

Evaluación de la producción de hidrógeno verde mediante el proceso de electrolisis del agua usando módulos fotovoltaicos y colectores solares térmicos

Presentado por:

CARLOS IGNACIO NAVAS GÓMEZ

Trabajo presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero en Energía

Asesores:

Sebastián Villegas

Carlos Arredondo

FACULTAD DE INGENIERÍA

TRABAJO DE GRADO

MEDELLIN

2022



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN

Colombia

Índice

Contenido del informe	3
Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
Actividades.....	34
INTRODUCCIÓN.....	56
1. ESTADO DEL ARTE	8
1.1 Tecnologías o procesos de generación de H ₂	8
2. MARCO CONCEPTUAL	13
2.1 Electrolisis	13
2.2 Modelo electrolizador: Proton Exchange Membrane (PEM)	16
2.3 Termodinámica del proceso	17
2.3.1 Potencial de activación	18
2.3.2 Potencial Óhmico	19
2.3.3 Potencial de concentración.....	20
2.3.4 Eficiencia de Faraday.....	22
2.4 Modelo sistema solar fotovoltaico PV	24
2.5 Modelo colector solar	29
2.6 Modelo sistema hibrido	36
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
4. CONCLUSIONES	43
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Contenido del informe

- Título y portada
- Objetivos
 - Generales
 - Específicos
- Actividades
- Introducción
- Estado del arte
- Marco conceptual
 - Modelos sistemas PV
 - Modelos Sistema térmico
 - Modelo electrolizador
 - Modelo acoplado para el sistema híbrido
- Discusión de resultados
- Conclusiones
- Referencias

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el desempeño de un sistema híbrido de energía solar fotovoltaica y térmica para la producción de hidrógeno con electrolisis a diferentes condiciones de operación, mediante la modelación del sistema utilizando leyes de conservación y principios físicos.

Objetivos específicos

- Modelar los subsistemas que componen la tecnología del sistema híbrido usando las leyes de conservación y principios físicos que permiten describir el comportamiento de cada uno de ellos
- Validar los modelos que describen cada subsistema utilizando información reportada en la literatura para verificar el grado de aproximación a datos reales
- Construir un modelo acoplado a partir de los modelos de cada subsistema a través de variables que los relacionan y conectan
- Analizar el comportamiento del modelo acoplado mediante la simulación del proceso de producción de hidrógeno usando diferentes condiciones de operación

Actividades

- Investigar en la literatura los modelos que describen cada subsistema y las condiciones de operación para cada uno
- Elaborar un código en MATLAB que permita dar solución a los modelos que describen los subsistemas
- Encontrar datos experimentales de las variables involucradas de cada subsistema y compararlos con los valores calculados a partir de los modelos
- Identificar las variables que conectan los modelos de cada subsistema entre sí

- Elaborar un código en MATLAB que permita conectar los modelos entre si a través de las variables que tienen en común
- Simular el modelo acoplado a diferentes condiciones de operación para identificar las más adecuadas para incrementar la producción de hidrogeno
- Realizar un análisis de los resultados y generar el informe respectivo

ABSTRACT

Energy has always been present in the history of mankind since we depend on its different forms to move the world. Since the industrial revolution, the generation of energy through the use of hydrocarbons took a lot of strength. Nowadays, as we have access to new technologies, we have chosen not to depend so much on them, seeking to give more participation to renewable energy generation systems. This work focuses on building a joint model using three technologies (solar photovoltaic, solar thermal and an electrolyzer) to evaluate the production of green hydrogen through the electrolysis of water using photovoltaic modules and solar collectors, and then evaluate what happens to this production by introducing changes in the temperature of the water entering the electrolyzer. It is found that there is an increase in hydrogen production when using solar collectors to preheat the water compared to the values found when the system does not include a solar collector.

RESUMEN

La energía siempre ha estado presente en la historia de la humanidad ya que dependemos de sus diferentes formas para mover el mundo. Desde la revolución industrial, la generación de energía mediante el uso de hidrocarburos tomo mucha fuerza. Hoy en día al tener acceso a nuevas tecnologías se ha optado por no depender tanto de estos, buscando dar más participación a sistemas de generación de energía renovable. Este trabajo se centra en construir un modelo conjunto haciendo uso de tres tecnologías (solar fotovoltaica, solar térmica y un electrolizador) buscando evaluar la producción de hidrogeno verde por medio de la electrolisis del agua usando módulos fotovoltaicos y colectores solares, para luego evaluar que sucede con dicha producción al introducir cambios en la temperatura del agua que ingresa al electrolizador. Se encuentra que existe un incremento en la producción de hidrógeno al usar colectores solares para precalentar el agua comparado con los valores encontrados cuando el sistema no incluye un colector solar.

MAIN WORDS

Hydrogen, temperature, energy, renewable, solar, heating, collector, module, electrolyzer, model, evaluate, production, radiation, electrolysis, generation, process, thermal, technology, potential, current, voltage, PEM, photovoltaic, hydrocarbons, storage, heat, entropy, pressure, electrons, density, cell, coefficient, convection, resistance, protons, oxygen, anode, cathode, electrolyte, purity, environment, preheat, hybrid, sustainable, membrane, heating, efficiency, reaction, chemical, electrode, catalyst, inexhaustible, vector, analysis.

PALABRAS CLAVES

Hidrogeno, temperatura, energía, renovable, solar, calentar, colector, modulo, electrolizador, modelo, evaluar, producción, radiación, electrolisis, generación, proceso, térmico, tecnología, potencial, corriente, voltaje, PEM, fotovoltaico, hidrocarburos, almacenamiento, calor, entropía, presión, electrones, densidad, celda, coeficiente, convección, resistencia, protones, oxígeno, ánodo, cátodo, electrolito, pureza, ambiente, precalentar, hibrido, sostenible, membrana, calentamiento, eficiencia, reacción, química, electrodo, catalizador, inagotable, vector, analisis.

INTRODUCCIÓN

Según [1][2][3] en los últimos años la demanda mundial de energía a aumentado, debido al incremento poblacional generando cambios en la economía, afectando de manera importante el sector energético. Los seres humanos desde hace muchos años entendieron que uno de los factores más importantes para mover el mundo es la energía, la cual ha permitido mejorar la calidad de vida. Una de las maneras más antiguas y efectivas para la generación de energía es el uso de hidrocarburos (combustibles fósiles), los cuales han sido usados desde la revolución industrial. Estos dependen o se ven afectados porque son recursos no renovables, es decir, tienen una tendencia a agotarse o que el costo/beneficio de su obtención es elevado, haciéndolos inviables. Debido al uso de combustibles fósiles, los cuales han sido la principal fuente de energía, se ha generado un aumento significativo en los niveles de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmosfera, que son responsables en gran parte del calentamiento global y cambio climático.[4] Debido a los puntos negativos de las energías fósiles, se ha planteado el uso de energías que sean alternativas, limpias, sostenibles y renovables buscando así que los niveles de CO₂ y otros gases en la atmosfera se reduzcan.

Las fuentes de Energía Renovables son aquellas fuentes que se consideran inagotables o que su nivel de regeneración de forma natural es mayor que el de consumo, ya que constantemente, como su nombre lo

dice, se renuevan. Estas fuentes son el sol, los vientos, el agua, residuos orgánicos e inorgánicos y el calor de la tierra; de las cuales nacen las energías renovables como la energía solar, energía eólica, energía geotérmica, biomasa, energía mareomotriz, entre otras. Estas energías juegan un papel muy importante en la transición energética a la cual se está apuntando mundialmente; además, son una opción prometedora para entregar posibles soluciones a problemas de gran magnitud que afectan a la humanidad, pero están lejos de ser perfectas o ideales. Uno de los mayores desafíos a los cuales se enfrentan estas energías, es la intermitencia y constante variabilidad de las fuentes de las cuales provienen. Debido a esto se crea un grado de incertidumbre que tiene que ser mínimo cuando hablamos de generación de energía. Una solución, es usar sistemas de almacenamiento de energía como baterías para lidiar con la variabilidad de las fuentes de energía renovables y así aumentar la confiabilidad de estos sistemas a la hora de entregar o generar energía. Implementar baterías suena como una solución ideal al problema de las energías renovables, pero el uso de estas implica un aumento en los costos, debido al alto costo de producción y puede hacer que la implementación de esta tecnología haga inviable los proyectos. Por otro lado, algunos de los materiales para su producción son poco abundantes en la naturaleza y contaminantes.[5]

Existe una alternativa que busca un enfoque diferente para los sistemas de energías renovables permitiendo su uso y disminuyendo la variabilidad de estos sistemas, que se conoce como Power to X [6]. Los sistemas Power to X son un tipo de sistema innovador para almacenar y convertir energía. Estos sistemas buscan convertir la energía (power) en un producto u otro tipo de energía (X) y de esta manera poder ser almacenada para luego darle un uso final. Un ejemplo claro es la generación de hidrogeno verde el cual consiste en generar hidrogeno usando fuentes renovables de energía. Uno de los métodos más llamativos en la actualidad es la generación de hidrogeno mediante electrolisis, ya que tiene bajas emisiones de CO₂ y genera un H₂ con una alta pureza [7]. La energía solar fotovoltaica, puede ser usada como fuente para generar la corriente necesaria para la electrolisis. Luego, al obtener el hidrogeno que sería el producto para almacenar, se busca darle un uso final, sea como combustible o usando celdas de hidrogeno para reconvertirlo en energía nuevamente. Lo que hace llamativo a estos sistemas es que almacenar combustible puede ser menos costoso que almacenar energía eléctrica en baterías, lo cual es uno de los principales argumentos que defienden estos sistemas.

En la figura 1 se muestra una vista general de los principales procesos que involucran el Power to X usando la electrolisis solamente como intercambiador, es decir, que mediante el Power to x enfocado a la producción de hidrogeno, llamado Power to H₂, se puede generar y/o suplir ciertos productos o procesos en diferentes sectores como veremos a continuación.

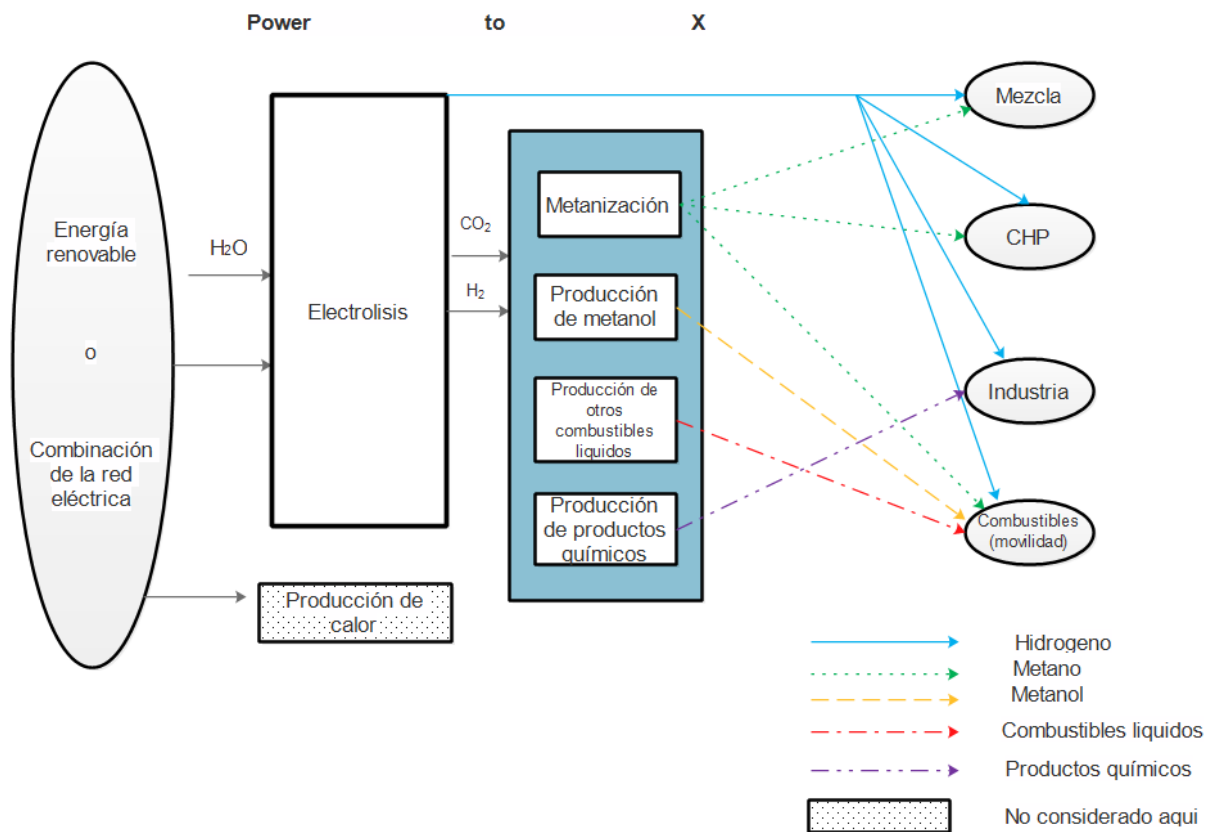


Figura 1: Diagrama Power to X con electrolisis. Adaptado de [8]

Como se puede ver en la figura 1, a partir del Power to X se puede generar una serie de productos los cuales pueden ser usados en diferentes actividades, por ende, se debería investigar más acerca del tema. Esta podría ser una solución a corto o mediano plazo para el principal problema de las energías renovables.

El enfoque de este trabajo se centra en la generación de hidrogeno mediante el uso de fuentes renovables, una manera también de aplicar el Power to X como se describió previamente. A continuación, se presenta el estado del arte de las principales tecnologías para producir hidrogeno, ya sean mediante combustibles fósiles o usando fuentes renovables de energía y los diferentes procesos que se pueden aplicar para su obtención, hasta llegar a la obtención de hidrogeno mediante electrolisis.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Tecnologías o procesos de generación de H₂

El Hidrogeno (H_2) es el elemento que más abunda en el universo [9] y este se encuentra en el agua y en componentes orgánicos. Este elemento es bastante “sencillo” ya que se compone simplemente por un electrón, un protón y un neutrón. El peso atómico del Hidrogeno es de $1.008 \frac{g}{mol}$ y su densidad es de $0.084 \frac{kg}{m^3}$. [1]

Debido a que este elemento tiene una densidad volumétrica relativamente baja, implica que se necesita mayor volumen para almacenar la misma cantidad de energía y por esto se asocia con tener mayores presiones. El almacenamiento del hidrogeno es uno de los principales retos con esta tecnología.

El hidrogeno tiene una energía contenida en forma de calor en el límite superior de $141.8 \frac{MJ}{kg}$ a 298 K y una energía en forma de calor en el límite inferior de $120 \frac{MJ}{kg}$ a 298 K, los cuales son mucho más altos que varios combustibles como, por ejemplo, la gasolina. El hidrogeno en forma gaseosa tiene una alta densidad energética pero una baja densidad volumétrica lo que implica espacios muy grandes de almacenamiento como se mencionó anteriormente. Debido a que el tamaño de la molécula es muy pequeño, es posible que pueda escapar a través de algunos materiales usados normalmente para almacenar compuestos y al ser un gas inflamable, puede ocasionar problemas graves [1]. En la tabla 1 se pueden ver las principales propiedades del hidrogeno.

Tabla 1: Propiedades y especificaciones del hidrogeno. Adaptado de [1]

Propiedades	SI Unidades
Fecha de descubrimiento/por/fórmula química	1766/Henry Cavendish/H ₂
Equivalencias; Hidrógeno sólido, líquido y gas a Presión = 981 mbar y Temperatura = 20 °C	1 kg = 14,104 l = 12,126 m ³
Peso molecular	1,00794
Presión de vapor a (-252,8 °C)	101.283 kPa
Densidad del gas en el punto de ebullición y a 1 atm	1.331 kg/m ³
Peso específico del gas a 0 °C y 1 atm (aire=1)	0,0696
Volumen específico del gas a 21,1 °C y 1 atm	11.99 m ³ /kg
Peso específico del líquido en el punto de ebullición y a 1 atm	0,0710
Densidad del líquido en el punto de ebullición y a 1 atm	67.76 kg/m ³
Punto de ebullición a (101,283 kPa)	−252.8 °C
Punto de congelación/fusión a (101,283 kPa)	−259.2 °C
Temperatura crítica	−239.9 °C
Presión crítica	1296.212 kPa, abs
Densidad crítica	30.12 kg/m ³
Punto triple	−259.3 °C at 7.042 kPa, abs
Calor latente de fusión en el punto triple	58.09 kJ/kg
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición	445.6 kJ/kg
Solubilidad en agua vol a 15,6 °C	0,019
Viscosidad del gas diluido a 26 °C (299 K)	9 x 10 ⁻⁶ Pa s
Difusividad molecular en el aire	6.1 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Cp	14.34 kJ/(kg) (°C)
Cv	10.12 kJ/(kg) (°C)
Relación de calores específicos (Cp/Cv)	1,42
Menor poder calorífico, en base al peso	120 MJ/kg
Mayor poder calorífico, en base al peso	141.8 MJ/kg
Menor poder calorífico, base de volumen a 1 atm	11 MJ/m ³
Mayor poder calorífico, base de volumen a 1 atm	13 MJ/m ³
Relación estequiométrica aire/combustible a 27 °C y 1 atm	34.2 kg/kg
Límites de inflamabilidad en el aire	4%—75%
Límites de explosividad (detonabilidad)	18.2 a 58.9 vol% en aire
Velocidad máxima de combustión en el aire	2.7/3.46 (m s ⁻¹)
Temperatura máxima de la llama	1526.85 °C
Temperatura de autoignición en el aire	400 °C/571 °C

El hidrogeno es una opción que, debido a sus propiedades energéticas y caloríficas, debe ser tenida en cuenta como una posible solución a los problemas energéticos. No es una opción perfecta, pero existen tecnologías emergentes como el Power to H₂ (para el hidrogeno) que permite que sea viable el uso de este tipo de tecnologías para favorecer la producción de este elemento.

Existen diferentes procesos para la producción de hidrogeno, dependiendo de la fuente de energía que se use. Cada proceso tiene métodos específicos por los cuales se puede llegar al objetivo principal que es producir hidrogeno y cada método necesita de unos recursos específicos de los cuales será extraído este elemento. Como observa en la figura 2, la energía que se puede usar puede provenir de la energía eléctrica, térmica, la energía fotónica, bioquímica o combinaciones derivadas de estas.

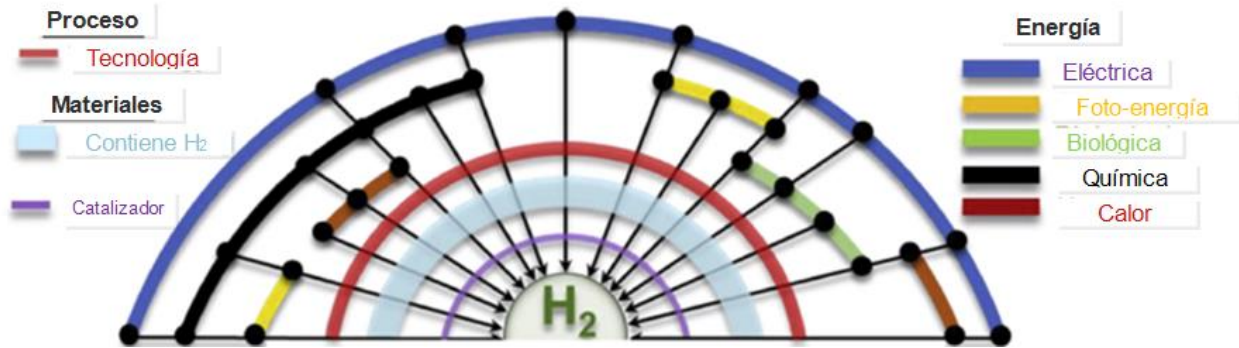


Figura 2: Algunas de las formas para producir hidrogeno. Adaptado de [1]

Después de elegir la fuente de energía que se va a utilizar, se debe tomar la decisión de que método emplear para la producción del hidrogeno que se quiere obtener. Algunos métodos son la electrolisis, la termólisis, la termo catálisis, la PV-electrolisis (PV de fotovoltaico), la gasificación del carbón, la extracción desde combustibles fósiles, entre otras.

Cada uno de estos métodos necesita se aplica o se usa en un recurso específico, por ejemplo, la electrolisis es aplicada normalmente en el agua para la producción de hidrogeno. Los recursos más usados son el agua, la biomasa apropiada; es decir, biomasa que pueda ser usada en procesos de pirólisis, reformado de líquidos, gasificación o fermentación, los biocombustibles, los combustibles fósiles, el sulfuro de hidrogeno, etc.

Algunos de los procesos energéticos para la producción de hidrogeno son: por medio de la energía eléctrica, la energía térmica, la energía fotónica o la energía química. A continuación, se describe brevemente los estos procesos incluyendo el método de producción de hidrogeno en cada uno de ellos y la materia prima a utilizar.

1.1.1 Energía eléctrica

Para la producción de hidrogeno mediante el uso de energía eléctrica se pueden emplear dos métodos: la electrolisis o la descomposición por arco de plasma.

En el caso de la electrolisis, se usa la electrolisis del agua para poder separar la molécula de agua, obteniendo hidrogeno y oxígeno. Este proceso se usa una corriente eléctrica (corriente continua) para activar una reacción en el agua, que permite la separación de los elementos que la componen [10]. Este proceso se expone con más detalle en la sección del marco teórico.

Para el caso de la descomposición por arco de plasma, la materia prima que se utiliza es el gas natural, normalmente metano el cual se hace pasar por un arco de plasma producido eléctricamente buscando obtener hidrogeno y hollín de carbón. Este proceso se puede considerar como una mezcla entre un proceso eléctrico y un proceso térmico ya que el plasma que genera el gas de síntesis (mezcla de hidrogeno y monóxido de carbono) es producido por una tecnología que utiliza energia eléctrica para su funcionamiento.

1.1.2 Energía térmica

Para la producción de hidrogeno mediante el uso de energia térmica, se puede emplear la termólisis, la termo catálisis o los procesos termoquímicos.

La termólisis es un método que utiliza el agua como materia prima. El objetivo de este proceso es descomponer la molécula de agua utilizando calor para aumentar la temperatura del vapor de agua hasta 2500 °C, temperatura a la cual se descompone térmicamente y permite extraer el hidrogeno.

Para el caso de la termo catálisis, la materia prima a utilizar es el sulfuro de hidrogeno. Esta materia prima es extraída de los mares o derivado de otros procesos industriales mediante el uso del cracking termo catalíticamente. El método del cracking termo catalítico es un proceso químico el cual busca quebrar moléculas de un compuesto para producir compuestos más simples. En este método también se puede usar la biomasa para convertirla en hidrogeno realizando una conversión termo catalítica[10].

En los procesos termoquímicos, existen varios caminos para obtener hidrogeno, los cuales son: división del agua, gasificación, o la separación del sulfuro de hidrogeno.

En el caso de la división del agua se busca realizar reacciones químicas cíclicas para obtener un resultado global el cual es la separación de la molécula de agua.

Para la gasificación se usa como materia prima biomasa para convertirla en syngas. El syngas se denomina gas de síntesis y se compone en su mayoría de hidrogeno y monóxido de carbono. El gas que acompaña al hidrogeno en el gas de síntesis también puede ser dióxido de carbono, eso depende de la materia prima utilizada para generarlo.

Otro método para obtener hidrogeno usando como materia prima el sulfuro de hidrogeno, es someter la molécula a reacciones químicas cíclicas para dividirla y asi obtener hidrogeno.

1.1.3 Energía fotónica

Para la producción de hidrogeno mediante energia fotónica se puede optar por diferentes opciones como la electrolisis foto eléctrica, la foto catálisis, el método foto electroquímico o la biofotólisis. Lo que tienen en común estos métodos anteriormente mencionados es que todos utilizan el agua como materia prima.

Para la electrolisis foto eléctrica se usan módulos solares los cuales generan la corriente necesaria para realizar el proceso de electrolisis del agua, separando de esta molécula el hidrogeno y el oxígeno. Esta separación ocurre en el electrolizador [10].

En la fotocatalisis para generar hidrogeno se emplean catalizadores o dispositivos moleculares con captación de electrones foto iniciada.

El método foto electroquímico es básicamente impulsar la electrolisis del agua utilizando una célula hibrida para generar electricidad fotovoltaica. En el caso de la biofotólisis se utilizan sistemas biológicos basado en cianobacterias para generar hidrogeno de forma controlada.

1.1.4 Energía bioquímica

En el caso de la producción de hidrogeno mediante energía bioquímica se suelen utilizar la fermentación oscura y la fermentación enzimática. En el caso de la fermentación oscura, la materia prima a utilizar es biomasa la cual se somete a una fermentación anaeróbica en ausencia de luz para producir gas.

Con la fermentación enzimática la materia prima es agua y en esta se utilizan polisacáridos para generar la energía suficiente con el fin de romper la molécula de agua y obtener hidrogeno.[10]

En la tabla 2 se presenta un resumen de los diferentes procesos, métodos, materias primas, eficiencia de los procesos y una breve descripción de cada uno y cuales son “limpias” (C), “medio limpias” (C/N) y “no limpias” (N).

Tabla 2: Tabla resumen procesos de producción de hidrogeno. Adaptado de [1]

Categoría de proceso	Energía I/P	Materia prima Hidrocarburos (H) / No hidrocarburos (N)	Tecnología	Eff. (%)	*Limpio (C/C/N/N)
Electrólisis	Eléctrico	Agua (N)	AE	62—82	C
		Salmuera	PEM	67—84	C
			SoC cloro álcali	75—90 NA	C C
Electrolisis	Eléctrica-Fotónica	Agua (N)	Fotoelectroquímica	0.5—12	C
Fotólisis	Fotónico	Agua (N)/Algas (H)	Fotosíntesis	1.6-5	C/N
Biofotólisis	Bioenergía fotónica	Microalgas	Foto fermentación	<1	N
		Cianobacterias	Hidrógeno algal	1-3	N
		Bacterias fotosintéticas		2-7	N
		Grasa (H)		12—14	N
		Nutrientes (H) Residuos (H)/Biomasa (H)			C/N
Bioelectrolisis	Bioenergía Eléctrica	Biomasa (H)	Electrolisis microbiana	70-80	N
		Hidrogenases	Fijación del nitrógeno	10	
Biolisis	Bioenergía	Microorganismo	Fermentación oscura	60-80	N
		Bacterias fermentadoras	Hidrólisis	NA	N
		Biomasa (H)+Agua (N)	Reformación en fase acuosa	35—55	N
		CO (N) Agua (N)	Reacción de cambio biológico	NA	N
Biotermólisis	Bioenergía-Calor	Biomasa (H) (microondas) pretratada con ácido	Cofermentación hidrotérmica	NA	N
				35-45	N
Termólisis	Calor	agua (N)	Hidro termólisis	20—55	C
		Biomasa (H) (ausencia de Ov)	Pirólisis	35—50	N
		Biomasa (H)	Gasificación	35—50	N
		Carbón (H)	Gasificación del carbón	74—85	N/CSS
		Combustibles (H)	Reformado con vapor (SR)	60—85	N/CSS
		Combustibles (H)	Reactores de membrana	64—90	N/CSS
		Biomasa(H)	Oxidación parcial	60—75	N
		Metano(H)+CO	Autotérmica	60—75	N
Termo electrólisis	Calor-Electricidad	Combustibles (H)	Reformado en seco de CO2	NA	C/N
			Reformado por plasma	9—85	N

Química	Reacción química	Agua (N)	Redox	3-5 wt	C
		Metales (N)		NA	C
		Hidruros metálicos (N)		NA	C/N
		Hidruros a base de gas (N)		NA	C
Radiolisis	Radiación	Hidróxidos metálicos (N)	Radiolisis	NA	C
		Peróxido de hidrógeno (HCO ₂) y-radiólisis			

Este trabajo se enfoca en la producción de hidrogeno verde mediante electrolisis del agua, usando paneles solares fotovoltaicos que brindan la corriente necesaria para realizar la electrolisis y colectores solares térmicos, donde después se evalúa si el uso de estos afecta realmente la producción de hidrogeno al incrementar la temperatura del agua que entra al electrolizador en donde ocurrirá dicho proceso.

En la sección de marco conceptual, se define el proceso de electrolisis del agua, se presenta la teoría de los tres modelos utilizados (modulo fotovoltaico, colector solar y electrolizador) que permitirán crear un modelo hibrido conjunto de los tres para poder evaluar el objetivo principal de este trabajo.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Electrolisis

La electrolisis del agua es un método para producir hidrogeno con una pureza y eficiencia altas [10]. Este proceso es posible gracias al continuo movimiento de electrones a través de un circuito externo el cual permite la separación de una molécula por medio de la electricidad. En el ánodo se liberan electrones (una oxidación) y en el cátodo se capturan electrones (una reducción). Para que el proceso funcione se debe someter el agua a una corriente mínima que genere la reacción espontanea. La energía transmitida al proceso puede ser calculada por medio de la variación de la energía libre de Gibbs descrita en la ecuación (1).

$$dG = \sum d(\mu_i \eta_i) - s dT + v dP \quad (1)$$

Donde: μ_i es el potencial químico del compuesto "i" cuyo número de moles es η_i , s es la entropía y v es el volumen. Los elementos compuestos en la electrolisis son H₂O, H₂, O₂. La electrolisis ocurre a temperatura y presión constante, así que la energía que se transmite a la reacción se presenta en la ecuación (2) [10].

$$dG = \sum d(\mu_i \eta_i) \quad (2)$$

El equilibrio de la energía libre de Gibbs de la reacción se ve influenciada por la constante de equilibrio de la reacción. Todas las reacciones tienden al equilibrio químico, es decir, que la velocidad de la reacción tanto hacia adelante como hacia atrás es la misma, ya que las reacciones químicas pueden darse en ambos sentidos. La constante de equilibrio permite determinar si una reacción tiene una concentración más alta de productos o de reactivos en el estado de equilibrio o para determinar si la reacción se encuentra en equilibrio o no. La constante de equilibrio de la reacción se calcula usando la ecuación (3).

$$K_{eq} = e^{\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right)} = e^{\left(\frac{-\Delta\mu_{el}}{RT}\right)} \quad (3)$$

Donde: R es la constante ideal del gas y T es la temperatura del proceso, $\Delta\mu_{el}$ es el potencial electroquímico y ΔG es el cambio en la energía libre de Gibbs. La constante de equilibrio de la reacción está relacionada con la velocidad de la reacción, hacia adelante (K_f) y hacia atrás (K_b) y se puede encontrar usando la ecuación (4).

$$k_f = k_b K_{eq} = k_b e^{\left(\frac{-\Delta\mu_{el}}{RT}\right)} \quad (4)$$

La velocidad de la reacción k_f es una función de la variación del potencial electroquímico por ende se puede definir también usando la ecuación (5).

$$k_f = k_b (\Delta\mu_{el}) \quad (5)$$

Existen dos procesos para realizar la electrolisis del agua, los cuales son: el proceso alcalino y el proceso llamado Proton Exchange Membrane (PEM).

2.1.1 Proceso alcalino

Los electrolizadores alcalinos usan una solución caustica acuosa de 25 %- 30% KOH como electrolito. Se utiliza una celda compuesta por dos electrodos separados por un diafragma usado para evitar la recombinación del hidrogeno y oxigeno producidos. El hidrogeno se produce en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. Uno de los mayores problemas del proceso alcalino es que usa soluciones corrosivas lo que implica que los costos aumenten ya que los electrodos tienden a deteriorarse más rápido. El transporte de iones se da por hidroxilos OH^- . [11]

2.1.2 Proton Exchange Membrane (PEM)

Los electrolizadores tipo PEM utilizan una celda compuesta por dos electrodos separados por una membrana normalmente hecha de Nafion la cual actúa como electrolito [12][13]. De manera similar, el hidrogeno se produce en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. En este caso, el transporte de iones se da por protones H^+ . Los electrolizadores tipo PEM tienen cierta ventaja con respecto a los electrolizadores alcalinos ya que son ambientalmente más limpios, tienen menor tamaño, hay una mayor pureza de hidrogeno producido, bajo consumo de potencia eléctrica, control a variaciones de potencia eléctrica, fácil reparación y mantenimiento, entre otras. La principal desventaja del electrolizador tipo PEM es su costo inicial ya que los materiales con los que está construido son bastante costosos lo que hace que esta tecnología sea más costosa que el electrolizador alcalino. [11]

En la tabla 3 se muestra un resumen de ambos procesos.

Tabla 3: Parámetros de celdas típicas de electrolisis del agua. Adaptado de [10]

Proceso de electrolisis	Electrolito	Transporte de iones	Reacción anódica	Reacción del cátodo	Densidad de corriente A/cm ²
Alkaline	KOH 25-30% ag o NaOH, NaCl	Hidroxilo OH-	$4\text{OH}_{\text{aq}} \rightarrow \text{O}_{2(\text{L})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{L})}$	$2\text{H}_2\text{O}_{(\text{L})} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})} + 2\text{OH}_{(\text{aq})}^-$	0.1-0.4
PEM	Polímero (NAFION)	Protones H +	$2\text{H}_2\text{O}_{(\text{L})} \rightarrow 4\text{H}_{(\text{aq})}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_{2(\text{g})}$	$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_{2(\text{g})}$	>1.6

Dos de los parámetros más importantes para ambos procesos son la eficiencia del proceso y la densidad de la corriente, pues en estos parámetros se marca una gran diferencia entre el electrolizador alcalino y el electrolizador tipo PEM. La eficiencia de las celdas de electrolisis está definida por la energía ideal y la energía necesaria para realizar la reacción. Desde la termodinámica se define la entalpia de la división de la molécula de agua la cual es igual a la entalpia del agua líquida que tiene un valor de: $\Delta H = 285.813 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$. Parte de esta entalpia se puede proporcionar de manera térmica a la temperatura de la reacción en forma de incremento de entropía (ver ecuación (6))[10].

$$\Delta Q = T \cdot \Delta S \quad (6)$$

Donde ΔQ es el cambio del calor, T es la temperatura y ΔS es el cambio de la entropía. A valores de presión y temperatura estándar (101 kPa y 25°C respectivamente) ese valor es: $\Delta Q = 48.689 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ y la parte restante, es decir $\Delta G = \Delta H - \Delta Q$, donde ΔG es la energía libre de Gibbs del proceso y esto representa la energía eléctrica mínima necesaria que se debe suministrar para que ocurra la reacción. Para condiciones estándar, la variación de la energía libre de Gibbs es: $\Delta G = 237.124 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 2.458 \text{ eV}$. Son necesarios dos electrones para un mol de hidrogeno, así que el potencial reversible aplicado a condiciones estándar se calcula con la ecuación (7) [10].

$$V_{rev} = \frac{2.458}{2} = 1.23 \text{ V} \quad (7)$$

De las dos tecnologías anteriormente expuestas, se elige el PEM para producir hidrogeno gracias a las ventajas mencionadas con respecto al electrolizador alcalino, ya que este trabajo es con fines académicos y el costo inicial de la tecnología no es relevante para el objetivo propuesto. A continuación, se explicará más a fondo su funcionamiento.

2.2 Modelo electrolizador: Proton Exchange Membrane (PEM)

Este es uno de los procesos más favorables para la producción de hidrogeno mediante el uso de fuentes renovables. Como se mencionó anteriormente, este electrolizador consta de dos electrodos (un cátodo y un ánodo) en los cuales se producen el hidrogeno y el oxígeno respectivamente. Estos están separados por una membrana la cual actúa como electrolito. Algunas ventajas de este proceso es que tiene una alta densidad de corriente, diseños compactos (de manera que se reduzca el tamaño sin afectar la eficiencia), alta eficiencia, respuesta rápida, es “limpia”, opera a temperaturas relativamente bajas (20-80 °C) y produce hidrogeno ultrapuro. [14]

En el estado del arte de la tecnología PEM hay una gran actividad en investigaciones acerca de cómo ha sido la evolución de la reacción de hidrogeno en el cátodo usando metales nobles como el Pt/Pd. También existen diversas investigaciones de la evolución de la reacción de oxígeno en el ánodo usando metales como IrO₂/RuO₂. El uso de estos metales para los electrodos hace que esta tecnología sea más costosa comparada con el electrolizador alcalino. El principal reto de los PEM es reducir los costos sin reducir la eficiencia del proceso. [11][12][15]

El principio de la electrolisis por medio del PEM se basa en separar la molécula de agua en hidrogeno y oxígeno en sus respectivos electrodos, el hidrogeno en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. Para que se dé la electrolisis, se debe bombear agua al ánodo, donde esta es dividida en Oxígeno (O₂), protones (H⁺) y electrones (e⁻). Estos protones viajan a través de una membrana conductora hacia el cátodo. Los electrones salen del ánodo por medio del circuito de alimentación externo el cual proporciona la diferencia de potencial necesario para la reacción. En el cátodo, se da una recombinación de los protones y electrones para producir el hidrogeno. En la figura 3, se muestra el proceso anteriormente descrito [14].

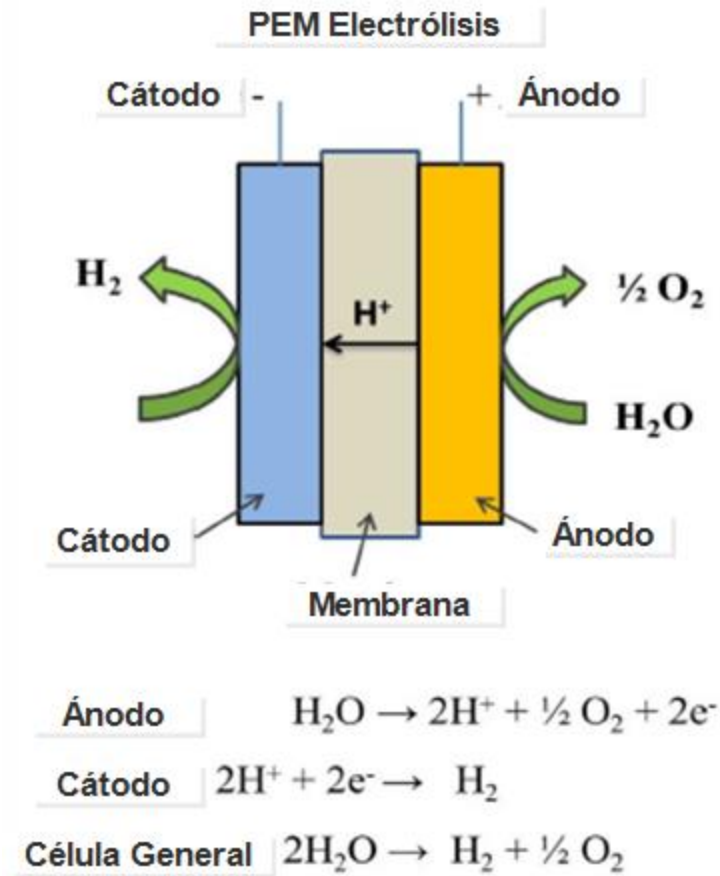


Figura 3: Diagrama del proceso de electrolisis del agua. Adaptado de [14]

2.3 Termodinámica del proceso

Para que se dé la reacción que permite dividir la molécula de agua en hidrogeno y oxígeno, se requiere una energía mínima la cual puede ser calculada con la energía libre de Gibbs (ΔG). Para condiciones estándar, esta energía se puede calcular usando la ecuación (8) [16]

$$\Delta G = nFE_{rev} \quad (8)$$

Donde:

n = número de electrones envueltos

F= constante de Faraday $\rightarrow F = 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$

E_{rev} = voltaje reversible

El voltaje reversible puede ser calculado con la ecuación (9) [16].

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} = 1.23 \text{ V} \quad (9)$$

Donde, ΔG es la variación en la energía libre de Gibbs, F es la constante de Faraday y n es el número de electrones.

Anteriormente fue definido que, bajo condiciones estándar de presión y temperatura, el cambio de la entalpia del agua es $\Delta H = 285.813 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ y el cambio de la energía libre de Gibbs es $\Delta G = 237.124 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ por ende el voltaje mínimo requerido para la electrolisis del agua se calcula con la ecuación (10) [16].

$$V_{TN} = \frac{\Delta H}{nF} = \frac{\Delta G}{nF} + \frac{T\Delta S}{nF} = 1.48 \text{ V} \quad (10)$$

Donde,

V_{TN} = voltaje termo-neutro

ΔS = cambio de entropía

T= temperatura

La eficiencia de la electrolisis del agua normalmente se calcula con el valor del límite superior de calor del hidrogeno. Dado a que el agua del proceso es suministrada en fase líquida, la eficiencia del proceso se puede calcular con la ecuación (11)[16].

$$\eta = \frac{V_{TN}}{V_{cell}} \quad (11)$$

Donde,

V_{TN} = voltaje termo – neutro

V_{cell} = voltaje de la celda

Para el cálculo del V_{cell} se emplea la ecuación (12) [16].

$$V_{cell} = V_{rev} + n_{act} + n_{ohm} + n_{con} \quad (12)$$

Donde n_{act} , n_{ohm} y n_{con} son el potencial de activación, potencial óhmico y el potencial de concentración, respectivamente. Anteriormente en la ecuación (9) se calculó el voltaje reversible que es el primer término de la ecuación para calcular el voltaje de la celda. Para el cálculo de los demás potenciales, se deben emplear las ecuaciones presentadas en las siguientes secciones.

2.3.1 Potencial de activación

Este representa el potencial necesario para comenzar la transferencia de los protones y la cinética electromecánica y su comportamiento dentro del electrolizador tipo PEM. El potencial de activación puede ser modelado usando la expresión de Butler-Volmer (ecuación (13)). [16]

$$n_{act} = n_{act,a} + n_{act,c} \quad (13)$$

Donde,

$$n_{act,a} = \frac{R.T}{\alpha_a \cdot z \cdot F} \cdot \log\left(\frac{i_d}{i_{0a}}\right) \quad (14)$$

$$n_{act,c} = \frac{R.T}{\alpha_c \cdot z \cdot F} \cdot \log\left(\frac{i_d}{i_{0c}}\right) \quad (15)$$

Para este estudio se asume que el material del cátodo y el ánodo serán *Pt* y *Pt-Ir* respectivamente teniendo así una densidad de corriente de intercambio en el cátodo $i_{0c} = 1 \times 10^{-3} \frac{A}{cm^2}$ y una densidad de corriente de intercambio en el ánodo $i_{0a} = 1 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2}$, valores los cuales fueron tomados de [15].

$$R = 8.314 \frac{J}{K \cdot mol}$$

Z es el coeficiente estequiométrico referido al número de electrones $\rightarrow Z = 2$

$\alpha_a = 0.5 \rightarrow$ coeficiente de carga transferida

$\alpha_c = 0.5 \rightarrow$ coeficiente de carga transferida

$i_d =$ densidad de corriente

$i_{0a} =$ densidad de corriente de intercambio en el ánodo

$i_{0c} =$ densidad de corriente de intercambio en el cátodo

$F =$ constante de Faraday

El coeficiente estequiométrico Z y los coeficientes de carga transferida tanto para el cátodo como para el ánodo fueron tomados de [16].

2.3.2 Potencial Óhmico

Este es la resistencia entre el flujo de electrones y la resistencia electrónica del electrolizador tipo PEM. Esta resistencia depende del tipo de PEM y del material del electrodo. Cabe destacar que el potencial óhmico es linealmente proporcional a la corriente. El potencial de la membrana puede ser expresado en función de su espesor ϕ (cm), la conductividad de la membrana δ_{mem} y i . Donde $\phi = 178 \mu m$ para la

membrana de Nafion a utilizar el cual es un valor estándar [15]. Para el cálculo del potencial de la membrana se debe usar la ecuación (16).

$$n_{ohm,mem} = R_{ion} \cdot i \quad (16)$$

Donde $R_{ion} = \frac{\phi}{\delta_{mem}}$ y equivale a la resistencia iónica. La conductividad iónica local con contenido de agua y temperatura puede ser expresada con ecuación (17).

$$\delta_{mem} = (0.005139\lambda - 0.00326) \cdot \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (17)$$

Donde λ es el grado de humidificación de la membrana y puede ser definida con la ecuación (18).

$$\lambda = 0.08533 T - 6.77632 \quad (18)$$

El potencial electrónico puede ser expresado con la ecuación (19).

$$n_{ohm,ele} = R_{ele} \cdot i \quad (19)$$

La Resistencia óhmica de los materiales electrónicos, puede ser expresada como una función de la resistividad del material ρ (Ωm), la longitud que recorren los electrones l y el área transversal del conductor A_c , y se calcula usando la ecuación (20).

$$R_{ele} = \frac{\rho \cdot l}{A_c} \quad (20)$$

El material de la membrana que se va a utilizar en el estudio del electrolizador es de fluoro polímero, específicamente Nafion ya que es un material común en este tipo de tecnología [11]. La resistividad es el inverso de la conductividad por ende $\rho = \frac{1}{\delta_{mem}}$. Las dimensiones de la membrana serán supuestas ya que el dimensionamiento del electrolizador esta por fuera de los alcances de este trabajo: $L=10 \text{ cm}^2$ y $H=20 \text{ cm}^2$ para obtener una area transversal $A_c = 0.02 \text{ m}^2$.

Finalmente, el potencial óhmico puede ser expresado empleando la ecuación (21) [16].

$$n_{ohm} = n_{ohm,mem} + n_{ohm,ele} \quad (21)$$

2.3.3 Potencial de concentración

El potencial de concentración es causado por procesos de transporte de masa (normalmente de difusión y convección) [12]. En el caso de la electrolisis del agua, la mayor influencia se da por las limitaciones del transporte del producto; si H_2 y O_2 no se remueven tan rápido como se producen, su concentración en la reacción aumentara lentamente la cinética de la reacción. Esto se da cuando n_{con} es mucho menor que n_{ohm} y n_{act} , por esta razón, muchos autores toman $n_{con} = 0$ en sus estudios. [16]

Además, al operar a altas temperaturas y bajas densidades de corriente, el término del potencial de concentración se puede despreciar, especialmente al usar densidades de corriente por debajo de $1.6 \frac{A}{cm^2}$ y temperaturas mayores a los 30 ° C [17].

El potencial de concentración es estimado con la ecuación de Nernst (22). [16]

$$n_{con} = n_{con,a} + n_{con,c} \quad (22)$$

Donde, el potencial de concentración en el cátodo se calcula con la ecuación (23) y el potencial de concentración en ánodo se calcula empleando la ecuación (24).

$$n_{con,a} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{C_{O_2,mem}}{C_{O_2,mem,0}} \right) \quad (23)$$

$$n_{con,c} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{C_{H_2,mem}}{C_{H_2,mem,0}} \right) \quad (24)$$

Donde $C_{O_2,mem}$ y $C_{H_2,mem}$ son la concentración de oxígeno e hidrogeno en la interfaz entre la membrana y el electrodo respectivamente. Para este estudio, el potencial de concentración no será tomado en cuenta, ya que las densidades de corrientes son menores a $1.6 \frac{A}{cm^2}$ que, en el caso de un electrolizador tipo PEM, genera que el potencial pueda ser despreciado [16], [18], [17]. En la figura 4 se presenta el circuito equivalente del electrolizador tipo PEM. [16]

Finalmente, para conocer la potencia de la celda se utiliza ecuación (25) [16].

$$P_{cell} = V_{cell} * I_{cell} \quad (25)$$

Donde, V_{cell} es el voltaje de la celda y I_{cell} es la corriente de la celda.

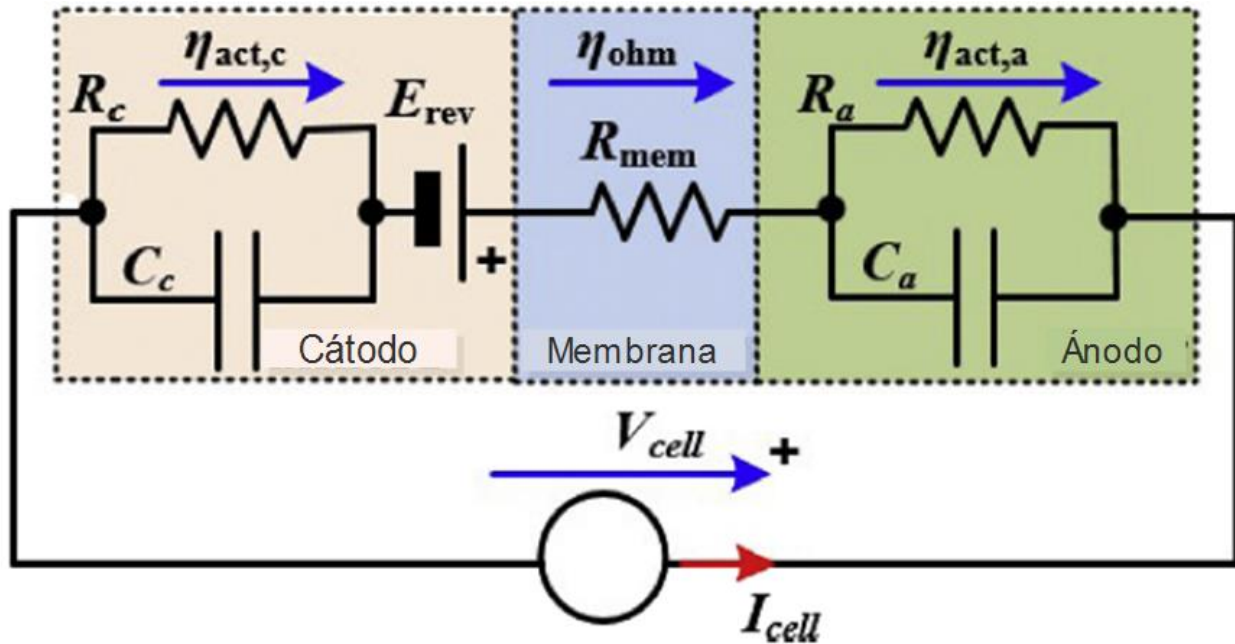


Figura 4: Circuito eléctrico de un electrolizador tipo PEM. Adaptado de [16]

2.3.4 Eficiencia de Faraday

La eficiencia de Faraday se puede definir como la proporción entre el volumen de hidrógeno experimental y el volumen de hidrógeno teórico calculado, se puede estimar por medio de la ecuación (26).

$$\eta_{faraday} = \frac{V_{H_2}(\text{producido})}{V_{H_2}(\text{calculado})} \quad (26)$$

El volumen teórico de gas puede ser calculado con la segunda ley de Faraday, basada en la densidad de corriente. Se asume que el tiempo de la electrolisis y el área del electrodo tienen una eficiencia de Faraday del 100% como se muestra en la ecuación(27) [14].

$$V_{H_2} = V_M(L) \left(\frac{10^3 ml}{L} \right) \left(\frac{t(60s)}{\text{min}} \right) \left(\frac{I \left(\frac{C}{S} \right)}{2F(C)} \right) \quad (27)$$

Donde,

V_{H_2} = producción de hidrogeno teórico

V_M = volumen de gas ideal

R= constante ideal del gas $\rightarrow R = 0.0821 \frac{atm}{K.mol}$

T= temperatura (K)

P= presión (atm)

t = tiempo (s)

I= corriente aplicada (A)

F= constante de Faraday

A continuación, en la figura 5, se muestra el diagrama lógico empleado para resolver el modelo del electrolizador.

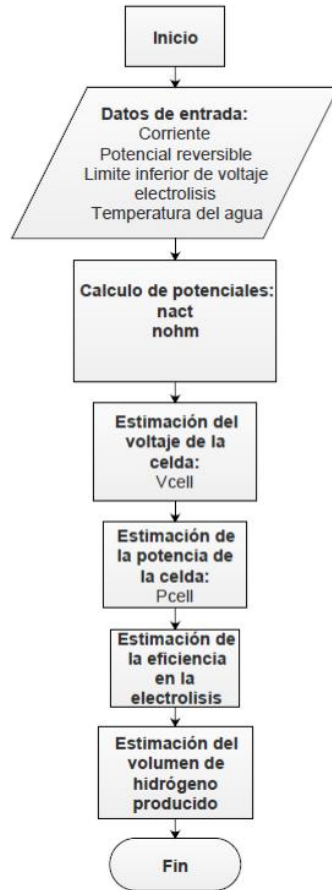


Figura 5: Diagrama lógico electrolizador

En una primera instancia se resolvió el modelo del electrolizador usando una sola corriente de entrada y obteniendo un solo valor de flujo volumétrico de H_2 con el fin de demostrar que el modelo utilizado para el electrolizador funciona de manera correcta, para luego adaptarlo al modelo híbrido el cual se presenta más adelante.

2.4 Modelo sistema solar fotovoltaico PV

Gracias a los avances en los sistemas de generación de energía mediante el uso de energías renovables, la producción de hidrogeno verde ha tomado fuerza, lo cual permite intuir que, en un futuro cercano, la producción de este usando energías no convencionales podrá ser viable y competitivo.

Uno de los caminos hasta ahora más sustentable para la producción de hidrogeno es usando un sistema que acopla módulos fotovoltaicos (PV), el electrolizador y baterías. Existen varios reportes acerca de la

producción de hidrogeno verde pero muy pocos sobre el diseño de los componentes del sistema de producción basado en simulaciones rigurosas. [7]

En este estudio, se presenta el marco conceptual del sistema fotovoltaico aislado que se acopla al sistema de producción de hidrogeno que es el encargado de generar la corriente necesaria para que la molécula de agua (H₂O) pueda separarse en hidrogeno (H₂) y oxigeno (O₂).

Para desarrollar el modelo o diseño de un sistema fotovoltaico se debe conocer el potencial de la radiación solar disponible en el lugar donde se realizará la instalación. La radiación solar se convierte en energía eléctrica usando módulos fotovoltaicos. Los niveles de energía generada dependen, de la temperatura, la radiación solar incidente, la eficiencia de los módulos.

Las celdas fotovoltaicas pueden ser simuladas como un circuito equivalente, representado con una fuente de corriente (I_L) en paralelo con un diodo más una resistencia interna de la celda (R_{sh}) y una resistencia en serie (R_s), como se puede ver a continuación en la figura 6. [7] [19]

La corriente de salida de la celda depende de la radiación solar incidente como se puede ver en la ecuación (28).

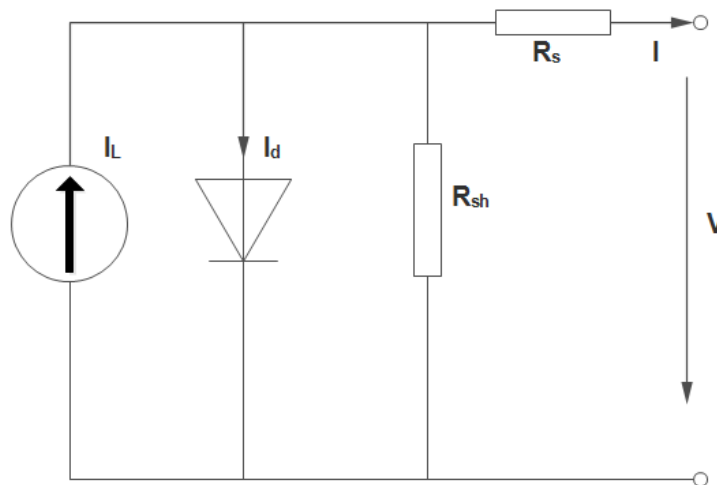


Figura 6: Circuito equivalente de las celdas fotovoltaicas. Adaptado de [19]

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot N_s \cdot V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (28)$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada, I_0 es la corriente de saturación de la celda, V_{th} es el voltaje térmico: $V_{th} = \frac{k}{q \cdot T_m}$ donde $V_{th} = 0,0257 V$ a $T_{m,0} = 298 K$ [19], N_s es el número de celdas en serie por

módulo, n es el factor de idealidad que toma valores entre 1 y 2, R_s es la resistencia en serie de la celda fotovoltaica y R_{sh} es la resistencia shunt interna de la celda. [7]

$$I_L = \frac{I_{sc}(R_s + R_{sh})}{R_{sh}} \quad (29)$$

$$I_0 = \left(\frac{I_{sc}(R_s + R_{sh}) - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{nN_a V_{th}}} \quad (30)$$

Se deben tener en cuenta los parámetros de los módulos que se vayan a usar en la instalación, algunos de estos son el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje máximo (V_m) y la corriente (I_m), así como los coeficientes de temperatura. En este estudio se usa el método de Carrero et al [19]. para calcular los parámetros que no vienen de fábrica como: $n_0 = 1.41$, $R_{s,0} = 935 \Omega$, $G_0 = 1000 \frac{W}{m^2}$ y $T_{m,0} = 25^\circ C$. [7][19]

La temperatura del módulo o de la celda solar depende de la radiación (G) y de la temperatura ambiente (T_a). La ecuación (31) permite estimar la temperatura de operación del módulo a una temperatura determinada [7].

$$T_m = \frac{T_a + G(T_{NOCT} - 20)}{800} * g \quad (31)$$

Donde T_{NOCT} es la temperatura de operación de la celda a condiciones estándar de $800 \frac{W}{m^2}$, $25^\circ C$ y velocidad del viento de $1 \frac{m}{s}$, G es la radiación incidente en el módulo y T_a es la temperatura del aire ambiente a la que se quiere calcular la temperatura del módulo fotovoltaico.

En la tabla 5 se muestran los valores de los parámetros de interés que pertenecen al módulo Shell SQ150-PC monocristalino de 72 celdas en serie con área de $1.32 m^2$ y potencia de $150 W$ ($34 V$) además de las curvas I-V del módulo en la figura 6.:

Tabla 4: Parámetros del módulo fotovoltaico. Adaptado de [7]

$V_{m,0}$	34 V
$I_{m,0}$	4.4 A
$V_{oc,0}$	43.4V
α_{Voc}	161 mV/°C
$I_{sc,0}$	4.8 A
α_{Isc}	1.4 mA/°C
T_{NOCT}	46 °C

Donde $V_{m,0}$ es el máximo voltaje del módulo fotovoltaico a condiciones estándar, $I_{m,0}$ es la corriente máxima a condiciones estándar, $V_{oc,0}$ es el voltaje de circuito abierto a condiciones estándar, α_{Voc} es el

coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito abierto, αI_{sc} es el coeficiente de temperatura para la corriente de corto circuito, $I_{sc,0}$ corriente de corto circuito a condiciones estándar y NOCT es la temperatura de operación nominal de la celda fotovoltaica.

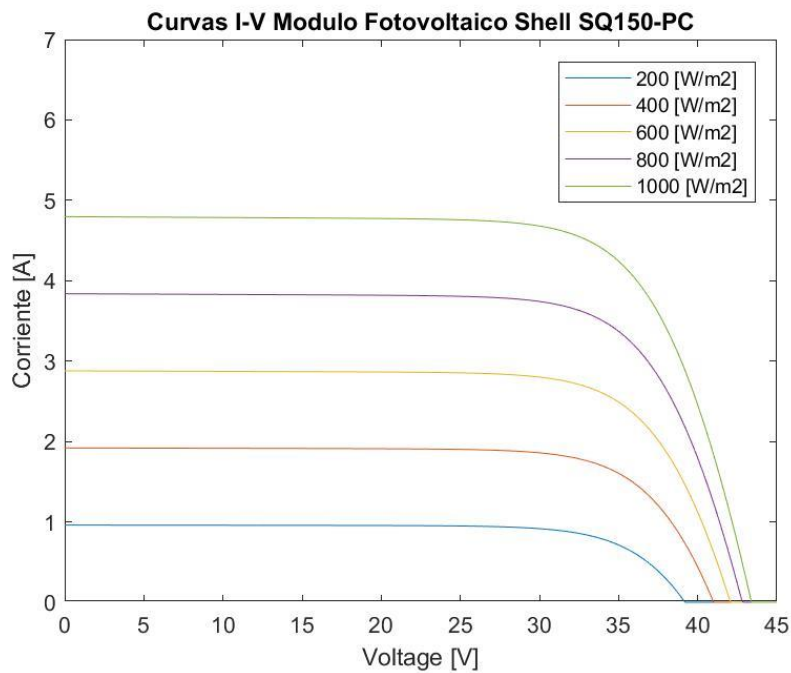


Figura 7: Curvas I-V modulo Shell SQ150-PC

Las curvas I-V son características de cada módulo solar fotovoltaico y también es llamada curva de intensidad-voltaje. Esta curva representa los valores de tensión y corriente de un módulo en específico sometido a unas condiciones determinadas de radiación solar incidente y temperatura. En este caso la curva fue construida usando diferentes valores de radiación solar incidente y tomando una temperatura ambiente de 25° C. Esta grafica permite determinar el correcto funcionamiento del módulo solar fotovoltaico y conocer el máximo punto de potencia el cual representa la máxima potencia que se puede generar.

Las ecuaciones que describen como cambian los parámetros con la radiación solar (G) y la temperatura del modulo (T_m) fueron tomadas de [7].

$$I_L = I_{sc,0} \left(\frac{G}{G_0} + \alpha_{I_{sc}} (T_m - T_{m,0}) \right) \quad (32)$$

$$V_{oc} = V_{oc,0} \left(1 + \alpha_{V_{oc}} (T_m - T_{m,0}) \right) + n N_s V_{th} \ln \left(\frac{G}{G_0} \right) \quad (33)$$

$$R_{sh} = R_{sh,0} \cdot \frac{G_0}{G} \quad (34)$$

$$R_s = \frac{R_{s,0} T_m}{T_{m,0}} \cdot \left(1 - 0.217 \cdot \ln \left(\frac{G}{G_0} \right) \right) \quad (35)$$

$$n = n_0 \cdot T_{m,0} / T_m \quad (36)$$

Las ecuaciones anteriormente descritas tienen el objetivo de simular el comportamiento del módulo fotovoltaico dependiendo de la radiación incidente para conocer la corriente que este nos puede entregar, la cual será una variable de entrada para el modelo del electrolizador. Esta corriente será la que brindará la energía necesaria para que se dé el proceso de electrolisis del agua y poder separar su molécula obteniendo finalmente hidrogeno. Donde I_L es la corriente fotogenerada, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, R_{sh} es la resistencia shunt interna de la celda, R_s es la resistencia en serie de la celda fotovoltaica y n es el factor ideal de la celda fotovoltaica.

A continuación, en la figura 8, se muestra el diagrama lógico empleado para resolver el modelo del módulo fotovoltaico.

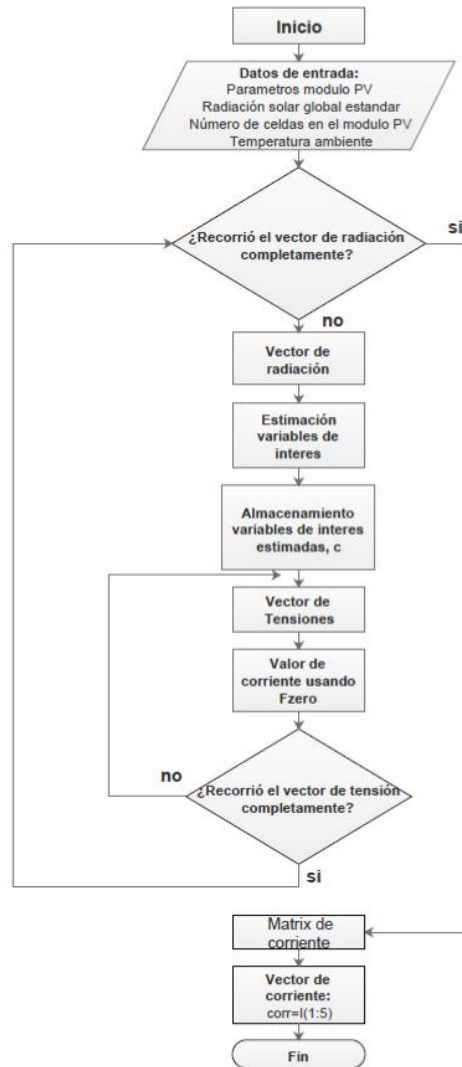


Figura 8: Diagrama lógico Modulo PV

En principal objetivo de solucionar el modelo del módulo fotovoltaico es para estimar el valor de corriente que puede proporcionar, para este fin se usaron las ecuaciones (28) hasta la (36). En primera instancia se evaluó con una sola radiación incidente y luego se optó por construir un vector de radiaciones incidentes para evaluar como variaba el valor de la corriente de salida con el fin de simular el sistema a diferentes condiciones de operación.

2.5 Modelo colector solar

En esta sección se muestra el análisis de la tecnología de energía solar térmica; se propone usar un colector solar en el sistema a modelar para que el agua que entra al electrolizador tenga una temperatura mayor a la temperatura ambiente. Con la implementación del colector solar se busca evaluar cómo se comporta la producción de hidrogeno cuando el agua que ingresa al electrolizador está a una

temperatura mayor y comparar cómo se comporta la producción de hidrogeno si no se usa el colector solar y el agua ingresa a temperatura ambiente.

Existen diversos tipos de colectores solares; los más comunes son los colectores solares de placa plana (FPC), los colectores solares parabólicos (PTC) y las torres solares (CR). Debido a las temperaturas requeridas en el sistema a modelar, se opta por utilizar FPC el cual tiene un rango de operación de temperatura que está entre 30°C y 120°C. Para hacer posible el modelamiento del colector solar, *se utilizó como base el modelo mostrado en el estudio de [20] despreciando el uso del TIM para que sea un FPC básico.* [20]

El TIM hace referencia a materiales aislantes transparentes los cuales son usados en diferentes tipos de colectores solares para aumentar su eficiencia.

El calor que alcanza el fluido de trabajo (q_{FT}) puede ser calculado usando la ecuación (37), donde la energía absorbida por el colector es (q_r) y las pérdidas de calor son (q_{per})

$$q_{FT} = q_r - q_{per} \quad (37)$$

Para colectores tradicionales FPC el q_r puede ser calculado con la ecuación (38).

$$q_r = q_4 \tau_s \alpha \quad (38)$$

Donde τ_s , α son la transmitancia y la absortancia, respectivamente; q_4 es el calor en el nodo 4 del circuito térmico que se muestra a continuación y puede ser calculada de la siguiente manera:

$$q_4 = G_0 A_{ab} C \eta_c \quad (39)$$

Donde G_0 es la radiación pico global que usualmente se toma el valor de $1000 \frac{W}{m^2}$; A_{ab} es el área irradiada proyectada del absorbedor, η_c es la eficiencia de colección y C es la relación de concentración. En este estudio se utiliza un valor de 1 tanto para η_c como para C y un valor de 2 para A_{ab} (suposiciones basadas en el estudio de [20]). En la figura 5 se muestra el circuito térmico del colector solar. [20]

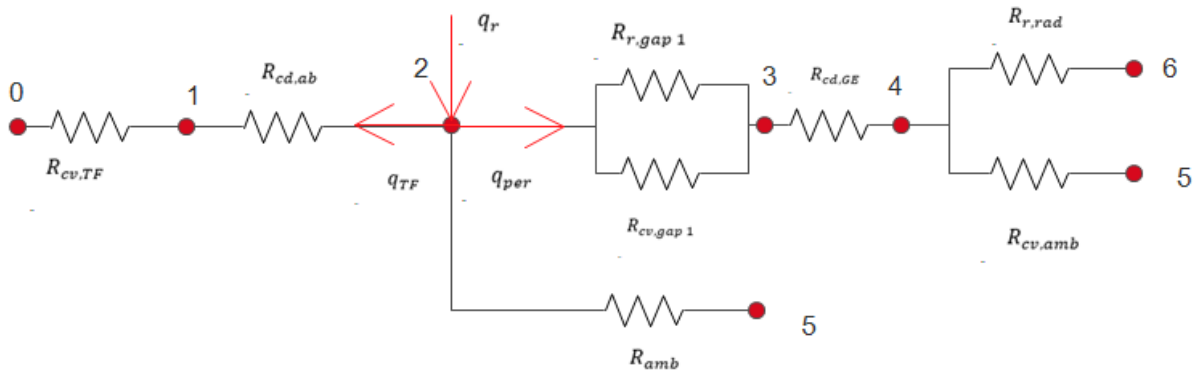


Figura 9: Circuito térmico del colector solar. Adaptado de [14]

Basado en el circuito térmico del colector solar presentado en la figura 5 utilizado para estimar el calor que llega hasta el fluido de trabajo aplicando los conocimientos de transferencia de calor, en donde los nodos son temperaturas en puntos específicos del colector solar y las resistencias dependen del mecanismo de transferencia de calor el cual este actuando, la energía perdida puede ser calculada con la ecuación (40).

$$q_{per} = \frac{T_2 - T_5}{R_{tot}} + \frac{(T_5 - T_6)}{R_{tot} \left(1 + \frac{R_{r,rad}}{R_{cv,amb}}\right)} \quad (40)$$

Donde T_2 y T_5 son la temperatura del absorbedor y la temperatura ambiente respectivamente, R_{tot} [K/W] es la resistencia térmica total efectiva para el circuito, y $R_{r,rad}$ y $R_{cv,amb}$ son las resistencias por la radiación y la convección en el vidrio sobre la superficie externa. El segundo término de la ecuación (40), puede ser despreciado ya que representa menos del 1% de las pérdidas totales de calor en el colector solar. [20]

La temperatura en $T_5 = T_6 - 11$ °K siendo la temperatura efectiva del cielo y T_5 como 298 K. [20]

Usualmente, la diferencia de temperatura entre el cielo y el aire esta entre 278 K y 303 K dependiendo de las condiciones ambientales. A pesar de que el colector solar de placa plana está aislado térmicamente para evitar que el fluido pierda calor, siempre existirán pérdidas con el ambiente. Entre mayor sea la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura del fluido de trabajo, habrá mayores pérdidas de calor, lo que puede afectar la eficiencia de esta tecnología. [20]

Para calcular la eficiencia del colector, se emplea la ecuación (41) [20].

$$\eta_{colec} = \tau_s \alpha - \frac{T_2 - T_5}{G_0 A_{ab} C \eta_c} \quad (41)$$

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran los parámetros y las propiedades térmicas de los colectores que permiten calcular las resistencias del circuito térmico para así obtener la resistencia total del sistema.

Tabla 5: Parámetros dimensionales de colector tipo FPC. Adaptado de [20]

Parámetro	Valor
Colector plano	
Anchura, H (m)	1
Longitud, L (m)	2
Espesor canal de absorción, T_1 (m)	0,02
Espesor pared del absorbedor, $T_2 - T_1$ (mm)	2
Superficie del absorbedor, A_{ab} (m^2)	2
Espacio de aire, $T_4 - T_2$ (mm)	10
Espesor de la placa de vidrio, $T_4 - T_3$ (mm)	3

Tabla 6: Parámetros ópticos y propiedades térmicas para un FPC. Adaptado de [20]

Parámetro	
Absorbedor	
Material	Aluminio
α	0,95
K_{ab} (W/m K)	190
ϵ_{ab}	0,1
Soporte de apoyo	
Material	Lana de cristal
K_{dis} (W/m K)	0,038
A_{dis} (m ²)	2
L_{dis} (m)	0,05
Placa de vidrio (GE)	
K_{Ge} (W/mK)	1,25
τ_s	0,92
ϵ_{Ge}	0,87
Ambiente y brecha	
h_{2-3} (W/m ² K)	5
h_5 (m ²)	20
Sistema de colección	
C	1
η_c	1

Para el cálculo de las resistencias, se utilizan las ecuaciones presentadas en la tabla 7.

Tabla 7: Resistencias colector tipo FPC. Adaptado de [20]

Placa plana	
G ₀	Global
R _{cd,ab}	t ₂ -t ₁ /LHK _{ab}
R _{cv,gap}	1/LHh ₂₋₃
R _{r,gap}	1/LHh _{r,2-3}
R _{amb}	L _{dis} /LHK _{dis}
R _{cd,Ge}	t ₄ -t ₃ /LHK _{Ge}
R _{cv,amb}	1/LHh ₅
R _{r,Rad}	1/LHh _{r,6}

Por último, para el cálculo de la resistencia total (R_{tot}), se emplea la ecuación (42) [20].

$$R_{tot} = \frac{\frac{R_{cv,gap} * R_{rgap}}{R_{cv,gap} + R_{rgap}} + R_{cd,GE} + \frac{R_{cv,amb} * R_{r,rad}}{R_{cv,amb} + R_{r,rad}}}{1 + \frac{1}{R_{amb}} \left(\frac{R_{cv,gap} * R_{rgap}}{R_{cv,gap} + R_{rgap}} + R_{cd,GE} + \frac{R_{cv,amb} * R_{r,rad}}{R_{cv,amb} + R_{r,rad}} \right)} \quad (42)$$

A continuación, en la figura 10, se muestra el diagrama lógico empleado para resolver el modelo del colector solar.

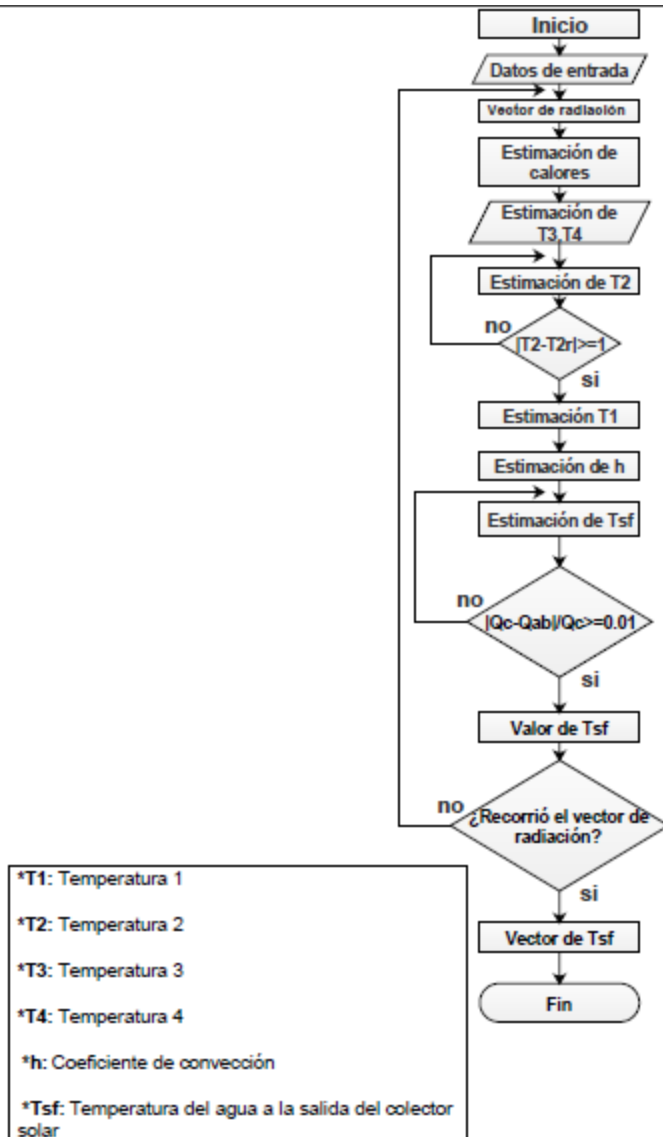


Figura 10: Diagrama lógico colector solar

Para el modelo del colector solar el principal objetivo era conocer la temperatura del agua a la salida del colector para que después se ingrese al electrolizador, la temperatura de salida del colector dependiendo de la radiación solar incidente. Se usó un vector de radiaciones solares incidentes nuevamente para simular diferentes condiciones de operación.

Durante la solución del modelo, se tuvo que recurrir a procesos iterativos para estimar el valor de las temperaturas T_4 y T_2 , que pertenecen al colector solar. Estas temperaturas debían ser estimadas ya que se tenía que conocer el calor que llega hasta el fluido de trabajo (agua) para saber el cambio en su temperatura.

El modelo proporciona un vector de temperaturas del agua a la salida del colector solar, dependiendo de la radiación solar incidente (como se menciona previamente).

2.6 Modelo sistema hibrido

El sistema hibrido consta de módulos fotovoltaicos que brindaran la corriente y el voltaje necesario para la producción de hidrogeno verde mediante la electrolisis del agua, los colectores solares se usan para precalentar el agua a una temperatura que permita el uso de un electrolizador tipo PEM y el mismo electrolizador encargado del proceso de electrolisis.

Gracias a los modelos teóricos presentados anteriormente de cada uno de los tres elementos que componen el sistema hibrido, se pueden obtener las variables de entrada y salida que permiten unificar dichos modelos. Al tener los modelos unificados en uno, se puede evaluar lo que sucede con la producción de hidrogeno verde por medio de electrolisis al utilizar un colector solar para aumentar la temperatura del agua y establecer si verdaderamente esto implica en una ventaja o desventaja del sistema. Se debe identificar cuáles son las variables de entrada de cada uno de ellos y también observar cuál puede ser resuelto con los datos iniciales. Luego de identificar el modelo que puede ser resuelto inicialmente, se deben identificar las variables de salida obtenidas, estas serán las nuevas variables de entrada del siguiente modelo y así sucesivamente hasta llegar a conocer la variable final del modelo que es el volumen de hidrogeno producido y la eficiencia del sistema.

Para el modelamiento del sistema hibrido, se identificaron dos modelos iniciales que se pueden resolver de manera independiente, los cuales son el modelo de los módulos fotovoltaicos y el modelo del colector solar, ambos tienen en común algunas variables de entrada y/o se pueden resolver de manera simultánea. El modelo del electrolizador depende de variables de salida tanto del modelo PV como del modelo del colector solar.

Siguiendo lo anteriormente escrito, la estrategia del modelo hibrido consiste en resolver el modelo fotovoltaico y el modelo del colector solar para así conocer variables como la corriente (I) y el voltaje (V) del sistema que permitan realizar el proceso de electrolisis; así como la temperatura de entrada del agua a la entrada del electrolizador luego de pasar por el colector solar. Estas variables son la entrada para resolver el modelo del electrolizador y poder estimar la producción de hidrogeno como salida del modelo hibrido. Cabe aclarar que algunos valores que permiten resolver las ecuaciones son conocidos y están reportados a lo largo del trabajo. En la figura 5, se ilustra un esquema de cajas el cual permite aclarar de manera visual la lógica de la estrategia empleada.

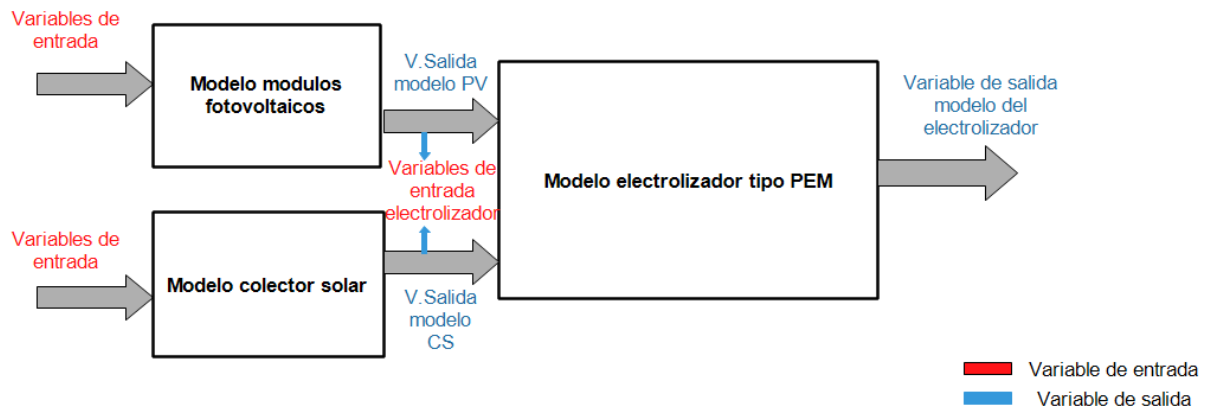


Figura 11: Diagrama de cajas para el modelo híbrido. Elaboración propia

A continuación 12, se muestra el diagrama lógico empleado para resolver el modelo híbrido acoplado.

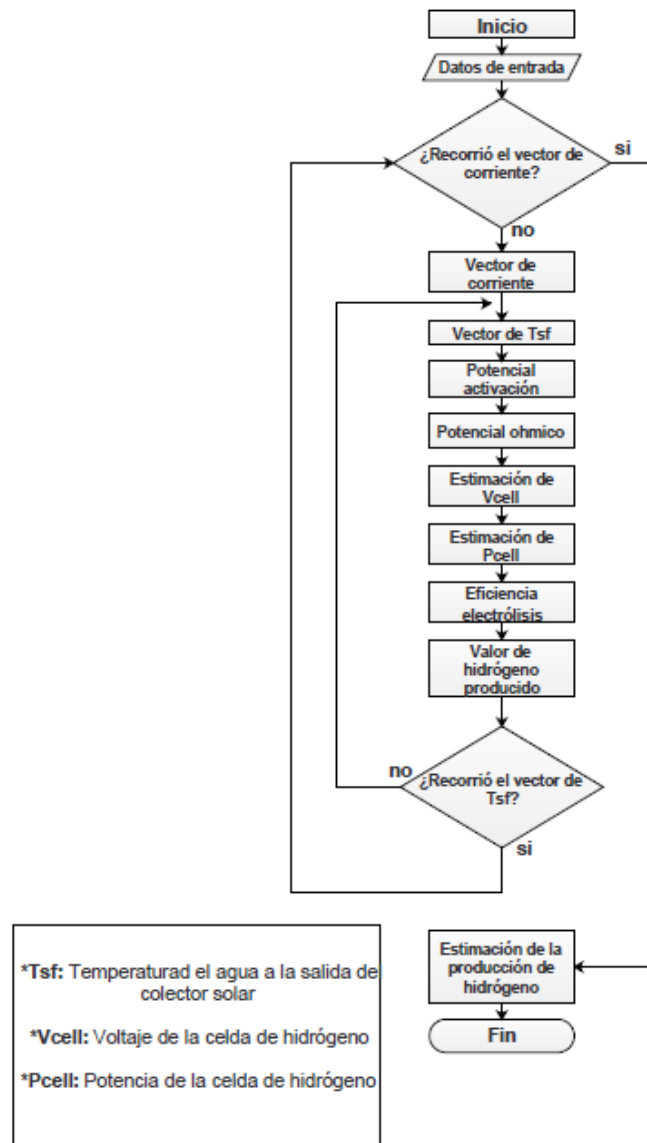


Figura 12: Diagrama lógico modelo híbrido

Para acoplar los modelos anteriormente descritos, se recurrió a variables de entrada y salida que estos tenían en común para poder generar la lógica detrás del código. Basado en la figura 5, se usaron los diferentes valores de corriente generados con el modelo del módulo fotovoltaico junto con el vector de temperaturas del agua generado del modelo del colector solar, para alimentar el modelo del electrolizador y no solo obtener un solo valor de flujo volumétrico de H_2 si no, una matriz de valores. También se tuvo en cuenta la variación de la radiación solar incidente para evaluar cómo se comportaba el sistema bajo diferentes condiciones de operación. Por último, se evaluó la producción de H_2 sin usar el colector solar.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El efecto de utilizar colectores solares para precalentar el agua que posteriormente será electrolizada con el fin de generar hidrogeno verde con módulos, es lo que se presenta en este apartado del trabajo para evaluar si precalentar el agua conlleva a un beneficio en la producción de hidrogeno o simplemente es irrelevante y sería mejor optar por no usar los colectores solares, ya que el cambio en la producción de hidrogeno no es considerable.

Para correr el modelo unificado se hicieron las siguientes suposiciones:

- *La temperatura de la tubería que pasa en serpentín por el colector solar tiene una temperatura constante en todo su recorrido.*
- *El potencial de concentración en este caso es cero.*
- *El calor en el colector solar se distribuye de manera unidimensional*
- *Condiciones ambientes a 25° C y 101 kPa*
- *El colector es tipo “Flate plate” o placa plana*

Para poder evaluar y determinar que tanto influye el uso de colectores solares en la producción de hidrogeno verde mediante el proceso de electrolisis del agua y utilizando módulos fotovoltaicos, se evaluó el sistema bajo diferentes valores de radiación solar, como si se estuviera variando la ubicación del sistema geográficamente, es decir, ¿cómo se desempeña el modelo a diferentes condiciones de radiación solar y esto como afecta la producción de hidrogeno? También se evaluó el cambio de la temperatura de salida del colector para diferentes radiaciones incidentes y, por último, se compara la producción de hidrogeno al usar el colector solar para precalentar el agua y sin el colector solar ingresando el agua al electrolizador a temperatura ambiente.

Para realizar las diferentes simulaciones y obtener las figuras que se presentan a continuación, se usó el software MATLAB.

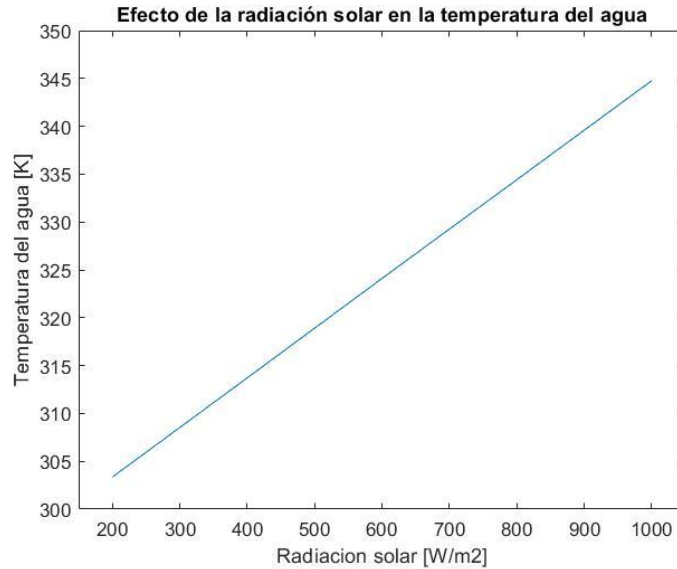


Figura 13: Radiación solar en función de la Temperatura del agua

Se observa en la figura 6, que la temperatura a la salida del colector solar aumenta a medida que aumenta la radiación solar incidente lo cual es un comportamiento esperado ya que, al tener mayor radiación solar, el calor que le llega al fluido de trabajo (en este caso agua) es mayor. El menor valor de radiación empleado es de 200 W/m^2 y el mayor fue de 1000 W/m^2 . La temperatura del agua con la menor radiación fue de unos 303 K y la temperatura aumenta cuando la radiación también lo hace, hasta alcanzar una temperatura de salida del agua de 343 K a 1000 W/m^2 .

Uno de los puntos importante del estudio es evaluar el comportamiento de la producción de hidrogeno a medida que cambia la temperatura del agua que entra al electrolizador como se muestra en la figura 7.

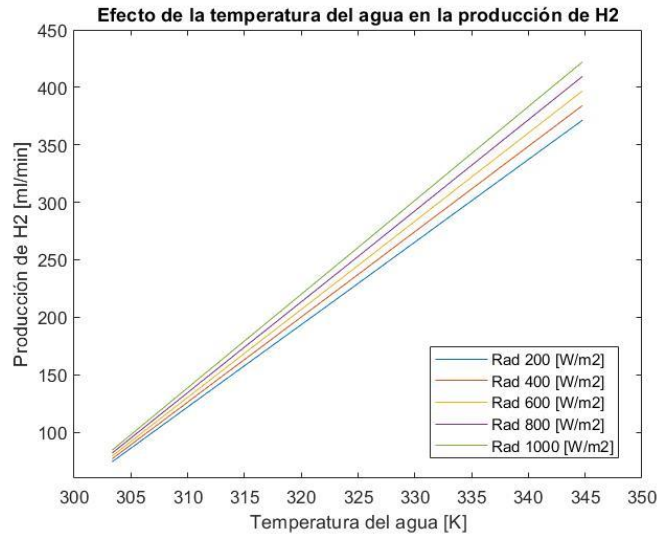


Figura 14: Temperatura del agua en función de la Producción de hidrogeno

Al relacionar y comparar la producción de hidrogeno con la temperatura del agua que se encuentra en el electrolizador, se aprecia que las curvas tienen un comportamiento lineal, aumentando la producción de hidrogeno a la vez que va aumentando la temperatura del agua a la entrada del electrolizador, esto se da porque se incrementa la radiación solar incidente en el sistema. El efecto que tiene aumentar la temperatura del agua en el electrolizador, teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica de la membrana depende de la temperatura, es que haya un aumento en la conductividad, haciendo que la resistencia disminuya y que el voltaje aumente. Este aumento del voltaje hace que la eficiencia de la electrolisis aumente, beneficiando la producción de hidrogeno.

Para estimar la producción de hidrogeno, se utiliza la ecuación del gas ideal para determinar el volumen teórico de gas que se puede obtener. Este valor, al aumentar la temperatura aumenta la cantidad de gas producido, que implica que también aumente la corriente lo que se refleja en que la producción de hidrogeno sea mayor.

También se evaluó cómo se comporta la producción de hidrogeno al usar o no el colector solar, hecho que se refleja en la temperatura del agua a la entrada del electrolizador. En la figura 8 se muestra el comportamiento de la curva que se generó.

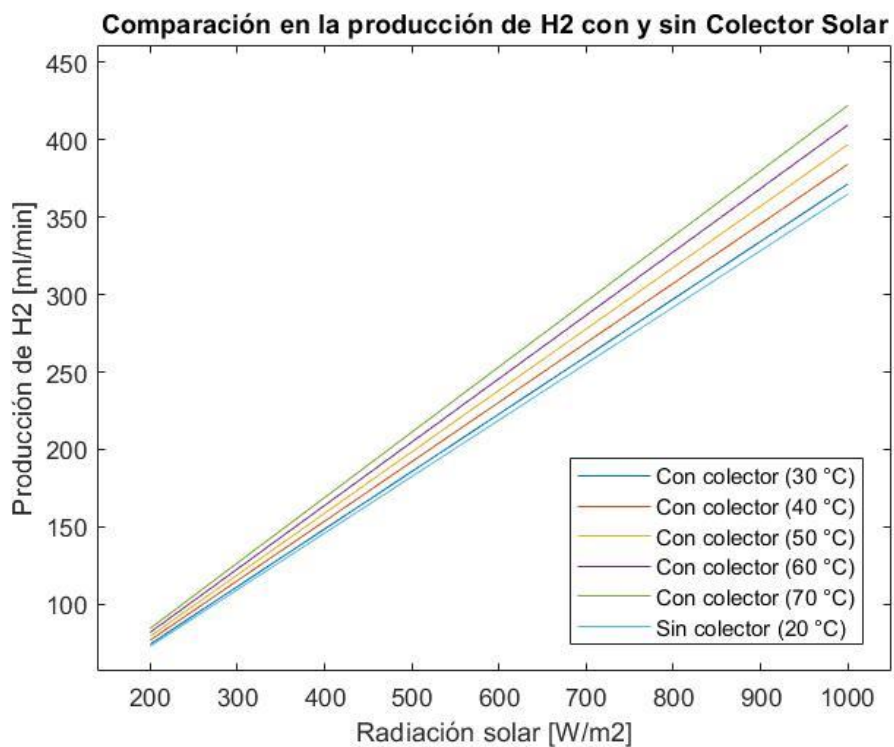


Figura 15: Radiación solar incidente en función de la Producción de hidrogeno

Como se puede observar en la figura 8, al aumentar la radiación incidente, la temperatura del agua a la salida del colector solar será mayor y esto permite que se tenga una producción mayor de hidrogeno.

En la figura 8, todas las curvas, excepto la azul clara (que corresponde a la temperatura del agua a 20°C que representa el comportamiento del sistema sin el colector solar) muestran el comportamiento de la producción usando el colector solar a la temperatura alcanzada por el agua después de pasar por el colector solar. Es evidente que con una radiación de 1000 W/m² y 70°C se alcanza una producción de hidrogeno cercana a los 422 ml/min.

Cuando no se usa el colector solar, la producción de hidrogeno, con una radiación de 1000W/m² y el agua a temperatura ambiente, se alcanza una producción de hidrogeno de alrededor de 365 ml/min, lo que significa que al no usar el colector solar para que precaliente el agua antes de realizar el proceso de electrolisis, la producción de hidrogeno se reduce al menos un 13.5% a estas condiciones de operación.

Del estudio realizado se puede afirmar que este porcentaje no es constante cuando se comparan las diferentes temperaturas en ambos casos (con colector o sin colector solar); es decir, con una radiación solar incidente de 200 W/m², usando el colector solar, el agua alcanza una temperatura de 30°C. Bajo

estas condiciones, la producción de hidrogeno está alrededor de 74 ml/min . La producción sin usar el colector solar es de 73 ml/min lo que significa un aumento del 1.8% usando el colector solar. Este porcentaje va aumentando a medida que la temperatura aumenta, hasta que llega a un máximo de 13.5 % en el caso visto anteriormente.

Cuando se tiene una radiación solar de 400 W/m^2 la diferencia en la producción de hidrogeno al usar el colector solar es un 5% mayor que en el caso de no usar el colector solar.

De igual manera, con una radiación solar de 600 W/m^2 este porcentaje aumenta al 8% y para una radiación de 800 W/m^2 la producción de hidrogeno, al usar un colector solar es 11% mayor si se compara con la producción de hidrogeno sin usar el colector solar.

Como se puede observar en la figura 8, la producción de hidrogeno sin usar el colector solar, es menor para todos los casos evaluados que cuando se usa el colector.

En el estado del arte no se encontró información acerca de sistemas híbridos como el propuesto que permitan comparar los datos generados. Para generar dichos datos y poder evaluar que tanto se acercan los datos generados en este estudio a datos reales, se tendría que construir un modelo a escala para tomar datos reales y realizar las respectivas comparaciones. Esta opción no fue viable ya que no se contaba con los recursos para realizar dicho modelo a escala.

4. CONCLUSIONES

Los temas relacionados al hidrogeno son material de investigación de punta hoy en día, ya que este elemento es visto como una de las soluciones a corto-mediano plazo más prometedoras, buscando suplir los déficits y problemas energético-ambientales que afronta la humanidad. De la mano con lo anterior, la producción de hidrogeno verde es un tema muy extenso e interesante el cual sigue creciendo con el pasar de los días.

En este estudio acerca de la producción de hidrogeno verde usando módulos fotovoltaicos y colectores solares para hacer posible el proceso de electrolisis del agua, se encontraron varios puntos o factores importantes.

Como se vio en el análisis de los resultados, a mayor radiación incidente tanto en los módulos fotovoltaicos y los colectores solares, habrá mayor corriente, mayor temperatura del agua a la salida de los colectores y esto se refleja en una mayor producción de hidrogeno.

Es importante destacar que la producción de hidrogeno al usar colectores solares es mayor en comparación de no usar los colectores, pero esto no significa que en todos los casos sea viable el uso de los colectores ya que, estos agregan costos adicionales a los proyectos los cuales podrían hacerlos inviables económicamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos bajo el gobierno de este modelo, técnicamente se puede pensar en usar colectores solares para aumentar la producción de hidrogeno siempre y cuando la radiación del lugar permita precalentar el agua hasta el punto de que dicha producción sea mayor al 10% con respecto al no usar colectores solares.

Si al usar los colectores solares se obtiene un valor en la producción que no supere el 10% del valor de la producción de hidrogeno sin usar los colectores solares, es preferible realizar una investigación centrándose en encontrar el porcentaje mínimo de incremento en la producción de hidrogeno que haga viable el proyecto económicamente hablando, ya que, el aumento en la producción de hidrogeno puede ser muy poca para realmente considerar los demás factores que implica instalar una tecnología nueva a un sistema.

Basándose en los resultados obtenidos, para las condiciones evaluadas en este modelo, los únicos casos en los que ubicar colectores solares para, de esta manera, aumentar de manera significativa la producción de hidrogeno, se da cuando la radiación incidente supera los $800 W/m^2$.

En los demás casos, es preferible no utilizar los colectores solares a menos que se encuentre el punto mínimo en el cual el porcentaje de aumento en la producción de hidrogeno pueda hacer viable el proyecto, lo cual nos lleva a un analisis económico del sistema, generando así una posible investigación a partir de este estudio, como se mencionó anteriormente. No obstante, el aumento en la producción de hidrogeno al usar colectores solares con bajas radiaciones solares incidentes, implica que no se tenga un aumento en la generación de hidrogeno técnicamente apreciable o considerable.

A partir de este estudio se pueden generar futuras investigaciones que permitan complementar el modelo creado. Dos de estas investigaciones pueden ser:

- Realizar el diseño y construcción del sistema a escala para poder tomar datos reales y calibrar el modelo creado en este estudio mediante comparaciones buscando que el modelo se ajuste lo más aproximado a la realidad.
- Realizar el estudio económico del sistema para determinar con mayor exactitud el porcentaje mínimo de aumento en la producción de hidrogeno usando colectores solares que permita que el proyecto sea viable económicamente hablando, buscando así, tener un criterio más sólido a la hora de tomar una decisión con respecto al usar o no colectores solares en estos tipos de sistemas.

El objetivo principal del trabajo fue satisfactoriamente cumplido ya que se evaluó como era el comportamiento de la producción de hidrogeno simulando diferentes condiciones de operación usando diferentes radiaciones solares incidentes además de evaluar el impacto que tiene el uso de tecnologías como los colectores solares en dicha producción y determinar si a primera instancia es posible considerar su uso en estos sistemas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847–3869, 2020.
- [2] J. J. Siirola, "Speculations on global energy demand and supply going forward," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 5, pp. 96–100, 2014.
- [3] "1 . 1 Historical Context and Relationship Between Energy."
- [4] M. Estrada, "Cambio Climático Global, causa y consecuencias," *Rev. Inf. y análisis*, vol. 01, no. 16, pp. 7–17, 2001.
- [5] W. Mroziak, M. A. Rajaeifar, O. Heidrich, and P. Christensen, "Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries," *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 12, pp. 6099–6121, 2021.
- [6] A. Buttler and H. Spliethoff, "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. February, pp. 2440–2454, 2018.
- [7] F. Gutiérrez-Martín, L. Amodio, and M. Pagano, "Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29038–29048, 2021.
- [8] C. Wulf, P. Zapp, and A. Schreiber, "Review of Power-to-X Demonstration Projects in Europe," *Front. Energy Res.*, vol. 8, no. September, pp. 1–12, 2020.
- [9] M. A. Laguna-Bercero, "Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review," *J. Power Sources*, vol. 203, pp. 4–16, 2012.
- [10] I. Dincer, "Green methods for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954–1971, 2012.

- [11] M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, H. Naseem, and M. Danish, "Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 3, pp. 2249–8958, 2015.
- [12] A. Ursúa, L. M. Gandía, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, 2012.
- [13] P. Millet *et al.*, "PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 5043–5052, 2010.
- [14] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, 2019.
- [15] P. Choi, D. G. Bessarabov, and R. Datta, "A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis," *Solid State Ionics*, vol. 175, no. 1–4, pp. 535–539, 2004.
- [16] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, and D. Guilbert, "Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 29, pp. 14625–14639, 2020.
- [17] D. S. Falcão and A. M. F. R. Pinto, "A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners," *J. Clean. Prod.*, vol. 261, 2020.
- [18] F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali, "Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1143–1158, 2009.
- [19] C. Carrero, D. Ramírez, J. Rodríguez, and C. A. Platero, "Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three main points of the I-V curve," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2972–2977, 2011.
- [20] J. D. Osorio, A. Rivera-Alvarez, P. Girurugwiro, S. Yang, R. Hovsopian, and J. C. Ordonez, "Integration of transparent insulation materials into solar collector devices," *Sol. Energy*, vol. 147, pp. 8–21, 2017.