:47	45.08	118	07:25	514.29	218	09:04	546.09
19	05:48	50.95	119	07:26	518.65	219	09:05	551.74
20	05:49	63.37	120	07:27	520.49	220	09:06	543.8
21	05:50	71.08	121	07:28	522.88	221	09:07	542.93
22	05:51	93.46	122	07:29	397.09	222	09:08	546.07
23	05:52	100.46	123	07:30	372.27	223	09:09	551.62
24	05:53	104.35	124	07:31	405.64	224	09:10	551.76
25	05:54	96.15	125	07:32	573.32	225	09:11	543.68
26	05:55	99.1	126	07:33	375.8	226	09:12	520.71
27	05:56	107.94	127	07:34	405.26	227	09:13	524.58
28	05:57	109.7	128	07:35	393.39	228	09:14	543.63
29	05:58	106.61	129	07:36	393.39	229	09:15	572.93
30	05:59	77.81	130	07:37	395.19	230	09:16	583.49
31	06:00	81.71	131	07:38	417.85	231	09:17	585.25
32	06:01	86.04	132	07:39	402.35	232	09:18	587.72
33	06:02	95.84	133	07:40	402.19	233	09:19	592.03
34	06:03	100.99	134	07:41	403.46	234	09:20	601.43
35	06:04	136.71	135	07:42	456.48	235	09:21	611.11
36	06:05	92.81	136	07:43	714.79	236	09:22	684.34
37	06:06	93.25	137	07:44	611.39	237	09:23	684.73
38	06:07	94.04	138	07:45	715.86	238	09:23	613.32
39	06:08	98.56	139	07:46	478.23	239	09:24	599.33
40	06:09	104.92	140	07:47	703.99	240	09:25	898.29
41	06:10	171.22	141	07:48	688.57	241	09:26	893.83
42	06:11	134.43	142	07:49	540.11	242	09:27	960.37
43	06:12	157.95	143	07:50	479.72	243	09:28	943.54
44	06:13	186.44	144	07:51	666.42	244	09:29	985.8
45	06:14	169.6	145	07:52	613.33	245	09:30	1008.9
46	06:15	190.86	146	07:53	520.1	246	09:31	1023.44
47	06:16	195.36	147	07:54	635.29	247	09:32	642.59
48	06:17	197.85	148	07:55	673.03	248	09:33	638.64
49	06:18	142.16	149	07:56	669.13	249	09:34	636.48
50	06:19	203.66	150	07:57	610.37	250	09:35	629.27

N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar
51	06:20	150.92	151	07:58	479.88	251	09:36	626.41
52	06:21	204.72	152	07:59	506.91	252	09:37	641.08
53	06:22	217.56	153	08:00	473.02	253	09:38	628.99
54	06:23	229.3	154	08:01	540.29	254	09:39	631.26
55	06:24	233.86	155	08:02	534.58	255	09:40	630.92
56	06:25	225.48	156	08:03	625.21	256	09:41	796
57	06:26	238.93	157	08:04	491.71	257	09:42	636.11
58	06:26	244.95	158	08:05	499.31	258	09:43	668.67
59	06:27	250.3	159	08:06	617.93	259	09:44	672.62
60	06:28	258.01	160	08:07	539.96	260	09:45	1032.1
61	06:29	262.57	161	08:08	807.97	261	09:46	679.76
62	06:30	243.81	162	08:09	565.36	262	09:47	696.46
63	06:31	221.49	163	08:10	605.37	263	09:48	975.96
64	06:32	247.29	164	08:11	518.42	264	09:49	755.85
65	06:33	235.95	165	08:12	510.79	265	09:50	880.26
66	06:34	288.61	166	08:13	534.29	266	09:51	907.01
67	06:35	286.88	167	08:14	550.27	267	09:52	772.37
68	06:36	294.06	168	08:15	554.98	268	09:53	654.17
69	06:37	299.41	169	08:16	525.27	269	09:54	636.74
70	06:38	314.35	170	08:17	531.66	270	09:55	663.4
71	06:39	258.65	171	08:18	538.18	271	09:56	1081.17
72	06:40	203.03	172	08:19	527.73	272	09:57	683.41
73	06:41	206.81	173	08:20	529.63	273	09:58	628.68
74	06:42	213.94	174	08:21	519.75	274	09:59	655.23
75	06:43	223.76	175	08:22	510.82	275	10:00	842.9
76	06:44	217.83	176	08:23	504.15	276	10:01	1098.35
77	06:45	219.21	177	08:24	495.08	277	10:02	955.81
78	06:46	227.25	178	08:24	501.96	278	10:03	1076.28
79	06:47	239.2	179	08:25	502.45	279	10:04	1114.07
80	06:48	237.45	180	08:26	498.97	280	10:05	865.02
81	06:49	244.63	181	08:27	488.88	281	10:06	1072.57
82	06:50	352.44	182	08:28	490.1	282	10:07	1087.04
83	06:51	374.59	183	08:29	506.53	283	10:08	1088.68
84	06:52	375.74	184	08:30	505.38	284	10:09	1102.9
85	06:53	381.69	185	08:31	507.93	285	10:10	1112.11
86	06:54	385.87	186	08:32	510.81	286	10:11	1107.34
87	06:55	386.04	187	08:33	509.76	287	10:12	1111.71
88	06:56	386.95	188	08:34	518.78	288	10:13	1106.01
89	06:57	399.84	189	08:35	512.24	289	10:14	1108.24
90	06:58	291.4	190	08:36	501.99	290	10:15	1111.71
91	06:59	401.03	191	08:37	482.58	291	10:16	1115.68
92	07:00	284.44	192	08:38	473.7	292	10:17	1117.47
93	07:01	390.9	193	08:39	488.62	293	10:18	1113.44
94	07:02	413.39	194	08:40	497.85	294	10:19	1117.39
95	07:03	406.8	195	08:41	524.02	295	10:20	1115.65
96	07:04	370.12	196	08:42	532.71	296	10:21	1115.61
97	07:05	327.68	197	08:43	519	297	10:22	1135.1
98	07:06	348.85	198	08:44	512.97	298	10:22	1128.26
99	07:07	409.69	199	08:45	535.65	299	10:23	1134.31
100	07:08	397.1	200	08:46	523.91	300	10:24	699.82

N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar
301	10:25	1136.17	401	12:04	1111.11	501	13:42	681.52
302	10:26	1035.99	402	12:05	1105.78	502	13:43	664.79
303	10:27	1143.05	403	12:06	1083.88	503	13:44	750.24
304	10:28	895.78	404	12:07	1027.37	504	13:45	761.01
305	10:29	1139.2	405	12:08	934.57	505	13:46	674.51
306	10:30	1134.77	406	12:09	924.82	506	13:47	729.13
307	10:31	978.82	407	12:10	1003.78	507	13:48	724.27
308	10:32	703.43	408	12:11	989.8	508	13:49	660.24
309	10:33	688.24	409	12:12	1041.45	509	13:50	589.29
310	10:34	664.65	410	12:13	919.82	510	13:51	597.85
311	10:35	656.65	411	12:14	1014.84	511	13:52	636.65
312	10:36	679.37	412	12:15	1011.37	512	13:53	675.73
313	10:37	1137.59	413	12:16	1054.79	513	13:54	678.67
314	10:38	646.35	414	12:17	1034	514	13:55	584.9
315	10:39	653.06	415	12:18	975.29	515	13:56	627.74
316	10:40	620.17	416	12:19	1023.43	516	13:57	704.33
317	10:41	851.69	417	12:20	1085.97	517	13:58	648.2
318	10:42	1114.55	418	12:20	1046.96	518	13:59	670.83
319	10:43	1109.4	419	12:21	1037.95	519	14:00	790.11
320	10:44	621.14	420	12:22	1054.47	520	14:01	772.37
321	10:45	982.52	421	12:23	1092.73	521	14:02	761.36
322	10:46	1117.08	422	12:24	1060.93	522	14:03	761.26
323	10:47	1123.99	423	12:25	1044.13	523	14:04	744.54
324	10:48	1118.37	424	12:26	1076.51	524	14:05	726.31
325	10:49	958.58	425	12:27	1050.54	525	14:06	657.83
326	10:50	1020.53	426	12:28	1010.81	526	14:07	692.22
327	10:51	942.93	427	12:29	998.3	527	14:08	744.71
328	10:52	1024.96	428	12:30	948.82	528	14:09	727.01
329	10:53	1023.25	429	12:31	741.12	529	14:10	719.56
330	10:54	913.12	430	12:32	722.39	530	14:11	716.1
331	10:55	707.22	431	12:33	708.28	531	14:12	718.94
332	10:56	703.87	432	12:34	694.52	532	14:13	709.97
333	10:57	980.4	433	12:35	974.78	533	14:14	705.49
334	10:58	658.79	434	12:36	766.74	534	14:15	700.55
335	10:59	678.91	435	12:37	659.14	535	14:16	691.16
336	11:00	629.98	436	12:38	673.39	536	14:17	688.13
337	11:01	690.77	437	12:39	729.74	537	14:18	671.84
338	11:02	631.47	438	12:40	973.6	538	14:18	657.9
339	11:03	633.09	439	12:41	838.1	539	14:19	607.91
340	11:04	651.23	440	12:42	923.2	540	14:20	612.1
341	11:05	717.49	441	12:43	996.47	541	14:21	689.11
342	11:06	664.03	442	12:44	1001.86	542	14:22	612.6
343	11:07	654.1	443	12:45	891.75	543	14:23	495.92
344	11:08	861.13	444	12:46	816.63	544	14:24	535.54
345	11:09	708.13	445	12:47	1052	545	14:25	503.94
346	11:10	947.57	446	12:48	1041.24	546	14:26	405.8
347	11:11	945.64	447	12:49	1001.02	547	14:27	511.53
348	11:12	959.3	448	12:50	931.43	548	14:28	626.38
349	11:13	992.7	449	12:51	947.63	549	14:29	520.93
350	11:14	1006.04	450	12:52	990.66	550	14:30	543.48

N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar
351	11:15	1085.9	451	12:53	808.75	551	14:31	480.75
352	11:16	1080.39	452	12:54	866.71	552	14:32	580.84
353	11:17	1087.3	453	12:55	702.54	553	14:33	567.38
354	11:18	1047.12	454	12:56	784.35	554	14:34	586.05
355	11:19	1102.38	455	12:57	840.25	555	14:35	599.84
356	11:20	1061.33	456	12:58	954.86	556	14:36	510.51
357	11:21	1077.76	457	12:59	802.62	557	14:37	446.39
358	11:21	1072.07	458	13:00	732.8	558	14:38	452.18
359	11:22	1076.15	459	13:01	951.12	559	14:39	508.9
360	11:23	1093.85	460	13:02	906.32	560	14:40	494.99
361	11:24	1079.91	461	13:03	672.23	561	14:41	473.84
362	11:25	1077.97	462	13:04	659.82	562	14:42	429.51
363	11:26	919.7	463	13:05	655.66	563	14:43	514.96
364	11:27	869.76	464	13:06	692.18	564	14:44	491.42
365	11:28	804.52	465	13:07	696.4	565	14:45	495.1
366	11:29	874.14	466	13:08	638.29	566	14:46	416.11
367	11:30	962.7	467	13:09	651.3	567	14:47	533.05
368	11:31	930.96	468	13:10	666.17	568	14:48	506.95
369	11:32	842.88	469	13:11	733.09	569	14:49	508.82
370	11:33	825	470	13:12	724.84	570	14:50	472.91
371	11:34	1047.15	471	13:13	699.07	571	14:51	459.93
372	11:35	1116.27	472	13:14	766.57	572	14:52	483.93
373	11:36	1107.04	473	13:15	724.6	573	14:53	513.51
374	11:37	1090.4	474	13:16	875.13	574	14:54	491.13
375	11:38	1123.22	475	13:17	669.56	575	14:55	506.16
376	11:39	1141.34	476	13:18	730.2	576	14:56	509.4
377	11:40	1113.4	477	13:19	707.97	577	14:57	409.7
378	11:41	1103.46	478	13:19	924.73	578	14:58	454.87
379	11:42	1102.39	479	13:20	913.65	579	14:59	440.34
380	11:43	1095.82	480	13:21	923.3	580	15:00	503.1
381	11:44	1030.22	481	13:22	866.02	581	15:01	514.9
382	11:45	1007.36	482	13:23	788.27	582	15:02	515.89
383	11:46	1106.93	483	13:24	753.22	583	15:03	498.67
384	11:47	1055.59	484	13:25	724.85	584	15:04	457.13
385	11:48	1054.19	485	13:26	643	585	15:05	373.77
386	11:49	1006.19	486	13:27	589.06	586	15:06	369.54
387	11:50	984.85	487	13:28	569.27	587	15:07	361.43
388	11:51	950.69	488	13:29	603.71	588	15:08	340.6
389	11:52	901.92	489	13:30	687.06	589	15:09	345.73
390	11:53	985.13	490	13:31	576.17	590	15:10	409
391	11:54	993.39	491	13:32	548.34	591	15:11	507.72
392	11:55	987.64	492	13:33	559.2	592	15:12	460.09
393	11:56	964.87	493	13:34	675.97	593	15:13	467.51
394	11:57	980.81	494	13:35	696.61	594	15:14	417.9
395	11:58	1099.55	495	13:36	750.84	595	15:15	424.27
396	11:59	1031.31	496	13:37	848.31	596	15:16	469.88
397	12:00	953.38	497	13:38	756.58	597	15:17	466.95
398	12:01	884.01	498	13:39	690.27	598	15:17	446.58
399	12:02	1129.44	499	13:40	730.69	599	15:18	423.55
400	12:03	1125.89	500	13:41	789.03	600	15:19	419.27

N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar	N°	Tiempo (promedio durante el día)	Irradiación Solar
601	15:20	358.33	646	16:05	242.58	690	16:48	31.3
602	15:21	310.59	647	16:06	235.6	691	16:49	28.89
603	15:22	298.62	648	16:07	226.48	692	16:50	27.44
604	15:23	318.18	649	16:08	218.13	693	16:51	25.91
605	15:24	375.18	650	16:09	207.47	694	16:52	24.56
606	15:25	382.56	651	16:10	197.82	695	16:53	23.76
607	15:26	393.61	652	16:11	172.63	696	16:54	22.93
608	15:27	348.34	653	16:12	180.78	697	16:55	22.07
609	15:28	345.07	654	16:13	154.3	698	16:56	19.92
610	15:29	338.14	655	16:14	153.32	699	16:57	20.64
611	15:30	358.97	656	16:15	169.43	700	16:58	15.351
612	15:31	374.31	657	16:16	175.82	701	16:59	13.59
613	15:32	349.68	658	16:16	135.27	702	17:00	14.34
614	15:33	374.88	659	16:17	161.45	703	17:01	17.89
615	15:34	373.28	660	16:18	154.99	704	17:02	16.95
616	15:35	376.93	661	16:19	150.37	705	17:03	15.78
617	15:36	381.1	662	16:20	147.6	706	17:04	14.86
618	15:37	380.68	663	16:21	141.42	707	17:05	13.76
619	15:38	339.2	664	16:22	132.03	708	17:06	12.65
620	15:39	293.17	665	16:23	132.06	709	17:07	11.89
621	15:40	237.35	666	16:24	126.69	710	17:08	11.09
622	15:41	251.97	667	16:25	119.59	711	17:09	10.55
623	15:42	238.48	668	16:26	113.12	712	17:10	9.72
624	15:43	310.56	669	16:27	108.22	713	17:11	9.19
625	15:44	236.98	670	16:28	103.7	714	17:12	8.61
626	15:45	240.32	671	16:29	98.62	715	17:13	8.27
627	15:46	234.11	672	16:30	94.52	716	17:14	7.85
628	15:47	249.98	673	16:31	81.06	717	17:15	7.37
629	15:48	296.34	674	16:32	76.32	718	17:15	6.99
630	15:49	292.73	675	16:33	74.43	719	17:16	6.56
631	15:50	271.53	676	16:34	74.39	720	17:17	6.12
632	15:51	251	677	16:35	68.54	721	17:18	5.67
633	15:52	314.42	678	16:36	67.53	722	17:19	5.24
634	15:53	299.72	679	16:37	60.16	723	17:20	4.84
635	15:54	295.46	680	16:38	58.27	724	17:21	4.43
636	15:55	277.41	681	16:39	56.8	725	17:22	4.11
637	15:56	263.1	682	16:40	55.69	726	17:23	3.79
638	15:57	245.25	683	16:41	53.4	727	17:24	3.39
639	15:58	231.82	684	16:42	51.99	728	17:25	3
640	15:59	198.41	685	16:43	50.27	729	17:26	2.63
641	16:00	230.96	686	16:44	48.49	730	17:27	2.27
642	16:01	250.13	687	16:45	43.11	731	17:28	1.96
643	16:02	254.31	688	16:46	39.5	732	17:29	1.65
644	16:03	253.62	689	16:47	34.2	733	17:30	1.34

Anexo 6. Artículo

Water Electrolysis For The Generation Of Hydrogen Through A Photovoltaic System In Puno

Abstract—Hydrogen energy is one of the sustainable energy sources for the environment with zero emissions of carbon dioxide and pollutants. This energy matrix can contribute to the development of clean energy in the Peruvian Altiplano. In this context, the objective of this research was to determine the production of hydrogen through water electrolysis using a photovoltaic system in the Peruvian Altiplano. To carry out this investigation, the water electrolysis method was employed as a means of energy conversion in the fuel cell, producing green hydrogen gas supplied by a photovoltaic solar energy source. This system was developed using 304 stainless steel plates to prevent corrosion during the water electrolysis process, effectively separating hydrogen and oxygen. Pressure sensors and analog hydrogen gas meters were used, connected to a Programmable Logic Controller (PLC) for real-time automatic monitoring and data collection. The results revealed a hydrogen production rate of 10.69 PSI/d in a 6 L storage tank, based on the experimental design of the fuel cells, utilizing photovoltaic solar energy as a sustainable environmental energy source. Therefore, the water electrolysis method applied in the fuel cell, powered by electricity from an autonomous photovoltaic system, generated green hydrogen, establishing a sustainable energy system in the Puno region.

Keywords—Fuel cell, green hydrogen, photovoltaic solar, water electrolysis

1. Introduction

Nowadays, the search for new systems that produce sustainable energy is very important, mainly to maintain environmental sustainability. Additionally, other factors such as economic growth, improved quality of life, rapid population growth, and high technological development also contribute to increased energy consumption, primarily supplied by fossil fuels (Gupta, 2008).

However, one of the emerging technologies worldwide and with a future trend is hydrogen energy, due to its safety, flexibility, accessibility, and various production

processes like electrolysis and other techniques. Moreover, this energy can play a significant role in a country's energy matrix, aligning with the trend towards sustainable development and research in this field, with a forward-looking perspective (Veziroglu & Barbir, 1991). Furthermore, it is considered a sustainable energy carrier on a global scale (Mazzeo et al., 2022), especially when produced on a large scale using renewable energy sources (Alavi et al., 2016).

Hydrogen possesses a unique quality that can be harnessed and utilized across various energy sectors such as electricity, heating, gas, and transportation. Presently, the most fundamental industrial process and the simplest methods for producing nearly pure hydrogen is water electrolysis (Lamy & Millet, 2020). It is anticipated that the significance of hydrogen production will increase in the future, becoming a primary source of sustainable energy for the environment (Midilli et al., 2005), eco-friendly transportation, and numerous large-scale applications (Barhoumi et al., 2022).

It can also serve as an alternative to carbon-based fuels, backed by high energy efficiency, environmental friendliness, and freedom from pollution (Luo et al., 2022). Hydrogen holds a significant attribute as an energy carrier, boasting a high energy density of 140 MJ/kg, which is twice that of regular solid fuels, and it offers superior energy efficiency (Chi & Yu, 2018).

Electrolysis technology will be fundamental in a future energy market where hydrogen will play a crucial role. Electrolysis is a widely used method in industrial applications, particularly in the production of high-purity hydrogen and oxygen. Essentially, it's a process that involves separating chemical components (H_2 , O) dissolved in the electrolyte (water + KOH, NaOH) through an external electric current (Amores et al., 2021). This is an approach that can be tailored to renewable energy sources. Generally, there are three types of electrolysis methods based on operating conditions, materials used, and technological structure: alkaline, polymer membrane, and solid oxide (Toklu et al., 2016).

For that reason, water electrolysis is the simplest method of producing hydrogen, but hydrogen is typically generated from fossil sources due to cost-effectiveness. Hence, when water electrolysis is coupled with renewable energy resources, it's considered a long-term, sustainable, and environmentally friendly solution for energy production (Elmorshedy et al., 2021; Pfeifer et al., 2019), with solar and wind energy being the most popular choices (Marino et al., 2019). Research into water electrolysis aims to lower

production costs while simultaneously increasing the efficiency of green hydrogen production (Dobó & Palotás, 2017).

However, in the Peruvian Altiplano region, there are very few studies on hydrogen generation using various methods and techniques, especially when applied with renewable energies. Therefore, there is a need to conduct such studies or research to apply them in systems such as internal combustion engines, replacing fossil fuels with renewable fuel, or for electricity generation through the chemical reaction of hydrogen with oxygen. Meanwhile, the population growth and increasing human needs lead to a rise in energy demand and the quest for new sources of energy that are sustainable and environmentally friendly.

Therefore, the aim of this research was to ascertain hydrogen production through water electrolysis using a photovoltaic system in the Peruvian Altiplano. Solar resources are abundant in this region, harnessed through photovoltaic systems for electricity generation. When used as an energy supply in fuel cells to produce green hydrogen, it becomes a sustainable energy matrix for the environment.

2. Experimental Design

2.1. Study Area

The research project was conducted in the highlands of the Peruvian Andes, situated at 15°30'00"S 70°07'60"W, at an altitude of 3824 m. This region experiences a highly variable climate characterized by strong winds, very low temperatures dropping below 0 °C during the dry season, and fluctuating precipitation levels in the rainy season.

2.2 Photovoltaic Solar System and Solar Irradiance

For the execution of this study, a photovoltaic system was set up, comprising a 250 W monocrystalline solar panel at 12 V DC, a 15 A charge controller, and a 120 Ah battery to power the fuel cells for water electrolysis. Solar irradiance was also measured using a solar meter (SOLAR-100, AMPROBE-USA) throughout the experimental period from June to August 2023. Solar irradiance in this region varies considerably due to the alternating dry and rainy seasons year-round. However, during the experimentation period, the majority of days were sunny, almost entirely. Consequently, the hydrogen production exhibited minimal irregularity due to the photovoltaic system's energy

variation. The behavior of solar irradiance during the experimental timeframe is depicted in Figure 1.

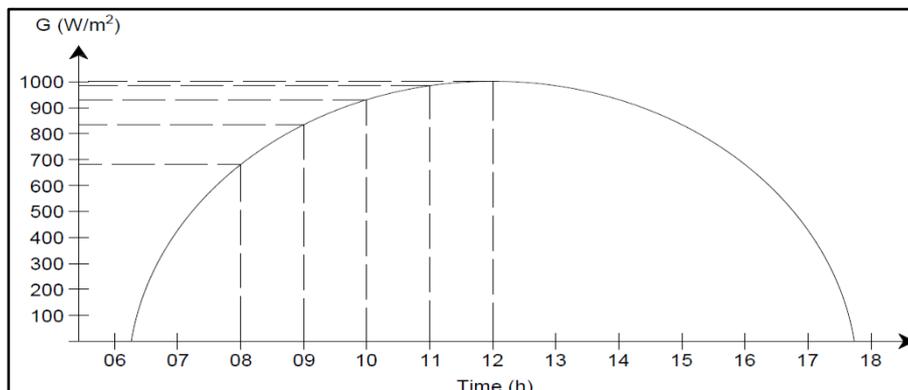


Figure 1. Behavior of Solar Irradiance in the Peruvian Altiplano

2.3 Hydrogen Generator through Water Electrolysis

To produce hydrogen, a water electrolysis fuel cell was designed. A prototype of the fuel cell was implemented, using 2 mm thick 304 stainless steel, in the form of folded sheets stacked on top of each other with mechanical fitting, along with an insulation system between plates. The fuel cell chamber consists of water and the electrolyte solution (caustic soda), responsible for the chemical reaction to separate oxygen and hydrogen from water, ultimately storing it in a 6 L hydrogen gas container. A pressure sensor and analog hydrogen gas meter are connected to a PLC (Programmable Logic Controller), which stores and monitors real-time data acquisition. Figure 2 depicts the fuel cell with the photovoltaic energy supply.

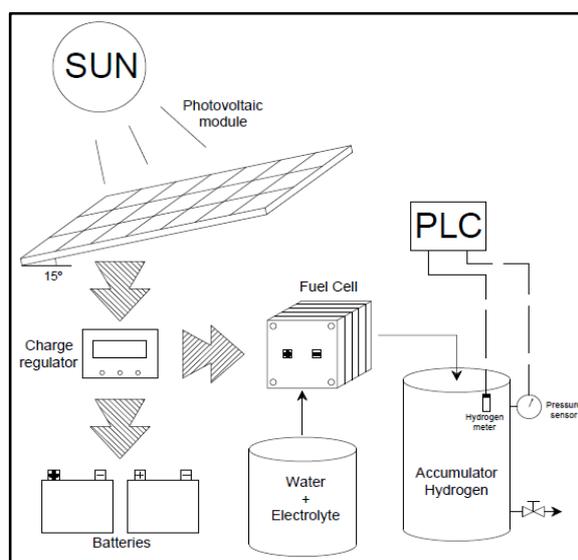


Figura 2 Fuel Cell, Hydrogen Storage, and Photovoltaic Supply

2.4 Hydrogen Production through Water Electrolysis

To produce green hydrogen, a photovoltaic system was employed as the electricity supply. For this reason, water electrolysis was carried out using stainless steel electrodes (anode and cathode) to separate hydrogen and oxygen from water. The setup consisted of multiple electrolytic cells designed for hydrogen generation. Sodium hydroxide was used as the electrolyte for the water electrolysis process. Gas measurement was facilitated by an analog hydrogen gas sensor (0 – 5) V and a pressure sensor (0 – 100) PSI, connected to the PLC to acquire sensor and storage tank pressure data.

The water electrolyzer equipment comprises two electrodes (anode and cathode), separated by a distance between plates to optimize the chemical reaction of the electrolyte, facilitating the separation of hydrogen and oxygen (Pein et al., 2021). Figure 3 illustrates the operational schematic of a hydrogen cell.

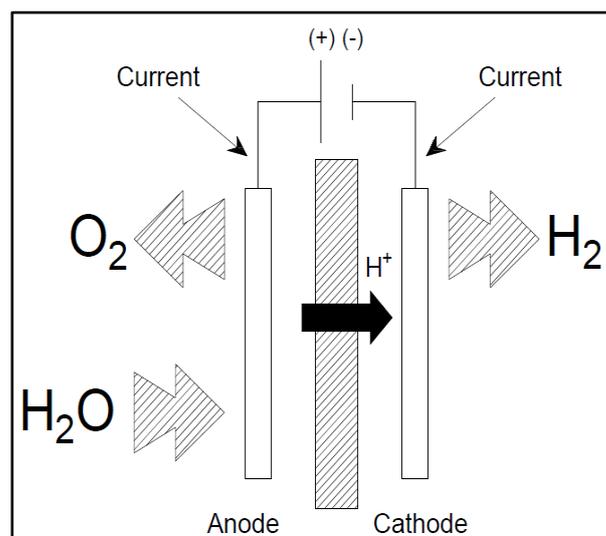
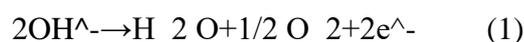


Figure 3 Green Hydrogen Electrolyzer

Alkaline Water Electrolysis is an endothermic chemical reaction through which a water molecule can be split into hydrogen and oxygen when a certain amount of electricity and heat is supplied. The chemical reaction is represented by equation (1) [11].



2.5 Analysis and Statistical Testing

This research project was conducted through experimental methods. Initially, solar irradiance data were processed and averaged, then represented in a figure over the course

of the day. Hydrogen fuel cells were designed and implemented to evaluate differences in hydrogen generation using an Analysis of Variance (ANOVA). The data were processed using Microsoft Excel and a freely licensed statistical software, RStudio.

Results and Discussion

Solar Irradiance in the Altiplano Region

Solar irradiance in the Peruvian Altiplano remained consistent during the experimental period due to the dry season and the prevalence of sunny days. As a result, the average energy produced during peak sunlight hours (PSH) per month was 6.89 kWh/m²/d, with a maximum solar irradiance of 1089.76 W/m². Meanwhile, the 250 W photovoltaic module consistently generated energy from 09:00 AM to 03:00 PM. Thus, the energy production by the photovoltaic system was well-suited to the number of sunny days during the experimentation period, with minimal occurrence of partly cloudy and rainy days. Figure 4 depicts the average monthly solar irradiance curve. Many studies assert that the supply of electrical energy for green hydrogen production comes from photovoltaic systems, thereby avoiding the use of fossil fuels (Al Busaidi et al., 2016).

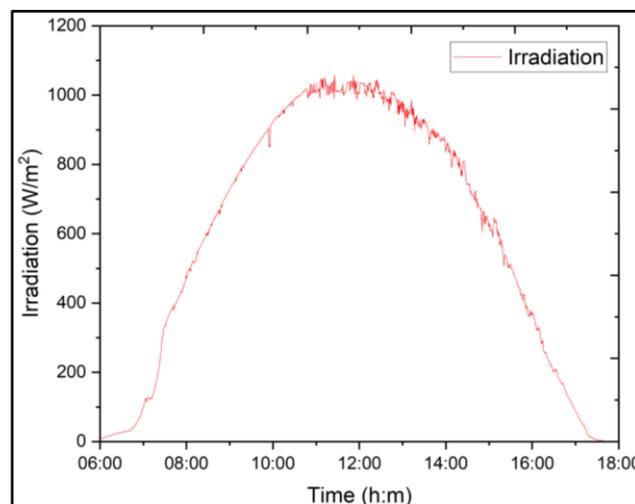


Figura 4 Behavior of Solar Irradiance in the Peruvian Altiplano

3.2 Hydrogen Fuel Cell

The hydrogen fuel cell exhibited an energy consumption of 30 A at a voltage of 6 V (plates in series) during hydrogen production. Because of this, the photovoltaic system wasn't sufficiently supplying energy from around 06:00 AM to 09:00 AM. However,

starting from 09:00 AM to 03:00 PM, the photovoltaic energy source adequately powered the fuel cell for hydrogen production, rendering this system more reliable and sustainable.

In this context, hydrogen production through the fuel cell operates optimally from 09:00 AM to 03:00 PM when coupled with the photovoltaic system on sunny days without partial cloudiness or light to heavy rain. Outside of this timeframe, hydrogen production is not feasible due to the high energy consumption of the fuel cell. Figure 5 illustrates the behavior of photovoltaic solar energy with the hydrogen fuel cell.

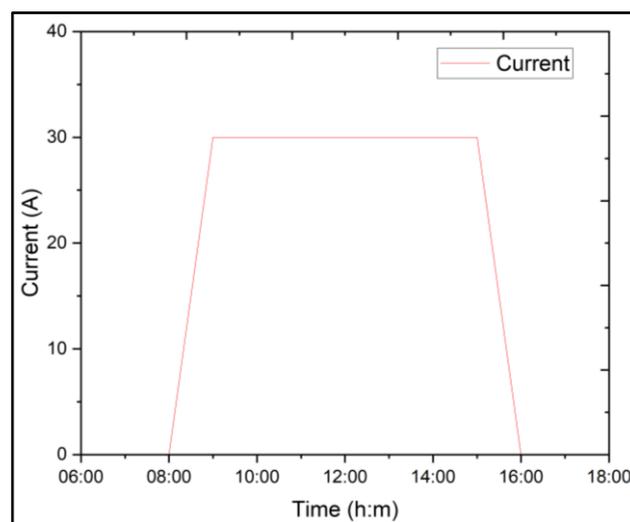


Figure 5 Energy Behavior of the Hydrogen Fuel Cell

3.3 Green Hydrogen Production

The hydrogen produced by the fuel cell through electrolysis is shown in Figure 6, measuring approximately 10.69 PSI per day. This is due to the high energy consumption of the hydrogen fuel cell and the 6 L storage tank volume. However, the energy generated by the photovoltaic solar system was crucial between 09:00 AM and 03:00 PM. Additionally, on the tenth day, hydrogen production reached around 100 PSI. After that day, the hydrogen pressure was released to 30 PSI to assess if the hydrogen production remained constant in the subsequent days. Thus, hydrogen production remained steady during the experimental period, primarily due to consistent solar irradiance patterns with numerous sunny days. However, if solar irradiance hadn't been consistent, hydrogen production might have experienced negative fluctuations. This underscores the sustainability of this system for the environment, as it relies on an autonomous photovoltaic solar system rather than conventional grid electricity. Other researchers

mention that water electrolysis is an attractive process for green hydrogen production since it harnesses renewable energy sources as the energy supply (Okonkwo et al., 2022).

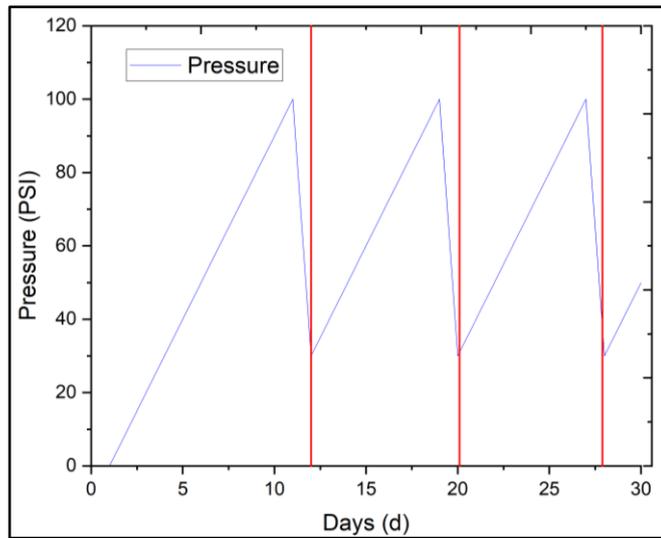


Figure 6 Hydrogen Production and Energy Consumption of Green Hydrogen Gas

3.4 ANOVA in Hydrogen Production

To assess hydrogen production, three fuel cells were constructed, each with five repetitions, in order to conduct Analysis of Variance (ANOVA) for hydrogen production. Table 1 displays the daily hydrogen production based on the conducted trials during the experimental period.

Table 1 Hydrogen Production per Day with Three Fuel Cells

Fuel Cell	Accumulated Pressure in (PSI)				
	1	2	3	4	5
Cell A	10.00	10.20	10.40	10.80	9.90
Cell B	9.80	10.10	9.90	11.78	10.70
Cell C	11.20	11.00	11.70	12.00	10.90

Performing ANOVA on the Fuel Cells for Hydrogen Production yields the following results, as shown in Table 2.

Table 2 ANOVA in Hydrogen Production

Df	Sum	Sq	Mean Sq	F-value	Pr (>F)
FO(A,B,C)	2	3.443	1.7214	5.059	0.0255
Residuals	12	4.083	0.3402		
Total	14	7.526	41		

From the experimentation conducted on hydrogen production using the three fuel cells, ANOVA results reveal significance with a 2.55% level, which is below the widely accepted 5% significance threshold. Therefore, the ANOVA performed on the fuel cells is significant, particularly in cases A and C, as shown in Table 3 with the Tukey statistical test (2.86% significance). This demonstrates that the evaluation of hydrogen production through electrolysis is meaningful for its use and environmental sustainability. Finally, Figure 7 illustrates the graphical comparison of means in hydrogen production and the significant differences determined by Table 2.

Table 3. Tukey Statistical Test

Fuel Cells	Dif.	Low value	High value	Pr (>F)
Cell (B-A)	0.196	-0.7881	1.1801	0.8576
Cell (C-A)	1.100	0.1158	2.0841	0.0286
Cell (C-B)	0.904	-0.0801	1.8881	0.0730

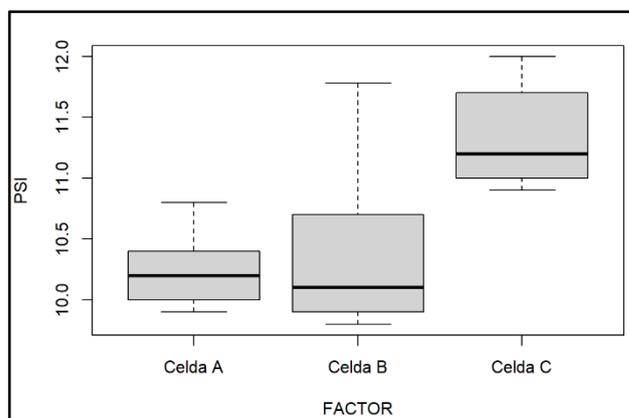


Figure 7 Comparative Analysis of Pressures (PSI) in Hydrogen Production

3.5 Cost-Benefit Analysis in Hydrogen Production

The average monthly energy consumption was 32.40 kWh, drawn from the photovoltaic solar system. However, when compared to the conventional supply from the public grid at a rate of S/ 1.00 per kWh, the electricity consumption would amount to S/ 25.92 per month, considering only the energy cost. Therefore, hydrogen production is environmentally sustainable as it utilizes a photovoltaic solar system as the energy source for the water electrolysis process. Figure 8 illustrates the cost-benefit comparison of the hydrogen production system.

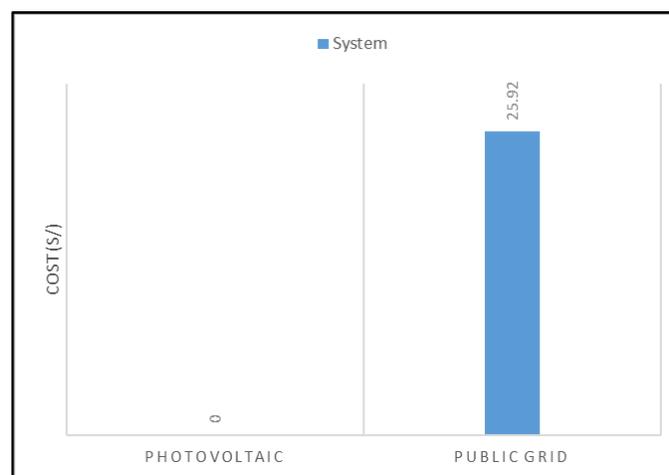


Figure 8 Cost-Benefit Analysis in Hydrogen Production

4 Conclusions

The solar irradiance behavior in the city of Puno during the experimental period was consistent due to the dry season and a higher number of sunny days. As a result, the average monthly PSH was 6.89 kWh/m²/d, with a maximum solar irradiance of 1089.76 W/m². The hydrogen gas production was approximately 10.69 PSI/d, possibly influenced by the storage tank volume and the design of the hydrogen fuel cell. Therefore, hydrogen production utilizing the energy supply from the photovoltaic solar system enabled hydrogen generation from 09:00 AM to 03:00 PM; outside this period, hydrogen production using photovoltaic solar energy is not feasible. Moreover, the energy cost savings considering the electricity tariff are noteworthy as it offsets consumption from the public grid, which incurs costs, with the photovoltaic solar system.

5 Acknowledgment

We express our gratitude to the School of Electrical Mechanical Engineering at the National University of the Altiplano in Puno and the School of Renewable Energy Engineering at the National University of Juliaca, Peru.

6 References

Al Busaidi, A. S., Kazem, H. A., Al-Badi, A. H., & Khan, M. F. (2016). A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in oman. *Renewable and sustainable energy reviews*, 53, 185-193.

Alavi, O., Mostafaeipour, A., & Qolipour, M. (2016). Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(34), 15158-15171.

Amores, E., Sánchez-Molina, M., & Sánchez, M. (2021, 2021/06/01/). Effects of the marine atmosphere on the components of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production. *Results in Engineering*, 10, 100235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100235>

Barhoumi, E. M., Okonkwo, P. C., Ben Belgacem, I., Zghaibeh, M., & Tlili, I. (2022, 2022/09/01/). Optimal sizing of photovoltaic systems based green hydrogen refueling stations case study Oman. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(75), 31964-31973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.140>

Chen, J.-p., Ma, H.-h., Wang, Y.-x., Huang, L.-l., & Shen, Z.-w. (2021, 2021/03/26/). Effect of hydrogen-storage pressure on the detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by glass microballoons. *Defence Technology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.021>



Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390-394.

Coskun Avci, A., & Toklu, E. (2021, 2021/04/18/). A new analysis of two phase flow on hydrogen production from water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.180>

Dobó, Z., & Palotás, Á. B. (2017). Impact of the current fluctuation on the efficiency of alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9), 5649-5656.

Elmorshedy, M. F., Elkadeem, M. R., Kotb, K. M., Taha, I. B. M., & Mazzeo, D. (2021). Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors. *Energy Conversion and Management*, 245, 114584.

Gupta, R. B. (2008). *Hydrogen fuel: production, transport, and storage*. Crc Press.

Karizi, F. Z., Safarifard, V., Khani, S. K., & Morsali, A. (2015). Ultrasound-assisted synthesis of nano-structured 3D zinc (II) metal–organic polymer: precursor for the fabrication of ZnO nano-structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 238-245.

Kim, J., Jun, A., Gwon, O., Yoo, S., Liu, M., Shin, J., Lim, T.-H., & Kim, G. (2018). Hybrid-solid oxide electrolysis cell: A new strategy for efficient hydrogen production. *Nano Energy*, 44, 121-126.



Lamy, C., & Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of power sources*, 447, 227350.

Li, D., Guo, J., Zhang, J., Zhan, L., & Alizadeh, M. (2021, 2021/07/01/). Numerical assessment of a hybrid energy generation process and energy storage system based on alkaline fuel cell, solar energy and Stirling engine. *Journal of Energy Storage*, 39, 102631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102631>

Liu, W., Zuo, H., Wang, J., Xue, Q., Ren, B., & Yang, F. (2021, 2021/01/06/). The production and application of hydrogen in steel industry. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.123>

Luo, Z., Wang, X., Wen, H., & Pei, A. (2022, 2022/07/08/). Hydrogen production from offshore wind power in South China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24558-24568. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.162>

Madhavan, B. L., & Venkat Ratnam, M. (2021, 2021/07/15/). Impact of a solar eclipse on surface radiation and photovoltaic energy. *Solar Energy*, 223, 351-366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.062>

Maka, A. O. M., Salem, S., & Mehmood, M. (2021, 2021/08/28/). Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: Challenges, potential, opportunities and future perspectives. *Cleaner Engineering and Technology*, 100267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100267>



Marino, C., Nucara, A., Panzera, M. F., Pietrafesa, M., & Varano, V. (2019). Energetic and economic analysis of a stand alone photovoltaic system with hydrogen storage. *Renewable Energy*, 142, 316-329.

Mazloomi, K., & Sulaiman, N. (2013). Retarding forces cancellation in electrolyte solutions-an electrical approach. *International Journal of Applied Electronics in Physics & Robotics*, 1(1), 1-4.

Mazzeo, D., Herdem, M. S., Matera, N., & Wen, J. Z. (2022, 2022/11/01/). Green hydrogen production: Analysis for different single or combined large-scale photovoltaic and wind renewable systems. *Renewable Energy*, 200, 360-378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.057>

Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable and sustainable energy reviews*, 9(3), 255-271.

Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254-12269.

Mulcué-Nieto, L. F., Echeverry-Cardona, L. F., Restrepo-Franco, A. M., García-Gutiérrez, G. A., Jiménez-García, F. N., & Mora-López, L. (2020, 2020/11/01/). Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia. *Energy Reports*, 6, 2828-2835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.036>



Okonkwo, P. C., Mansir, I. B., Emori, W., & Bhowmik, H. (2022). Effect of electrode material on the hydrogen production using a low-cost home-made alkaline electrolyzer. *Vacuum*, 198, 110878.

Pein, M., Neumann, N. C., Venstrom, L. J., Vieten, J., Roeb, M., & Sattler, C. (2021, 2021/07/16/). Two-step thermochemical electrolysis: An approach for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(49), 24909-24918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.036>

Pfeifer, A., Krajačić, G., Ljubas, D., & Duić, N. (2019). Increasing the integration of solar photovoltaics in energy mix on the road to low emissions energy system—Economic and environmental implications. *Renewable Energy*, 143, 1310-1317.

Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023, 2023/11/01/). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10, 3474-3493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>

Qian, X., Bai, Y., Huang, W., Dai, J., Li, X., & Wang, Y. (2021, 2021/09/01/). Fuzzy Technique Application in Selecting Photovoltaic Energy and Solar Thermal Energy Production in Belt and Road Countries. *Journal of Energy Storage*, 41, 102865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102865>

Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., & Hirscher, M. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121-1140.

Santos, D. M., Sequeira, C. A., & Figueiredo, J. L. (2013). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*, 36, 1176-1193.



Schalenbach, M., Tjarks, G., Carmo, M., Lueke, W., Mueller, M., & Stolten, D. (2016). Acidic or alkaline? Towards a new perspective on the efficiency of water electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(11), F3197.

Sherbo, R. S., Delima, R. S., Chiykowski, V. A., MacLeod, B. P., & Berlinguette, C. P. (2018). Complete electron economy by pairing electrolysis with hydrogenation. *Nature Catalysis*, 1(7), 501-507.

Steinberger, M., Geiling, J., Oechsner, R., & Frey, L. (2018). Anode recirculation and purge strategies for PEM fuel cell operation with diluted hydrogen feed gas. *Applied Energy*, 232, 572-582.

Toklu, E., Avci, A. C., Kaygusuz, K., & Gur, M. (2016). A research on hydrogen production from industrial waste heat by thermal water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(24), 10071-10079.

Veziroglu, T. N., & Barbir, F. (1991). Solar-hydrogen energy system: The choice of the future. *Environmental conservation*, 18(4), 304-312.

Xiao, G., Gao, P., Wang, L., Chen, Y., Wang, Y., & Zhang, G. (2011). Ultrasonochemical-assisted synthesis of CuO nanorods with high hydrogen storage ability. *Journal of Nanomaterials*, 2011.



Universidad Nacional del
Altiplano Puno



VRI
Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **LEONIDAS VILCA CALLATA** identificado(a) con N° DNI: **42196504** en mi condición de egresado(a) del:

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

con código de matrícula N° 173826, informo que he elaborado la tesis denominada:

"ELECTROLISIS DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN PUNO".

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 19 de Marzo del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella



Universidad Nacional del
Altiplano Puno



Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **LEONIDAS VILCA CALLATA** identificado(a) con N° DNI: **42196504**, en mi condición de egresado(a) del Programa de Maestría o Doctorado:

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
informo que he elaborado la tesis denominada:

"ELECTROLISIS DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN PUNO".

para la obtención de **Grado**.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 19 de Marzo del 2024.



FIRMA (Obligatorio)



Huella