

**Evaluación teórica de la obtención del hidrógeno verde mediante la foto-electrocatalisis  
como modelo híbrido de transición energética en Colombia**

**Angely Rossana Jaimes Rincon, María Alejandra Espinosa Orejuela**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniera de Petróleos**

**Director**

**Nicolás Santos Santos**

**Magister en Ingeniería de hidrocarburos**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2023**

### **Dedicatoria**

A Dios, por cuidarme, guiarme y darme la fuerza y disciplina para lograr cada una de mis metas, por acompañarme y permitir que conozca de lo que puedo ser capaz mediante la constancia, por las lecciones dadas en el camino, pero sobre todo por mi maravillosa familia.

A mis padres Rocío y Guillermo por caminar conmigo durante todo este recorrido, por apoyar mis decisiones, por tomar mi mano en cada momento que creí me rendiría, por retarme y mostrarme con ejemplo como la perseverancia y el esfuerzo son los lazos que unen y permiten llegar hacia el destino, por su amor incondicional y por ser mi mayor fuente de inspiración y alegría.

A mis hermanas Kelly y Kathe por ser mi apoyo, porque con palabras de aliento y motivación ayudaron a que cada día me superara más, porque ellas son la cura a todos mis miedos y el vivo recordatorio del amor que tenemos más allá de la eternidad.

A Alejandra por su paciencia y esfuerzo para que de la mano pudiésemos sortear todos y cada uno de los obstáculos presentes en el camino.

“No se puede pasar un solo día sin tener un impacto en el mundo que nos rodea. Lo que hacemos marca la diferencia, y tenemos que decidir qué tipo de diferencia queremos hacer”.

(Jane Goodall.)

### **Dedicatoria**

Primeramente, quiero agradecer a Dios por ser mi guía, por darme la fortaleza para culminar con éxito este proyecto y esta etapa de mi vida, por nunca abandonarme, ni en los momentos más difíciles de todo el proceso y darme la calma para enfrentar tantas tormentas.

A mi abuela Carmen, por su dedicación, por sembrar en mí los valores que me llevan a ser quien soy ahora y a estar donde estoy en estos momentos, por enseñarme el valor del sacrificio, por creer en mí siempre que la duda me atacaba y ser mi pilar más fuerte.

A mis padres, Alejandro e Inés, por todo su esfuerzo para hacer de mí una mujer preparada para la vida, por sus palabras, consejos, desvelos, paciencia y su apoyo incondicional que han logrado ayudarme a subir cada uno de los escalones de mi vida.

A cada uno de mis grandes amigos de la universidad, quienes dejaron en mí, enseñanzas, recuerdos, sonrisas, conversaciones, anécdotas, gracias por todo el cariño y la paciencia brindada.

A Angely por su paciencia y esfuerzo para que de la mano pudiésemos sortear todos y cada uno de los obstáculos presentes en el camino.

"Durante centenares de miles de años, el hombre luchó para abrirse un lugar en la naturaleza. Por primera vez en la historia de nuestra especie, la situación se ha invertido y hoy es indispensable hacerle un lugar a la naturaleza en el mundo del hombre".

(Santiago Kovadloff).

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander por ofrecer una educación de calidad, en la cual estuvimos rodeadas de excelentes docentes y entornos de aprendizaje enriquecedores, que nos permitieron no solo nuestra formación como profesionales, sino que también nos educó para ser personas íntegras y conscientes que puedan contribuir a la sociedad de manera positiva.

A los Ingenieros Erik Montes y Adán León por su consejo, dedicación, seguimiento, entrega, disposición y compromiso en nuestro proceso evaluativo, que nos permitieron enfrentar este desafío con valentía y con la seguridad de haber hecho un gran trabajo.

**Contenido**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Introducción .....   | 15          |
| 1. Planteamiento del problema.....                                       | 17          |
| 1.1 Descripción del problema.....  | 17          |
| 1.2 Justificación .....  | 20          |
| 1.3 Objetivos.....   | 23          |
| <i>1.3.1 Objetivo general</i> .....                                      | 23          |
| <i>1.3.2 Objetivos específicos</i> .....                                 | 23          |
| 2. Marco de referencia .....   | 24          |
| 2.1 Antecedentes.....  | 24          |
| 2.2 Marco teórico.....   | 27          |
| <i>2.2.1 Cadena de suministro de energía solar en Colombia</i> .....     | 27          |
| <i>2.2.2 Tecnologías verdes utilizadas en el sector energético</i> ..... | 29          |
| <i>2.2.3 Innovación tecnológica en energías renovables</i> .....         | 31          |
| <i>2.2.4 Actores del sector de energía solar en Colombia</i> .....       | 33          |
| <i>2.2.5 El hidrógeno como fuente de energía</i> .....                   | 35          |
| <i>2.2.6 Modelos de obtención del hidrógeno</i> .....                    | 37          |
| <i>2.2.7 Tipos de hidrógeno y su uso en la industria petrolera</i> ..... | 38          |
| 3. Metodología .....   | 39          |
| 3.1 Tipo de investigación .....  | 40          |
| 3.2 Descripción de las unidades de estudio .....                         | 40          |
| 3.3 Técnicas de recolección de información .....                         | 40          |

|   |    |
|---|----|
| 3.4 Instrumento de recolección de información .....   | 42 |
| 3.5 Fases de la investigación .....   | 42 |
| 4. Resultados .....   | 43 |
| 4.1 Principales modelos de obtención de hidrógeno verde .....   | 44 |
| 4.1.1 <i>Métodos con energía eléctrica</i> .....  | 50 |
| 4.1.1.1 Electrólisis .....  | 50 |
| 4.1.1.2 Descomposición de gas natural por arco de plasma .....  | 53 |
| 4.1.2 <i>Métodos con Energía Térmica</i> .....  | 54 |
| 4.1.2.1 Termólisis .....  | 54 |
| 4.1.2.2 Procesos termoquímicos .....  | 55 |
| 4.1.3 <i>Métodos con Energía Bioquímica</i> .....   | 59 |
| 4.1.3.1 Fermentación Oscura .....   | 60 |
| 4.1.3.2 Foto fermentación .....   | 61 |
| 4.1.3.3 Biofotólisis .....  | 61 |
| 4.1.4 <i>Métodos con energía fotónica</i> .....   | 62 |
| 4.1.4.1 Electrólisis PV .....   | 62 |
| 4.1.4.2 Foto electrocatálisis .....   | 64 |
| 4.1.4.2.1 <i>Configuración del sistema</i> .....  | 64 |
| 4.1.4.2.2 <i>Fotocatalizador</i> .....  | 68 |
| 4.1.4.2.3 <i>Almacenamiento.</i> .....  | 75 |
| 4.1.4.2.4 <i>Avances de la fotoelectrocatálisis</i> .....   | 82 |
| 4.1.5 <i>Conglomerado de los métodos analizados</i> .....   | 86 |
| 4.2 Plan Energético Nacional para analizar posibles rutas de adopción del modelo híbrido, en dónde el hidrógeno verde sea un factor de inflexión en el desarrollo ambiental de Colombia.. | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.1 <i>Punto de partida del PEN</i> .....   | 88  |
| 4.2.2 <i>¿Cómo imaginamos el sector energético colombiano en 2050?</i> .....  | 92  |
| 4.3 Estructurar una ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electrocatálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde.....   | 97  |
| 4.4 Impacto energético-ambiental en el país mediante el análisis de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que se desarrollan con la adopción de la foto electrocatálisis como nueva tecnología energética. .... | 102 |
| 5. Conclusiones.....  | 104 |
| 6. Recomendaciones .....  | 105 |
| Referencias Bibliográficas .....  | 107 |

**Lista de tablas**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <i>Tabla 1. Antecedentes investigativos</i> .....   | 24          |
| <i>Tabla 2. Formato de revisión documental</i> .....  | 42          |
| <i>Tabla 3. Matriz de descarte</i> .....  | 45          |
| <i>Tabla 4. Matriz documental</i> .....   | 46          |
| <i>Tabla 5. Obtención de hidrógeno</i> .....  | 48          |
| <i>Tabla 6. Ventajas y desventajas de la electrólisis</i> .....   | 53          |
| <i>Tabla 7. Ventajas y desventajas del método de descomposición del gas natural por arco plasma</i><br>.....                            | 54          |
| <i>Tabla 8. Ventajas y desventajas de los procesos termoquímicos</i> .....  | 56          |
| <i>Tabla 9. Procesos de producción de hidrógeno biológico</i> .....   | 60          |
| <i>Tabla 10. Ventajas y desventajas de la electrólisis PV.</i> .....  | 63          |
| <i>Tabla 11. Ventajas y desventajas Foto electrocatálisis</i> .....   | 85          |
| <i>Tabla 12. Conglomerado de métodos</i> .....  | 86          |
| <i>Tabla 13. Indicadores del consumo energético</i> .....   | 89          |
| <i>Tabla 14. Indicadores de salud ambiental</i> .....   | 98          |
| <i>Tabla 15. Ruta estratégica para la incorporación de la foto electrocatálisis como herramienta de transformación energética</i> ..... | 101         |
| <i>Tabla 16. Matriz DOFA</i> .....  | 103         |

### Listado de Figuras

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <i>Figura 1. Cadena de suministro de la energía solar en Colombia.</i> .....  | 28          |
| <i>Figura 2. Criterios de inclusión y exclusión de información</i> .....  | 41          |
| <i>Figura 3. Fases de la investigación.</i> .....   | 43          |
| <i>Figura 4. Diagrama de flujo para la selección de información para el análisis de contenido.</i> ..   | 44          |
| <i>Figura 5. Modelos de obtención del hidrógeno verde.</i> .....  | 47          |
| <i>Figura 6. Principio de funcionamiento de electrólisis alcalina</i> .....   | 51          |
| <i>Figura 7. Principio de funcionamiento de electrólisis PEM</i> .....  | 52          |
| <i>Figura 8. Principio de funcionamiento de electrolisis SOEC</i> .....   | 52          |
| <i>Figura 9. Proceso de foto electrocatálisis</i> .....   | 65          |
| <i>Figura 10. Mecanismo de funcionamiento de la foto electrocatálisis</i> .....   | 66          |
| <i>Figura 11. Espectro de la luz solar</i> .....  | 69          |
| <i>Figura 12. La energía de radiación en función de la longitud de onda del fotón de la irradiación espectral solar (AM 1,5).</i> .....   | 70          |
| <i>Figura 13. La energía de banda prohibida y la posición de las bandas relativas de varios semiconductores se muestran en relación con los potenciales de oxidación/reducción del agua (NHE)</i> ..... | 72          |
| <i>Figura 14. Modificación del Diagrama de flujo y gráfico temperatura-entropía ciclo Linde-Hampson.</i> .....  | 76          |
| <i>Figura 15. Diagrama de flujo y gráfico temperatura-entropía ciclo Claude</i> .....   | 78          |
| <i>Figura 16. Ilustración simplificada de un recipiente criogénico, diseño y elementos constituyentes</i> .....   | 81          |
| <i>Figura 17. Desafíos del sector energético en Colombia</i> .....  | 91          |

*Figura 18. Visión de transformación energética PEN*..... 92

*Figura 19. Pilares 1 y 2 del PEN* ..... 93

*Figura 20. Pilares 3 y 4 del PEN*..... 94

*Figura 21. Objetivos PEN 2020-2050*..... 96

*Figura 22. Objetivos del desarrollo sostenible (2015)* ..... 99

## Glosario

*Cambio climático:* Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más).

*Conservación:* Es la conservación in situ de los ecosistemas y los hábitats naturales y el mantenimiento y recuperación de poblaciones viables de especies en su entorno natural y, en el caso de las especies domesticadas y cultivadas, en los entornos en que hayan desarrollado sus propiedades específicas. La conservación in situ hace referencia a la preservación, restauración, uso sostenible y conocimiento de la biodiversidad.

*Diversidad biológica:* Es la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas.

*Ecosistema:* Nivel de la biodiversidad que hace referencia a un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional.

*Gestión del cambio climático:* Tiene por objeto coordinar las acciones del Estado, los sectores productivos y la sociedad civil en el territorio mediante acciones de mitigación, que busquen reducir su contribución al cambio climático; y de adaptación, que le permitan enfrentar los retos actuales y futuros asociados a la mayor variabilidad climática, reducir la vulnerabilidad de la población y la economía ante ésta, promover un mayor conocimiento sobre los impactos del cambio climático.

*Negocios verdes:* Son actividades económicas que permiten el emprendimiento y desarrollo social sin afectar el medio ambiente, de manera que se logra disminuir la brecha de

desigualdad, a través de una competitividad económica, inclusiva y sostenible utilizando los recursos naturales con responsabilidad.

*Recursos renovables:* Son los recursos de origen natural que no se agotan a pesar de que se utilicen de forma continua y permanente.

*Vulnerabilidad:* Condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos, y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una persona, comunidad, bienes o sistemas al impacto de amenazas.

## Resumen

**Título:** evaluación teórica de la obtención del hidrógeno verde mediante la foto-electrocatalisis como modelo híbrido de transición energética en Colombia\*

**Autores:** Angely Rossana Jaimes Rincón, María Alejandra Espinosa Orejuela\*\*

**Palabras clave:** energía renovable, materiales fotoactivos, hidrógeno verde, preservación ambiental.

### Descripción:

Existen diversas fuentes de energía renovable, pero la principal fuente es el sol, que permite el desglosamiento de varios procesos que hacen posible la obtención del hidrógeno, entre ellos un modelo que integra varios de estos procesos, la fotoelectrocatalisis. En este estudio se propuso como objetivo general analizar conceptualmente el uso de la foto electrocatalisis como modelo híbrido en la obtención de hidrógeno verde. Para ello, se desarrolló una metodología documental a través de la cual se seleccionaron 26 unidades de estudio que permitieron recolectar información sobre los métodos de obtención del hidrógeno, posterior a ello se describieron aspectos del Plan Nacional del Desarrollo (PEN), lo que dio paso a la generación de la ruta estratégica para la adaptación de este método a la matriz energética y se construyó un análisis DOFA. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar la necesidad de transformación en la matriz energética del país, también se encontró que la foto electrocatalisis es una alternativa de producción de energía renovable que permite la mitigación de afectaciones al ambiente por la emisión de los gases del efecto invernadero. Se concluyó que es necesario el cambio de producir y suministrar energía en el país en pro de la sostenibilidad ambiental.

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Nicolás Santos Santos Magister en Ingeniería de hidrocarburos

### Abstract

**Title:** theoretical evaluation of obtaining green hydrogen through photo-electrocatalysis as a hybrid model of energy transition in Colombia

**Authors:** Angely Rossana Jaimes Rincon, María Alejandra Espinosa Orejuela

**Keywords:** renewable energy, photoactive materials, green hydrogen, environmental preservation

#### **Description:**

There are various sources of renewable energy, but the main source is the sun, which allows the breakdown of various processes that make it possible to obtain hydrogen, including a model that integrates several of these processes, photo-electrocatalysis. In this study, the general objective was proposed to conceptually analyze the use of photo-electrocatalysis as a hybrid model in obtaining green hydrogen. For this, a documentary methodology was developed through which 26 study units were selected that allowed the collection of information on the methods of obtaining hydrogen, after which aspects of the National Development Plan (PEN) were described, which gave way to the generation of the strategic route for the adaptation of this method to the energy matrix and a SWOT analysis was built. The results obtained made it possible to demonstrate the need for transformation in the country's energy matrix, it was also found that photo electrocatalysis is an alternative for the production of renewable energy that allows the mitigation of effects on the environment due to the emission of greenhouse gases. It was concluded that it is necessary to change the production and supply of energy in the country in favor of environmental sustainability.

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Nicolás Santos Santos Master in Hydrocarbon Engineering

## Introducción

Los compromisos medioambientales se convirtieron en metas para la protección y preservación del medio ambiente. Entre ellos, el impulso a las energías renovables, como energía que proviene de fuentes naturales (por tanto, inagotables) como el agua, el viento y el sol, se convirtieron en un camino a seguir. Específicamente el ODS 2030 N° 7, denominado energía asequible y no contaminante, se refiere a invertir en fuentes de energía limpia, mejorar la productividad energética, expandir la infraestructura, mejorar la tecnología y a la vez ayudar al medio ambiente (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2021).

Frente a esta necesidad, La comisión para la economía de américa latina y el caribe (CEPAL) explicó que era necesario adoptar, en los países, “severas políticas de conservación y de diversificación de las fuentes de energía, incentivando el uso de energías renovables o la energía verde” (Sánchez, et. al., 2019, p. 53). En este contexto, es imprescindible el estudio de los efectos del sistema de innovación tecnológica en la cadena de abastecimiento de energía solar, en particular para el caso de Colombia, ya que éste permite generar alternativas de estrategia para mejorar la efectividad de la cadena de suministro (CS), mediante la estructuración de un marco basado en los sistemas de innovación tecnológico que actúan a favor del desarrollo sostenible en el país.

Esa es la razón que convoca la presente investigación, siendo un claro ejemplo del cumplimiento de las metas del objetivo 7 de ODS 2030, con la producción de hidrógeno verde a través de un proceso de obtención más amigable con el planeta. En este sentido la investigación se basó en la descripción de los métodos de producción de hidrógeno verde con el fin de poder

identificar la efectividad de la fotoelectrocatalisis como alternativa de innovación y efectividad para el cambio de suministro energético en el país.

Por tanto, en este estudio se avanza en la búsqueda de la producción de energía limpia más eficiente, renovable y minimizadora de los cambios ambientales negativos del planeta y de allí la necesidad de seguir una ruta estratégica que oriente la consecución del uso de energía renovable, para ello, se llevó a cabo la recolección de información de fuentes secundarias que permitieron conocer los actuales métodos de obtención del combustible, evaluar sus ventajas y desventajas, para posteriormente analizar posibles rutas de adopción del modelo híbrido, en dónde el hidrógeno verde sea un factor de inflexión en el desarrollo ambiental de Colombia bajo los lineamientos del Plan Energético Nacional y finalmente crear una ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electro catálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde.

La información recolectada permitió evidenciar que ante las necesidades de cambio de los modelos de generación y suministro energético la fotoelectrocatalisis es una alternativa con grandes ventajas en cuanto a la producción de hidrógeno verde, para su implementación se hace necesario la alineación hacia las directrices del Plan Energético Nacional en pro de mitigar las afectaciones ambientales por el uso inadecuado de los recursos, la emisión de gases de efecto invernadero y la aparición de fenómenos naturales.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción del problema**

La situación ambiental y su deterioro progresivo tiene que ver con las formas en cómo el hombre concibe el mundo, es decir, sus creencias, valores y actitudes en torno al ambiente, lo cual, hace que manifieste un comportamiento determinado, evidenciando su cultura ambiental y la del contexto donde se desarrolla (Jair, 2020). En este sentido, es imperativo que se establezcan estrategias de sostenibilidad, que persigan mitigar las afectaciones ambientales como por ejemplo la emisión de gases al ambiente del efecto invernadero, que incrementan las posibilidades de desastres naturales.

Las actividades antropogénicas en muchas ocasiones no toman en cuenta la conservación del ambiente, sino que ejercen presión sobre el mismo y los recursos naturales concibiéndolos como una fuente inagotable de bienes que pueden ser usados para el bienestar humano, sin medir su impacto y su sostenibilidad en el tiempo (Acuña, et al, 2017). Por su parte, Moreno (2022) explica que en la actualidad este acelerado ritmo en el crecimiento y desarrollo de la sociedad ha generado infinidad de daños en el ambiente, los cuales se perciben por los cambios de clima, la acumulación de gases de efecto invernadero, el deterioro de la capa de ozono, entre otros aspectos que indican que existe un daño masivo en el planeta tierra.

A mediados del siglo XX, la preocupación por los problemas ambientales se acentuó debido a la contaminación generada por el rápido desarrollo industrial. Se empezaron a difundir ideas que ponían en tela de juicio el modelo de crecimiento económico predominante y su impacto en la degradación del medio ambiente y la afectación de los recursos naturales (Acuña et al., 2017). El aumento de la población, la elevada demanda de energía, el uso de combustibles fósiles para producir energía, la falta de conciencia en la sociedad, la escasez de prácticas de reciclaje, las

malas prácticas en la industria y la presencia de empresas ilegales que depositan residuos en cuerpos de agua y vertederos a cielo abierto, son algunas de las causas principales de la problemática ambiental (Cifuentes et al., 2018).

Es por ello, que la temática ambiental se ha convertido en un aspecto importante a considerar en todo sistema de gestión, debido a que ya no es una variable ocasional, hoy existe la necesidad de integrar el cuidado del ambiente, en todos los escenarios y con todos los involucrados, en búsqueda de alternativas que permitan preservar el equilibrio ambiental. De allí, parte el hecho de que los países desarrollados y en países en vía de desarrollo, se encuentren adelantando acciones en pro del cuidado del medio ambiente; además, de la creación de las organizaciones encargadas de implantar políticas y prácticas en desarrollo sostenible.

Se entiende entonces que la manera de hacer frente a problemáticas del entorno a lo ambiental ha cambiado. Específicamente, desde la segunda mitad del siglo XX se ha entendido que hay que actuar de manera distinta para que acciones de mejoramiento de situaciones problemáticas, transformaciones o innovaciones sociales, concienciación acerca del impacto de la huella humana, entre otros, acaezcan. En la medida que la conciencia ambientalista ha ido ganando terreno, también se ha ido consolidando el hecho de reconocer que no basta solo que actúen quienes se han formado académicamente como expertos en las áreas, no basta solo confiar en las acciones gubernamentales y de organismos internacionales y no basta solo esperar que otros actúen en el cumplimiento de los diversos cuerpos jurídico-normativos aprobados en los países.

Lo que se impulsa, hoy día, es la verdadera transformación de aquellas acciones que perjudican al ambiente. Entonces, en el caso de hacer frente, a los problemas ambientales propios de la adaptación al cambio climático dados sus impactos negativos, que ponen en riesgo la estabilidad del medio ambiente y dan paso al incremento de las amenazas de escenarios de riesgos donde las consecuencias pueden ser irreparables, es perentoria la acción en lo que refiere a las

formas de producir y suministrar energía, ya que, es un elemento indispensable para el desarrollo de las naciones, pues a través de su uso se llevan a cabo un sinnúmero de actividades para la satisfacción de las necesidades básicas del ser humano (Dieck, et. al., 2014).

Dentro de los tipos de energía generada por la humanidad se encuentran las de tipo convencional, es decir, aquellas que usan combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón, cuya producción ha generado una serie de problemas ambientales y sociales, que van desde la emisión de gases de efecto invernadero hasta la degradación del medio ambiente y la salud pública. La energía que se obtiene a partir de recursos no renovables, sigue siendo la principal fuente de suministro energético a nivel internacional. Según datos de World Economic Forum (2022) la producción de energía mundial aumentó un 2,9% en el periodo post pandemia y que las emisiones de CO<sub>2</sub> siguen incrementándose diariamente.

Esta emisión de CO<sub>2</sub> (gas del efecto invernadero) es producto de la quema de combustibles fósiles, es una de las principales causas del calentamiento global y el cambio climático (Chacón, 2020), esta realidad es inequívoca y la actividad humana es la principal causa del cambio climático. De allí la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global a 2°C por encima de los niveles preindustriales (Naciones, Unidas, 2021).

Ante los problemas asociados a la producción de energía convencional a partir de recursos no renovables, se han desarrollado diversas alternativas para la generación de energía limpia y renovable. Estas fuentes de energía tienen un menor impacto ambiental y además son inagotables. A pesar de que la producción de energía renovable ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, la transición hacia una matriz energética más limpia y renovable aún enfrenta diversos desafíos. Uno de los principales desafíos es la falta de inversión y apoyo gubernamental en muchos países, lo que limita el desarrollo de tecnologías y proyectos de energía renovable.

En el caso de Colombia, a pesar de contar con un gran potencial para la generación de energía renovable, el país aún depende en gran medida de la producción de energía convencional a partir de recursos no renovables. Según datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME 2021), la matriz energética de Colombia estuvo compuesta en un 68,4% por energía hidroeléctrica, en un 27,2% por combustibles fósiles (principalmente carbón y gas natural), en un 2,8% por energía no convencional (principalmente energía eólica y solar) y en un 1,6% por biomasa y residuos.

A pesar de que la energía hidroeléctrica es la principal fuente de energía renovable en Colombia, está también ha enfrentado diversos desafíos en los últimos años a causa del deterioro ambiental, que ha afectado la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas del país, lo que se conoce como el fenómeno del niño. Entonces, se entiende que la producción de energía convencional a partir de recursos no renovables es una problemática global que ha generado diversos impactos negativos en el medio ambiente, por ello, la transición hacia una matriz energética más limpia y renovable es esencial para mitigar los impactos del cambio climático y preservar las condiciones ambientales, siendo la producción de hidrógeno verde a partir de la fotoelectrocatalisis una alternativa de cambio para el alcance de la sostenibilidad ambiental.

## **1.2 Justificación**

El hecho de que existe una interdependencia entre el hombre y el medio es innegable, por ello se deben reconsiderar las formas de satisfacción de las necesidades biológicas e inclusive materiales buscando preservar la calidad de vida sin resquebrajar el ecosistema. Se hace evidente la urgencia de reconsiderar la relevancia del entorno en el progreso económico, cultural y social, mediante una reflexión consciente que fomente el cumplimiento de las exigencias humanas a través de la utilización sensata de las riquezas naturales. Esto se logra por medio de una

administración ambiental que fomente la participación responsable de la sociedad, la cual debe planificar, supervisar y evaluar de manera efectiva las decisiones que afecten la calidad del entorno, considerando el enfoque sistémico de una red que muestra un entramado económico, político, social, cultural, educativo y ecológico.

Siguiendo las ideas expuestas, se hace necesario contar con una sociedad en la que los actores sociales estén interconectados y consideren al medio ambiente como un sistema dinámico y abierto. Desde esta perspectiva, se requiere de un enfoque integrador, holístico e interdisciplinario en la formulación de políticas de desarrollo sostenible, para garantizar el uso responsable y sostenible de los recursos naturales como un proceso continuo, lo que asegura la calidad de vida de la sociedad.

Expresadas las consideraciones anteriores, se ratifica que el ambiente permea todo proceso en la vida, por lo cual, las acciones conscientes del hombre deben estar orientadas a salvaguardar el equilibrio del planeta. En la industria nacional colombiana, la transición de la energía convencional a energías renovables es una realidad en el marco del cumplimiento de compromisos internacionales a favor del cambio climático, pero es una exigencia de la realidad colombiana que a pesar de depender, en gran medida de energía hidráulica que es energía limpia, enfrenta grandes zonas con electrificación, zonas conectadas con mayores necesidades energéticas que van en aumento, disminución de niveles en embalses lo que afecta la generación hidráulica.

Todo ello en su conjunto convoca a la transformación como un compromiso y una exigencia por las demandas contextuales (UPME, 2015). Puntualmente, en esta transición se impactan las actividades de la cadena de suministro, debido a que la industria de electricidad debe hacer frente a los diferentes retos de innovación y eficiencia que se requieren para alcanzar una transición sostenible (Farla et al., 2012; Köhler et al., 2018; Markard et al., 2012), donde la competencia ya no se desarrolla entre las diferentes empresas sino de acuerdo con la capacidad de

su cadena de suministro para realizar procesos de innovación y desarrollo tecnológico (Lo et al., 2013).

La innovación, inmersa en las diferentes funciones y procesos de instalación, captación, transporte y mantenimiento de la energía renovable, propia de las economías emergentes, debe afrontar dinámicas comerciales adversas generadas en entornos donde predomina la incertidumbre y los ambientes complejos; esto hace necesario, desarrollar estrategias que permitan la estructuración de procesos altamente dinámicos y flexibles que mejoren de manera continua la productividad (Gindner, 2007).

Entonces este trabajo tiene diversa relevancia en cuanto a la producción de conocimiento ya que impactará lo social y promoverá el desarrollo. Como pudo evidenciarse en el contexto de estudio se requiere de una transformación en las formas de producción y suministro de energía, que favorezca a la preservación de las condiciones ambientales, mediante la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y las afectaciones generadas por el cambio climático por causa de la producción de energías no renovables.

Este trabajo favorece a la identificación de los aspectos que se deben considerar para hacer una transformación energética eficiente, a través de la descripción de los métodos de obtención de hidrógeno verde, las ventajas y desventajas y sobre todo bajo lineamiento del PEN. Por ello, esta investigación cobra una relevancia en cuanto a la innovación con la incorporación de la foto electrocatalisis como método de producción de energías limpias en pro del alcance de la sostenibilidad ambiental en el país.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Análisis conceptual del uso de la foto electrocatálisis como modelo híbrido en la obtención de hidrógeno verde, basado en las proyecciones y objetivos planteados en el Plan Energético para el desarrollo sostenible en Colombia.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Exponer los principales modelos de obtención de hidrógeno verde identificando sus ventajas y desventajas de tal forma que se puedan determinar las variables relevantes para la incorporación de la foto electrocatálisis en la dinámica nacional.
- Explicar el Plan Energético Nacional para analizar posibles rutas de adopción del modelo híbrido, en dónde el hidrógeno verde sea un factor de inflexión en el desarrollo ambiental de Colombia.
- Estructurar una ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electrocatálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde.
- Evaluar el impacto energético-ambiental en el país mediante el análisis de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que se desarrollan con la adopción de la foto electrocatálisis como nueva tecnología energética.

## 2. Marco de referencia

### 2.1 Antecedentes

Para dar inicio al marco de referencia de esta investigación se hará uso de lo expuesto por otras investigaciones de índole nacional e internacional sobre la temática abordada, para ello, se hizo la recolección de información relacionada con las energías renovables, recursos renovables, hidrógeno verde, energías limpias, mitigación del cambio climático, entre otros, la tabla 1 contiene la síntesis de cada uno de los estudios que conformaron este apartado:

**Tabla 1.**

*Antecedentes investigativos*

| <b>Autor (año)</b>      | <b>Título</b>   | <b>Síntesis</b>   |
|-------------------------|---|---|
| Cortes y Arango (2018)  | Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía     | En el desarrollo de este antecedente se describe todo un cuerpo teórico sobre la importancia de la adaptación de las energías renovables en las matrices energéticas de las naciones, lo cual, se encuentra justificado en el hecho de la necesidad de satisfacer la alta demanda de energía de una forma más amigable con el planeta, a través del uso de fuentes de recursos renovables debido a que son de naturaleza inagotable y su utilización libre de polución. Los autores describen que la actual era digital ha generado un incremento en las necesidades de energía, esto ha incrementado las afectaciones en el medio ambiente, el cambio climático es evidencia cierta de ello. El estudio contiene información sobre las ventajas de los países de América Latina para la producción de energías renovables, debido a que cuentan con recursos naturales que los convierten en idóneos para la obtención de este tipo de energías. Se da cuenta de países como México y Argentina que han incorporado metodologías para la obtención de energía eólica, dando paso a la adaptación de energías renovables a su matriz de suministros, por su parte Brasil que ocupa el tercer puesto en Latinoamérica en la producción de energías renovables y que además de ello cuenta con una gran extensión con alta radiación solar le permiten aprovechar el potencial en energía solar. Ahora bien, en lo que respecta a Colombia, este estudio presenta información sobre la obtención de energías renovables puntualmente en la Guajira a través de la producción eólica, lo que demuestra el compromiso por la reducción del impacto ambiental por la incorporación de energías renovables a la matriz energética. Igualmente, en el documento se describe la necesidad de transformación de las fuentes principales de energía en pro del alcance del desarrollo sostenible, ya que, el tema de una generación de energías renovables no solo impacta en las condiciones ambientales sino también en el desarrollo del país por el uso inadecuado de los recursos. |
| Jiménez, et. al. (2019) | Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los | Esta investigación sintetiza la necesidad de mejorar el suministro energético en América Latina, cuya justificación es desde la perspectiva de que las formas convencionales de generación de energía están ocasionando diversidad de afectaciones como emisión de gases de efecto invernadero, falta de acceso al servicio energético en zonas rurales, afectaciones en la disponibilidad por  |

|                |  |   |
|----------------|--|---|
|                | grupos de investigación  | fenómenos naturales (niño o niña), entre otras, que en resumida cuentas se separan del alcance del desarrollo sostenible y afectan la calidad de vida de los habitantes. Esta realidad es consecuencia de que en los países de América Latina la principal fuente de producción de electricidad es la energía hidroeléctrica (47.1%), seguida de combustibles fósiles (42.9 %); mientras que las fuentes renovables no convencionales solo representan el 5.3%, dichas cifras demuestran la necesidad de innovar en la manera de producir y suministrar energía. Los autores describen que en Colombia esta realidad se intensifica pues el 68,5% de la energía nacional depende de fuentes hídricas por ello es más vulnerable, de allí que en búsqueda de ser más sostenibles y amigables con el planeta se deben adaptar nuevas fuentes generadoras de energía con recursos renovables.  |
| Jiménez (2020) | Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en Aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible Fósil. | Las actuales necesidades de sostenibilidad ambiental y las afectaciones generadas por el cambio climático han evidenciado que el mundo requiere un cambio en sus formas de producir y suministrar el servicio eléctrico. De esta manera, el hidrógeno verde se presenta como una opción viable para lograr la descarbonización, ya que se produce utilizando energías alternativas que no generan emisiones de carbono, lo que contribuye a la disminución de los GEI. Por esta razón, el autor resuelve examinar minuciosamente el ciclo de suministro de hidrógeno verde, desde su producción hasta su uso final, describiendo a detalle las principales opciones relacionadas con cada etapa, con un enfoque particular en su aplicabilidad en el sector industrial. Para ello la investigación se estructuró en cuatro etapas, la primera hizo una caracterización de la demanda de hidrógeno a nivel nacional e internacional de hidrógeno y a su vez un potencial de demanda del hidrógeno verde. Una vez identificada la necesidad de contar con hidrógeno verde se dio paso a la segunda fase que consistió en proyectar los recursos en términos económicos de la adaptación de tecnologías relacionadas con cada fase del proceso del abastecimiento del hidrógeno verde, así como el valor meta que se debería conseguir para garantizar su rentabilidad en comparación con los medios energéticos actualmente utilizados. Luego de ello se realizó una evaluación técnica que contempló cada uno de los aspectos técnicos y económicos necesarios para plantas prototipo. Para finalmente cerrar con el análisis del mercado potencial del hidrógeno verde. Los estudios realizados permitieron identificar la viabilidad de producir hidrógeno verde en Chile en gran escala, debido a que cuenta con los recursos renovables para su obtención y diversos procesos industriales para utilizarlo, lo cual, disminuiría la consecuencia de los GEI que tendría un impacto positivo en el desarrollo sostenible, al mismo tiempo contribuiría a una economía nacional más sólida e independiente de los precios internacionales de los combustibles. En este contexto, incluso podría surgir la posibilidad de convertirse en un distribuidor de energía utilizando el hidrógeno verde como portador energético. |
| Rojas (2021)   | Estudio del uso del hidrógeno verde para Disminuir el impacto de contaminación ambiental en la fabricación de los explosivos ANFOD | Se describe la problemática mundial que se vive en la actual era por causa de la deposición de los gases de efecto invernadero, expresamente el CO <sub>2</sub> como el principal agente contaminante con diversidad de afectaciones al ambiente y a la salud de la ciudadanía en general. Esto es el resultado de la obtención de energías no renovables cuyo abastecimiento representa más del 50% de las necesidades energéticas a nivel mundial. En el estudio se describe que es necesario adaptar alternativas de producción de energía renovable, siendo el hidrógeno verde una opción viable en términos de sostenibilidad ambiental y económica. Se describe que para la obtención del mismo se requiere una planta que contenga Purificador de agua, Tanque de almacenamiento de agua, Electrolizador, Compresor y Tanque de almacenamiento de hidrógeno. Como materias primas serían el agua, oxígeno y la fuente de energía renovable. El autor expresa que las características del hidrógeno estarán en función del uso para el cual será destinado, por ello, el proceso de obtención debe iniciar por la   |

---

|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| Guerrón<br>(2021) | Generador de<br>Hidrógeno verde<br>para las condiciones<br>marinas | <p>purificación del agua antes de su almacenamiento, es decir, el agua deberá cumplir con ciertos parámetros de pH, sodio, resistividad eléctrica, cloro, entre otros. Una vez realizada la purificación el agua debe ser almacenada en tanques que estarán conectados al electrolizador que será alimentado con el agua purificada, oxígeno del aire y la energía renovable. Esta combinación de factores dará lugar a la catálisis y se obtendrá el hidrógeno verde que alimenta al compresor que tendrá el objetivo de comprimir este hidrógeno a una presión definida dependiendo del equipo a utilizar, para su posterior almacenamiento y transporte. Una vez descrita la obtención de hidrógeno verde se produjo a la realizar comparaciones entre los diferentes métodos para la producción de los compuestos de la industria objeto de estudio en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, evidenciándose que el hidrógeno verde reduce hasta en un 47% las cantidades del gas, ya que la producción del ANFO a partir del hidrógeno gris libera entre 2 a 2,5 millones de toneladas cada año entre el 2021 y 2030. Mientras que, al utilizar el hidrógeno verde, existe una disminución de más de un millón de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas anualmente.</p> <p>Las crisis energéticas de los últimos años han dado pie a la búsqueda de alternativas de producción y suministro de energías más amigables con el planeta, dentro de ellas se encuentra la obtención del hidrógeno verde como un vector energético sin huella de carbono, que además tiene una serie de características que le confieren ventajas frente a otras alternativas de obtención de compuestos energéticos limpios, entre las cuales destacan que es un elemento abundante en la tierra, que no genera riesgos de contaminación y que Tiene el poder de convertirse a energía eléctrica o aprovecharse mediante la combustión. El estudio fue realizado en la Guajira colombiana debido al potencial de fuentes de energías renovables, entre ellas la solar. Para el diseño del electrolizador para la obtención de hidrógeno verde se llevaron a cabo un total de 20 experimentos donde se controlaban la concentración salina del agua y el nivel del voltaje. En el estudio se demostró que con el uso de electrolizadores se pueden obtener buenos resultados en cuanto a la obtención de hidrógeno verde, lo cual, favorece a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero por la generación de energías no renovables.</p> |
|-------------------|--|--|

---

Los antecedentes citados en la tabla 1 son evidencia de que el hidrógeno verde representa una alternativa para la obtención de energías renovables y la sostenibilidad. Los hallazgos encontrados por estos investigadores de índole teórico y práctico demuestran que a través de esta metodología de energías renovables se tienen resultados positivos en cuanto al uso de recursos renovables, la emisión de gases al ambiente representa una afectación en el equilibrio ambiental, por ende, el incremento de las posibilidades de desastres naturales. La mitigación de la emisión de los gases de efecto invernadero por causa de la producción de energías renovables favorece al alcance del desarrollo sostenible, por ello, se logró evidenciar la necesidad de la búsqueda y

adaptación de líneas de obtención de energías renovables, siendo la producción del hidrógeno verde una opción viable en términos de costos y beneficios.

## **2.2 Marco teórico**

Una vez descritos los aportes de otras investigaciones sobre la necesidad de adaptar nuevas formas de producción de energía renovable, es necesario describir lo correspondiente al uso de la energía solar como recurso renovable, en este sentido se describen los aspectos teóricos de mayor relevancia con la investigación.

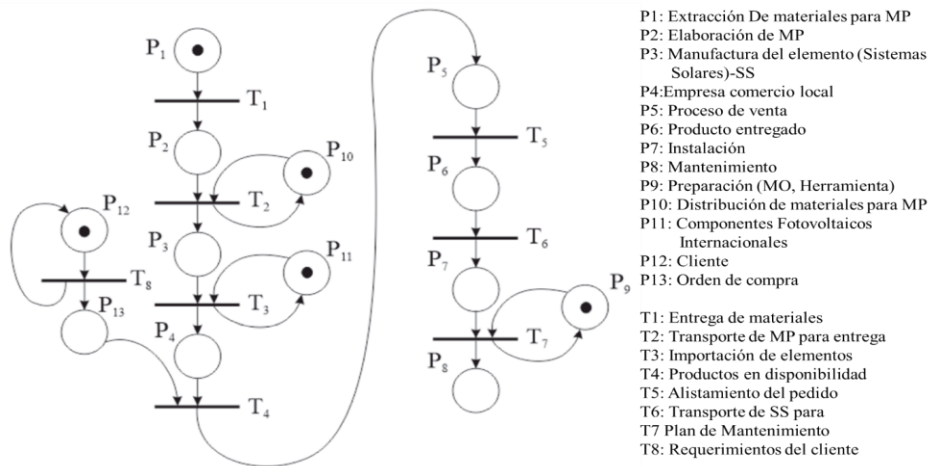
### ***2.2.1 Cadena de suministro de energía solar en Colombia***

El propósito del estudio realizado por Valderrama y su equipo (2018) fue analizar la cadena de suministro de sistemas fotovoltaicos en Colombia. Los resultados indicaron que: a) la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una alternativa significativa para complementar o reemplazar la generación de energía convencional en Colombia; b) hay enlaces aislados en las etapas de los procesos logísticos de la energía solar, lo que dificulta su expansión; c) los proyectos de energía solar en las zonas no interconectadas (ZNI) han enfrentado importantes problemas logísticos, especialmente en términos de infraestructura de transporte y adquisición de materiales; d) actualmente, el país cuenta con el Plan Maestro Logístico (2016) para invertir en infraestructura vial, el Plan Maestro de Transporte Intermodal (2015) para conectar ciudades, regiones y ZNI a través de una red de infraestructura vial, marítima, ferroviaria y aérea que apoye la cadena de suministro.

Los autores aportan claridad acerca de los componentes que participan en la cadena, a saber:

**Figura 1.**

*Cadena de suministro de la energía solar en Colombia.*



*Nota:* Valderrama, et. al. (2018).

De esta investigación queda esa caracterización de la situación actual donde se reconoce el potencial de la energía solar en el país, los problemas de gestión en la cadena de suministro y el impulso gubernamental a través de la visión estratégica de los Planes para el apoyo de la infraestructura que permitan la cadena de abastecimiento solar. Estos resultados dan cuenta de la necesidad de modelos de cadena de suministro y su pertinencia en el marco geográfico-contextual energético colombiano, lo cual legitima la necesidad de buscar alternativas de cambio para la matriz energética en Colombia a través del uso de recursos renovables que se estudia en esta investigación.

Existe según los autores la necesidad de articulación; debido a que se hace mención de la desarticulación en los procesos logísticos. Además, se alude al transporte como un elemento a considerar; en el primer caso como uno donde se necesita la disminución de costes, en éste como la necesidad de potenciar la infraestructura de manera que haya interconexión en las regiones donde se lleve a cabo la cadena de abastecimiento.

### ***2.2.2 Tecnologías verdes utilizadas en el sector energético***

Las tecnologías verdes, también conocidas como tecnologías ecológicas o no contaminantes, se refieren a productos y servicios que mejoran la calidad del aire, el agua, el suelo o abordan problemas relacionados con residuos o ruido. Estas tecnologías pueden variar ampliamente, desde sistemas altamente avanzados, complejos y costosos, hasta soluciones simples. En el sector de la energía, las tecnologías verdes se desarrollan en respuesta a la necesidad de abordar problemas ambientales.

En este sentido, el aumento de la temperatura promedio del planeta está vinculado a la intensa concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que provoca cambios climáticos. Este fenómeno es motivo de preocupación generalizada debido a que no sólo afecta al sector ambiental, sino que tiene consecuencias en todos los aspectos socioeconómicos. Ante esta situación, la comunidad internacional ha adoptado diversas medidas para frenar el calentamiento global, entre ellas, reducir el consumo energético y fomentar el uso de fuentes de energía renovable en sustitución de los combustibles fósiles.

Ahora bien, es de destacar un ejemplo del uso de tecnologías verdes, en Nueva Zelanda, alrededor de dos tercios de la electricidad proviene de fuentes renovables y tienen como objetivo alcanzar el 90% de energía eléctrica renovable para el 2025, utilizando fuentes como la energía geotérmica, eólica y biomasa. Su estrategia energética se enfoca en garantizar la seguridad del suministro, la accesibilidad y la responsabilidad ambiental, con el objetivo principal de maximizar el crecimiento económico. Se han implementado incentivos para fomentar la eficiencia energética y ayudar a los hogares de bajos ingresos a realizar la transición hacia un sistema energético sostenible de baja emisión. En 2008, se introdujo un esquema de transacción de emisiones que

cubre todos los sectores de la economía, incluida la agricultura y los gases de efecto invernadero, que se espera que se implemente completamente para 2015 (Nieto et al., 2011).

De igual manera el autor anterior señala que Nueva Zelanda está sacando provecho de las posibilidades que brindan los mercados internacionales y los inversores que buscan proyectos de tecnología ambientalmente sostenible. Las áreas donde tienen una oferta más sólida son la energía renovable, la eficiencia energética, la gestión de residuos sólidos y líquidos, los biocombustibles, el transporte y la agricultura sostenible.

En el mismo orden de ideas, se destaca en el informe del Panel Internacional de Recursos (IRP) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA,2016) *Opciones de energía verde: los beneficios, riesgos y compensaciones de las tecnologías bajas en carbono para la producción de electricidad* que la creciente demanda de energía y los esfuerzos para combatir el cambio climático requieren un aumento significativo en la generación de electricidad con bajas emisiones de carbono, dicho informe tiene como objetivo ayudar a los responsables políticos a tomar decisiones informadas sobre tecnologías energéticas, infraestructura y combinación óptima.

El informe revela que la electricidad generada a partir de fuentes renovables como la hidroeléctrica, eólica, solar y geotérmica puede reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (más del 90% en comparación con el carbón) y disminuir la contaminación perjudicial para la salud humana y los ecosistemas en un 60-90 por ciento. La captura y almacenamiento de dióxido de carbono de las plantas de energía de combustibles fósiles también puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 70%, pero aumentará la contaminación dañina para la salud humana y los ecosistemas en un 5-80% (PNUMA,2016). El objetivo del informe es ayudar a los responsables políticos a tomar decisiones más informadas sobre las tecnologías energéticas, infraestructura y la combinación óptima para satisfacer la creciente demanda de energía y combatir el cambio climático.

Seleccionar la combinación adecuada de tecnologías energéticas y establecer procedimientos para mitigar los posibles impactos son claves para tomar decisiones sensatas en materia energética, según el informe del PNUMA (2016). En Colombia, debido a cuestiones geográficas, las hidroeléctricas han sido la solución energética de avanzada. Sin embargo, el país ha demostrado interés en iniciativas de energía eólica, solar, biomasa e incluso de producción de energía con bicicletas. Estas iniciativas posicionan a la energía como uno de los motores del país, según (Correa, 2016).

### ***2.2.3 Innovación tecnológica en energías renovables***

En el siguiente apartado se expondrán una serie de experiencias investigativas que aluden al uso de Innovaciones Tecnológicas. En su Tesis doctoral en la UNED, Ponce (2019) se enfocó en la energía solar distribuida y las smart grid como alternativas para diversificar la matriz energética de Ecuador. El propósito de la investigación fue desarrollar un marco teórico que abarcara el estado actual y futuro de las Redes Eléctricas y sus políticas, centrándose en la energía solar fotovoltaica. Los resultados indicaron que, en Sudamérica, la satisfacción de la demanda energética y la búsqueda de independencia y seguridad energética se están fortaleciendo en los mercados de Chile, Brasil y Colombia, lo que los convierte en mercados atractivos para la inversión en energías renovables no convencionales.

Ecuador, por su parte, ha cambiado su matriz energética hasta convertirse en el país más verde. Además, se reconoce que la aplicación de las políticas energéticas del marco regulatorio, favorable, avanza (desde 2013) hacia un modelo ecuatoriano de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) implica a unidades de negocio, ministerios, universidades e institutos de investigación y al propio sector petrolero como principal fuente de financiación, por lo que el mapa de ruta para la transformación eléctrica incorpora desarrollo, investigación e innovación. Sin

embargo, la aplicabilidad enfrenta obstáculos por la inversión a largo plazo (a corto y mediano plazo depende del aporte del sector petrolero), lo cual no permite disminuir la dependencia del petróleo y por la aportación mínima a la matriz eléctrica del país, lo cual indica la necesidad de ampliación de ésta.

Además de la investigación anterior, existen otras vías para la innovación en la cadena de suministro, Valderrama, et al., (2018) aseguraron que en el mercado hay dinamismo constante y necesidad de crecimiento, lo cual impulsa tal innovación como un requerimiento para el desarrollo de la cadena de suministro energético. Por ello, las empresas se ven incentivadas a cambios en el modelo de procesos, como el propuesto por Herrera y Trujillo (2021), pero también se impulsan cambios en productos, en servicios, en tecnología y en modelo de negocios. Según Valderrama, et. al (2018) es justamente en ésta donde ocurren innovaciones, por cuanto a través de la inserción se agilizan y mejoran las tareas de reconocimiento, organización y respuesta en la cadena de suministro.

Según Yáñez (2020), en la primera mitad de 2020 la energía solar y eólica lograron cubrir el 10% de la demanda mundial de electricidad, lo que constituye un hito histórico. Sin embargo, esta cifra sigue siendo insuficiente si se considera que el carbón todavía genera el 33% de la energía global, y que la reducción reciente en su uso se debe principalmente a la pandemia. A pesar de los obstáculos técnicos que aún enfrentan las energías limpias, se han logrado avances significativos en la energía solar y eléctrica. Por ejemplo, un equipo de ingenieros de la Universidad de Stanford ha desarrollado paneles solares que combinan el enfriamiento radiactivo con la generación termoeléctrica para producir 2,2 vatios por metro cuadrado sin necesidad de una fuente de energía externa. Además, el startup alemana Sinn Power ha propuesto un sistema que aprovecha la energía de las olas, el sol y el viento para optimizar el rendimiento de las plantas eólicas y solares. Esta

solución podría resultar útil en regiones aisladas de países en desarrollo y permitiría convertir en electricidad el calor residual generado por los automóviles.

Cabe mencionar en este apartado otros tipos de innovaciones en el campo de la cadena de suministro, por su parte, Del Médico (2021) defiende el hecho de que la transformación digital ha cambiado sustancialmente la forma como se produce y se suministra energía, ya que, no ocurren sus procesos de manera manual. El monitoreo, los reajustes, la respuesta a las expectativas del cliente deben buscar su consecución con éxito; razón por la cual tanto los procesos operativos como la gestión misma se llevan a cabo con la tecnología en la cadena de suministro.

Planificación, compra, producción, conexión con otros sectores y entrega son los procesos impactados por las innovaciones que llevan consigo la transformación digital, como por ejemplo las APIs de Maplink (Trip, Plannig y Distance Matrix) (Del Médico, 2021). Lo importante no es tecnologizar la cadena de suministro, sino lograr que esta sea más integrada y eficiente que son los mayores obstáculos que se hallan y para lo cual la innovación apuesta.

#### ***2.2.4 Actores del sector de energía solar en Colombia***

La alta dependencia de la energía convencional en el país alcanza un porcentaje mayor de 70%. Según Gómez, et. al. (2018) este porcentaje alcanza un 78% y sólo un 22% proviene de energías renovables. La demanda energética crece constantemente y los problemas generados por el déficit hídrico (bajos niveles de embalse por el Fenómeno del Niño), de donde proviene la generación de energía hidráulica, permiten pronosticar la necesidad significativa de dar paso a fuentes renovables de energía y tecnologías limpias como la fotovoltaica o solar, eólica, biomasa o geotérmica.

Desde los acuerdos internacionales del protocolo de kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, Colombia entró en el camino del mecanismo desarrollo

limpio (Bonell, 2007). Tras ello no se hicieron esperar, durante las dos décadas primeras del siglo XXI, las adecuaciones legales para tales fines, por lo cual se dio un impulso para el uso de fuentes alternas de energía (puntualmente solar Fotovoltaica-FV) (a través del Decreto 3652 en 2003); se creó el programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales – PROURE (a través del Decreto 3683 también en 2003); se reafirmó el uso de energías alternativas en 2010 (Resolución 18 0919); en 2014 se reglamentó la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional y se establecieron tarifas para la energía solar FV y se impulsó la producción energética desde el Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) (Ley 1715); en 2020 la UPME es la única encargada de los proyectos y se ofrecen incentivos tributarios para empresas del sector (Decreto 829 de 2020).

Según lo indicado por Cárdenas (2018), Colombia se divide en dos tipos de regiones según su abastecimiento energético: el 96% corresponde al Sistema de Interconexión Nacional (SIN) y el 4% restante a las Zonas No Interconectadas de Colombia (ZNI), que cubren aproximadamente dos tercios del territorio nacional. La cobertura eléctrica es del 93% en áreas urbanas y del 55% en áreas rurales. A pesar de esto, aún existe una población de alrededor de 1,3 millones de personas que no tienen acceso a la electricidad.

En el sector eléctrico participan diversos agentes económicos, ya sean públicos, privados o mixtos. El esquema institucional del sector está compuesto por varias entidades, entre ellas el ministerio de minas y energía, que es la máxima autoridad del sector y se encarga de establecer las políticas y líneas de acción. También está la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), que tiene la responsabilidad de diseñar el plan de expansión del sistema de transmisión nacional, y la superintendencia de servicios públicos domiciliarios. La Comisión de Regulación de Energía

y Gas (CREG) es otra entidad importante, y cuenta con dos entidades adscritas, el Comité Asesor de Comercialización (CAC) y el Consejo Nacional de Operación (CON).

El mercado eléctrico colombiano está integrado por cuatro actores principales: los generadores, que producen la electricidad a partir de fuentes primarias, siendo la hidráulica la principal con un 79,32%, seguida del gas con un 15,39%, el carbón con un 4,13%, y otras fuentes como el viento y la radiación solar con un 1,07% (UPME, 2021); los transportadores, encargados de transmitir la energía a los centros de distribución, cuyas redes son mayormente propiedad de empresas como ISA, Transelca, EPM, EEB y EPSA; los distribuidores, quienes se encargan de llevar la energía a los centros rurales y urbanos, y cuyo gremio está conformado por empresas como EPM, Codensa, Electricaribe, Empresa de Energía de Bogotá, EPSA y Emcali; y los comercializadores, quienes compran energía a los generadores para posteriormente venderla y utilizan las redes de los transportadores mediante arriendos para llegar al usuario a través de los distribuidores, tal es el caso de Enel.

### ***2.2.5 El hidrógeno como fuente de energía***

El hidrógeno es un elemento químico simple de bajo peso molecular que se encuentra en abundancia en el Universo, alrededor del 75% de la materia está compuesta de este elemento (Bedoya y Medina, 2021). Debido a su alta reactividad, no suele encontrarse en la naturaleza de forma aislada y debe extraerse del agua, los hidrocarburos o la biomasa. Al utilizar fuentes de energía renovables o al absorber el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido en la producción de hidrógeno con combustibles fósiles, este elemento simple se convierte en una alternativa para la descarbonización, y cuanto más sofisticada sea la electrificación de estos usos finales, más interesante será.

Este elemento puede ser usado en la refinación de combustibles fósiles, refrigerante, combustible y como almacenamiento de energía eléctrica, en otras palabras, el hidrógeno es la clave de una sociedad sostenible. El potencial de energía solar fotovoltaica en Colombia es favorable en comparación con otras regiones del mundo, ya que la mayor parte del territorio nacional cuenta con un recurso de brillo solar que oscila entre 4,8 y 12 horas de sol promedio diario anual. Esto se traduce en una radiación promedio uniforme de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> durante todo el año, que es mayor que el promedio mundial de 3,9 kWh/m<sup>2</sup> (Lache, 2015). Además, Colombia tiene a su disposición gas y carbón, los cuales combinados con la captura y almacenamiento o utilización de CO<sub>2</sub>, diversifican las opciones de suministro de hidrógeno de bajas emisiones para garantizar el autoabastecimiento.

Al día de hoy Colombia posee alrededor de 51.05 millones de habitantes (2021), cuyo consumo energético según la IEA es de 1 662 607 TJ demanda que ha sido asumida por los combustibles fósiles en un 71% y en un 29% por energías renovables, el aumento tan acelerado en la demanda energética a lo largo de los años, junto con el crecimiento en la huella de carbono y el cambio climático, han llevado a diferentes países a generar planes de contingencia con una perspectiva más amable con el medio ambiente, todos estos efectos ambientales que sufre el mundo, siendo las emisiones uno de los factores más importantes que se dan debido a los combustibles como el petróleo, el gas natural y el carbón, han llevado a Colombia a tener una responsabilidad colectiva con el fin de cubrir las necesidades actuales con métodos sostenibles, por lo tanto se ha unido al reto mundial de lograr abastecer su población disminuyendo considerablemente los combustibles fósiles, adoptando tecnologías que generen el menor impacto ambiental posible.

### ***2.2.6 Modelos de obtención del hidrógeno***

En la actualidad, hay múltiples métodos para producir hidrógeno que se diferencian por los insumos empleados y las tecnologías utilizadas. La sostenibilidad del sector energético, que está estrechamente relacionada con la tecnología de producción y la fuente de energía, determina la clasificación del hidrógeno. La Comisión Europea ha adoptado esta clasificación en su estrategia para el hidrógeno:

- **Hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles:** Usan un combustible fósil como materia prima, como por ejemplo la gasificación del carbón o el reformado de gas natural, este tipo de combustibles tienen factores de emisión de alrededor de 9,5 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> para el gas natural, y de 20 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub> para el carbón.
- **Hidrógeno a partir de combustibles fósiles con CCUS:** Es una subcategoría de la categoría anterior. Aquí se utiliza la captura, el almacenamiento y en algunos casos la utilización de carbono (CCUS4), con factores de emisión que pueden estar entre 1 y 2 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>.
- **Hidrógeno a partir de electricidad:** Es producido mediante electrólisis, independientemente de la fuente de origen de la energía eléctrica. Si en Europa el factor de emisión promedio sería de 14 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> y a nivel mundial ese valor subiría hasta los 26 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, valores superiores al factor de emisión del reformado con vapor del metano (SMR) de 9,5 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>. No obstante, Colombia consigue un factor de emisión inferior por su matriz energética con alta presencia hidráulica. En el caso de Colombia, la producción de hidrógeno a partir de la red emitirá 8,2 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>.
- **Hidrógeno renovable:** Este es producido a partir de fuentes renovables por lo que se considera que tiene cero emisiones. Se incluye al hidrógeno producido mediante electrólisis, siempre que la electricidad provenga de tecnologías renovables, y al hidrógeno, obtenido a partir de la biomasa.

### ***2.2.7 Tipos de hidrógeno y su uso en la industria petrolera***

Existen diversas maneras identificar o clasificar el hidrógeno según su origen, su pureza o su color (Brijaldo et. al., 2021). En este trabajo se hará la descripción de la clasificación por colores, que se basa en el impacto ambiental de la producción de este elemento, de esta manera se pueden identificar los siguientes tipos de hidrogeno:

- **Hidrógeno negro:** Debido a su forma de producción es considerado el menos sostenible y más contaminante, pues se obtiene a través hidrocarburos, como el carbón o el petróleo por ende genera emisiones de CO<sub>2</sub> que no son capturadas y cuya incidencia es nociva para el equilibrio ambiental (Martínez, 2021). Para este proceso se requieren altas temperaturas y presiones, por ello, el consumo de energía para su obtención es alta. Es importante señalar que este tipo de hidrógeno es corrosivo y tóxico por su alto contenido de carbono por ello, su uso favorece al cambio climático.
- **Hidrógeno gris:** Es el tipo de hidrógeno más utilizado actualmente, ya que representa alrededor del 75% de la producción mundial (Beltramo, et. al., 2021). Se produce a partir del gas natural mediante un proceso llamado reformado con vapor (SMR), que consiste en hacer reaccionar el metano (CH<sub>4</sub>) con agua (H<sub>2</sub>O) a alta temperatura y presión para obtener hidrógeno (H<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Beltramo, et., al., 2021). Este último se libera a la atmósfera sin ningún tratamiento. El hidrógeno gris tiene un bajo contenido en carbono y azufre, lo que lo hace menos corrosivo y tóxico que el hidrógeno negro. Sin embargo, su uso también contribuye al calentamiento global y a la contaminación atmosférica.
- **Hidrógeno marrón:** Es el segundo tipo de hidrógeno más utilizado actualmente, ya que representa alrededor del 23% de la producción mundial. Al igual que el negro y el gris es obtenido a partir de combustibles fósiles y tiene efectos nocivos en el ambiente, por ello, no es una opción sostenible.

- **Hidrógeno azul:** Es una opción de transición hacia una economía baja en carbono, ya que reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero. Se produce a partir del gas natural mediante el mismo proceso que el hidrógeno gris (SMR), pero con la diferencia de que se captura y se almacena el CO<sub>2</sub> generado, evitando así su emisión a la atmósfera (García, 2022). El hidrógeno azul tiene un bajo contenido en carbono y azufre, lo que lo hace menos corrosivo y tóxico.
- **Hidrógeno verde:** Se produce a partir del agua mediante un proceso llamado electrólisis, que consiste en aplicar una corriente eléctrica para separar el agua (H<sub>2</sub>O) en sus componentes de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). Si la electricidad proviene de fuentes de energía renovables, como la eólica o la solar, se trata de un proceso limpio y sostenible que no genera emisiones de GEI. El hidrógeno verde es el más deseable desde el punto de vista ambiental y el que tiene mayor potencial para sustituir a los combustibles fósiles en el futuro. Sin embargo, su producción aún es muy limitada y costosa, ya que representa menos del 1% del total mundial (ecointeligencia.com, 2021).

### 3. Metodología

En función de los objetivos propuestos se decidió el acercamiento a la temática en estudio a través de fuentes secundarias, es decir, información de tipo teórica; de manera que se pudo analizar conceptualmente el uso de la foto electrocatálisis como modelo híbrido en la obtención de hidrógeno verde, basado en las proyecciones y objetivos planteados en el Plan Energético para el desarrollo sostenible en Colombia, es decir, se hizo desde documentos para el contacto con el mundo empírico (Balestrini, 2003).

### **3.1 Tipo de investigación**

Entonces, la investigación fue de tipo documental que conduce a la revisión de documentos y sus hallazgos como soporte para el trabajo donde se privilegia la información numérica y no numérica de fuentes documentales (Ortiz, 2015). De allí que el método bibliográfico fue aplicado a través de las técnicas observación documental y resumen analítico. Estas fuentes se recogen no de manera primaria, porque no son expresión de la realidad en su ambiente natural, sino que son una referencia a la realidad por lo cual son fuentes secundarias (Balestrini, 2003).

### **3.2 Descripción de las unidades de estudio**

El trabajo bibliográfico se desarrolló a través de la observación documental de datos que implican: “La revisión cuidadosa y sistemática de estudios, informes de investigación, estadísticas, literatura y, en general, documentos con el fin de contextualizar el tema que se pretende estudiar” (Ortiz, 2015, p. 62). Por ello, en este estudio se realizó el análisis de las fuentes de información documentales que fueron identificadas como las fuentes de estudio, entre ellas, artículos científicos, artículos de revisión sistemática y documental, tesis de pregrado, postgrado, maestría y doctorado, libros, entre otros, que contengan información validada y confiable sobre el tema que se abordó en este estudio.

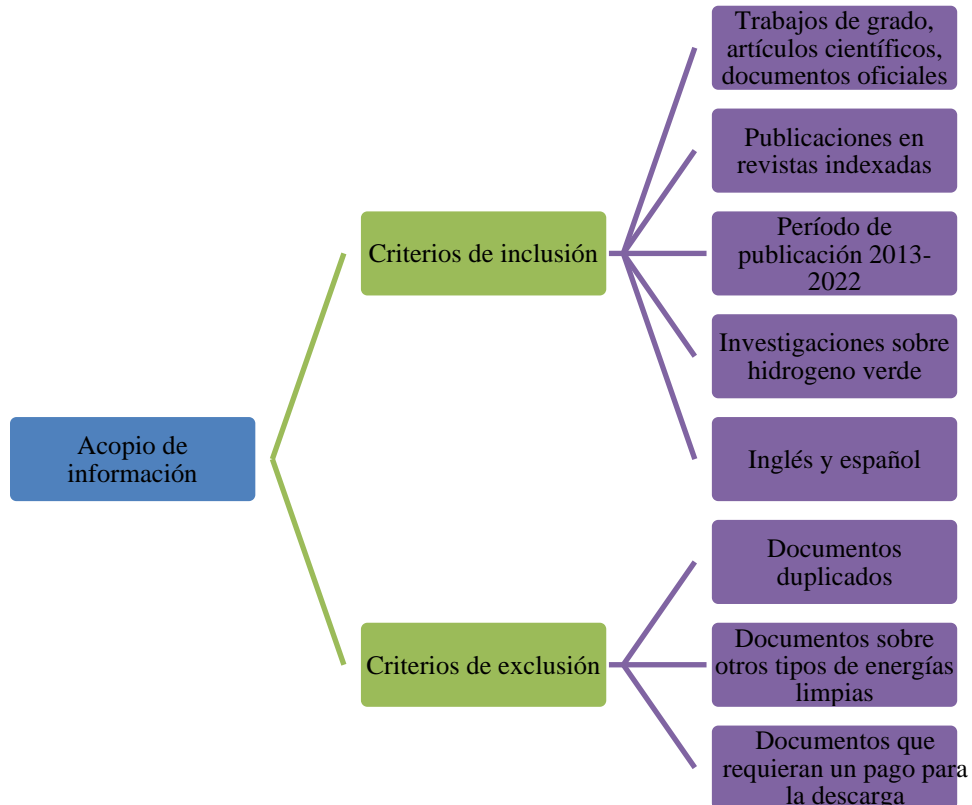
### **3.3 Técnicas de recolección de información**

La revisión de documentos se ejecutó empleando tres técnicas: la primera, la técnica por excelencia de esta modalidad: el fichaje; la segunda, el análisis de contenido; la tercera, la síntesis de la información. La primera técnica se aplicó para la etapa de la recolección de la información y las dos últimas para la etapa del tratamiento mismo.

El fichaje se aplicó a los fines de la recolección lógica y ordenada de datos referidos al tema objeto de estudio (Gallardo, 2007). Para la selección de los documentos que constituyeron el cuerpo teórico de esta investigación se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

**Figura 2.**

*Criterios de inclusión y exclusión de información*



Posteriormente, se aplicó la técnica análisis documental de contenido, la cual condujo al armajo de la estructura esquemática (Pinto y Gálvez, 1996). En ese sentido, la estructura atendió primero al análisis de los documentos seleccionados y luego a la construcción de síntesis de los hallazgos encontrados sobre la temática en estudio. El análisis de contenido se ejecutó siguiendo la propuesta de pasos de Pinto y Gálvez (1996).

### 3.4 Instrumento de recolección de información

Una vez aplicados los criterios de selección y descarte a los documentos que comprenden las unidades de estudio se procedió a elaborar la matriz de información que contenía los aspectos más relevantes de cada uno de los documentos seleccionados, la cual fue elaborada en una hoja de cálculo de Excel, para posteriormente vaciar la información en el formato propuesto por Barbosa, et. al. (2013).

La aplicación de los formatos a las fuentes seleccionadas se realizó en estricto orden de cumplimiento del desarrollo del objetivo específico 1 la de investigación y siguiendo el procedimiento de la técnica resumen analítico que precisa la idea principal y las ideas secundarias en interrelación para establecer conclusiones. El formato descrito se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 2.**

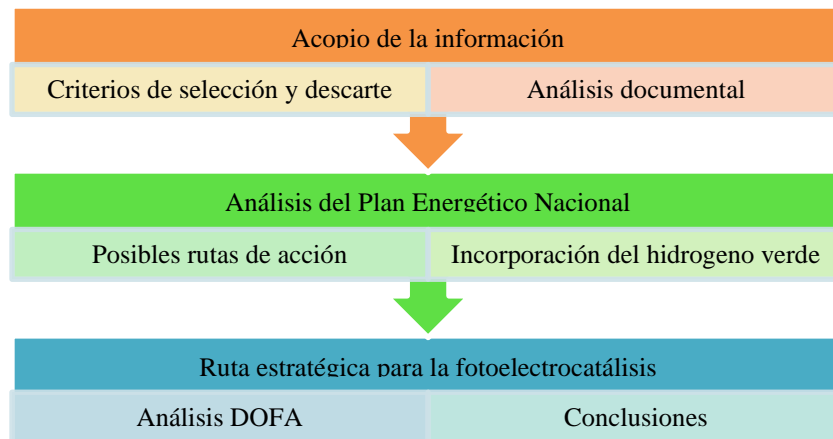
*Formato de revisión documental*

| <b>Datos de diligenciamiento</b> |   |
|----------------------------------|---|
| Número guía                      | Datos descriptivos de la publicación  |
| Fecha de diligenciamiento        |   |
| Título de la publicación         | Tópicos relevantes de la publicación  |
| Fecha de publicación             |   |
| Autor/es                         | Resumen analítico: Tópicos varios de acuerdo a la naturaleza del documento y adecuación a objetivos de la investigación |
| Palabras clave                   |   |

*Nota:* Barbosa, et. al. (2013).

### 3.5 Fases de la investigación

Una vez descritos los aspectos principales de la metodología aplicada de la presente investigación se procede a describir las fases que se aplicaron a lo largo del proceso investigativo, para ello, se ilustra la siguiente figura:

**Figura 3.***Fases de la investigación.*

#### 4. Resultados

En este apartado de la investigación se presenta el desarrollo de los objetivos propuestos, por ello, se estructuró en cuatro apartados; el primero de ellos contiene los principales modelos de obtención de hidrógeno verde identificando sus ventajas y desventajas de tal forma que se puedan determinar las variables relevantes para la incorporación de la foto electrocatalisis en la dinámica nacional.

El segundo apartado contiene un análisis del plan energético nacional donde se presentan los elementos necesarios en pro de la búsqueda y adaptación de energías limpias a partir del hidrógeno verde que pueda favorecer a la demanda energética nacional de una manera sustentable que reduzca las afectaciones en el ambiente por la mitigación de los gases de efecto invernadero y el uso adecuado de los recursos naturales.

En cuanto al tercer y cuarto apartado de la investigación están estructurados con la planeación estratégica de la adaptación de métodos de obtención de hidrógeno verde en pro de la obtención de mejoras en lo que respecta a la producción energética, para ello se presenta un análisis

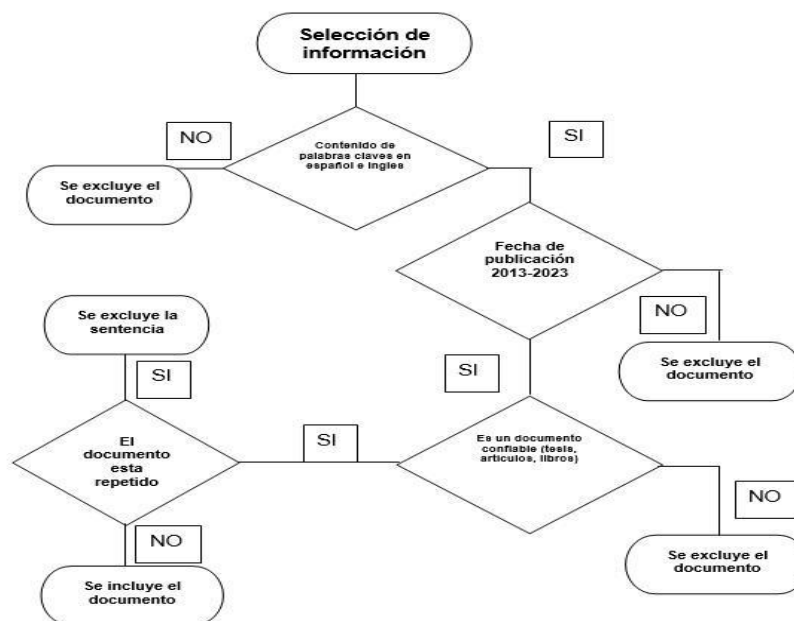
DOFA que permita identificar los aspectos que deben involucrarse en la ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electrocatálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde.

#### 4.1 Principales modelos de obtención de hidrógeno verde

Para el desarrollo de este objetivo se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos en la metodología planteada, el factor diferenciador para la selección de las fuentes de información fueron las palabras claves predeterminadas para la búsqueda documental, las cuales permitieron encontrar la información requerida. Una vez preseleccionados los documentos con la información de interés se procedió a la aplicación de los criterios de selección y descarte, lo que permitió conformar la totalidad de las unidades de estudio, para ello se aplicó el siguiente flujograma que se ilustra en la Figura 4.

**Figura 4.**

*Diagrama de flujo para la selección de información para el análisis de contenido.*



Las bases de datos Scopus, Scielo, Dialnet, Repositorios Universitarios, páginas oficiales de producción y suministro de energías, entre otros, sirvieron como medio para la recolección de fuentes que guardaron relación directa con la temática en estudio, por ello se utilizaron las palabras claves: hidrógeno verde, energías limpias, catálisis, electrocatálisis, fuentes renovables, entre otros; estos buscadores permitieron recopilar las fuentes de información necesaria para el alcance de cada uno de los objetivos de investigación formulados.

Posterior a la búsqueda se procedió a aplicar las macrorreglas selectivas de los documentos encontrados en las bases de datos consultadas, para un total de 78 documentos en la primera etapa de pre selección de información, posterior a ello y al uso de las señalizaciones y el fichaje se obtuvo una reducción en el número de documentos a un total de 26 investigaciones pre seleccionadas como unidades de estudio con el fin de determinar cuántas de ellas conformarán el análisis de contenido, documentos que fueron seleccionados a criterio del investigador, sin embargo, no todos los documentos fueron incluidos en el análisis de contenido, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Matriz de descarte*

| Documentos<br>iniciales | Documentos<br>repetidos | Documentos fuera del<br>periodo de tiempo<br>establecido para el<br>análisis | Documentos que<br>requerían de un<br>pago para la<br>descarga | Documentos<br>publicados<br>sin soporte de<br>verificación | Documentos<br>utilizados<br>para el<br>análisis<br>documental |
|-------------------------|-------------------------|--|---|--|---|
| 78                      | 10                      | 22   | 12  | 8  | 26  |

En la tabla 2 se puede observar que se descartaron un total de 52 documentos luego de aplicar los criterios de selección: pago para la descarga del documento, documentos de producción

de hidrógeno de otro tipo diferentes al estudio, documentos repetidos, entre otros aspectos que generaron la exclusión del documento.

Luego del proceso de descarte, para el desarrollo de los objetivos quedando un total de 26 fuentes bibliográficas que conformaron las unidades de estudio para la realización del análisis de contenido el cual se realizó a través del formato de revisión documental seleccionado como instrumento de recolección de información y a partir del cual se pudieron identificar las categorías principales del estudio. La información de los documentos que conformaron la revisión documental se muestra en la siguiente matriz:

**Tabla 4.**

*Matriz documental*

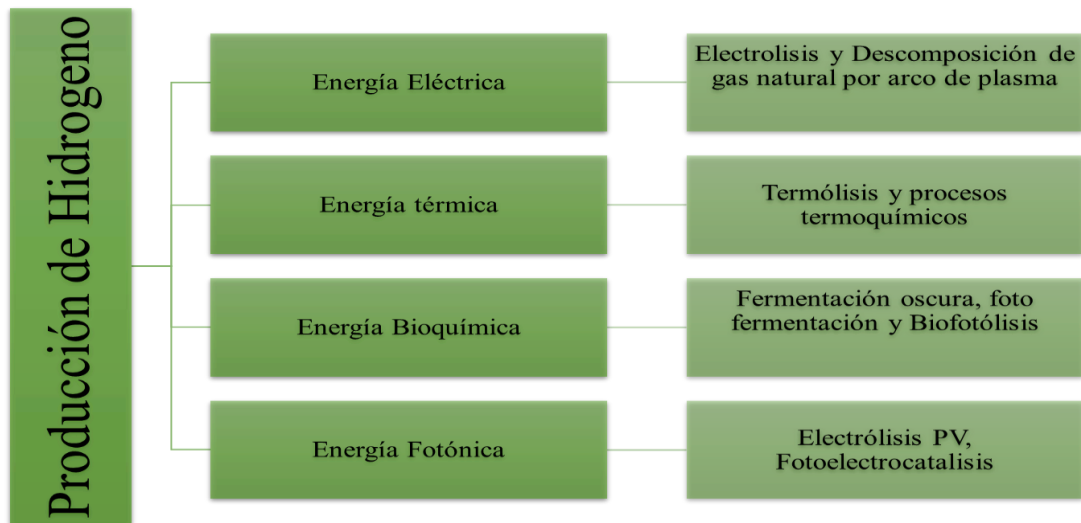
| <b>Año</b> | <b>Documento</b>  | <b>Autor</b>   | <b>Aporte</b>   | <b>idioma</b> |
|------------|-------------------|--|---|---------------|
| 2020       | Informe técnico   | Domenech   | Producción biológica de hidrógeno verde, fermentación oscura, Biofotólisis directa e indirecta  | Español       |
| 2016       | Artículo          | Yunez et al  |   | Inglés        |
| 2013       | Tesis maestría    | Moreno y Vargas  | Descripción de los cuatro métodos de obtención de hidrógeno verde   | Español       |
| 2022       | Tesis pregrado    | Corredor   | Electrolisis  | Español       |
| 2013       | Tesis de pregrado | Miranda  | Métodos de obtención de hidrógeno verde: electrolisis, fermentación oscura, foro fermentación, entre otros métodos donde se describe su funcionamiento, ventajas y desventajas de cada uno de ellos | Español       |
| 2020       | Artículo          | Castiblanco y Cárdenas (2020)  | Diversos métodos de producción de hidrógeno. Estudio comparado  | Inglés        |
| 2015       | Artículo          | Lache  |   | Español       |
| 2022       | Artículo          | Gambou et al   | Electrólisis alcalina y PEM, descripción de los procesos químicos que se generan para la obtención de hidrógeno   | Inglés        |
| 2021       | Trabajo de grado  | Muñoz y Beleño   | Electrolisis como tecnología para la producción de hidrógeno verde, descripción del método y sus diferentes procesos de obtención   | Español       |
| 2020       | Artículo          | Mohammad Ostadi 1, Kristofer Gunnar Paso 1, *, Sandra Rodríguez-Fabia 2, Lars Erik Øi 3, Flavio Manenti 4, and Magne Hillestad | El proceso de la electrólisis para la obtención de hidrógeno verde como método amigable de producción energética a partir de recursos renovables  | Español       |
| 2020       | Tesis             | Pérez  | Diversos métodos de producción de Hidrógeno, información relevante sobre la Termólisis  | Español       |
| 2020       | Tesis             | Roy  | Obtención mediante la Electrólisis del Agua o mediante el Reformado de Gas Natural.   | Español       |

|      |                |   |   |         |
|------|----------------|---|---|---------|
| 2016 | Tesis          | Rivera  | Método de obtención de hidrógeno verde por biofotólisis, foto fermentación  | Español |
| 2016 | Tesis doctoral | Vásquez   | Electro catálisis y fotocátalisis para la producción de hidrógeno a partir de agua  | Español |
| 2018 | Tesis          | Cruz  | Electrólisis alcalina y PEM   | Español |
| 2016 | Artículo       | Yunez et al   | Método fotónico electrolisis PV   | Español |
| 2022 | Artículo       | Sureewan Sittijunda, Sulfan Baka, Rattana Jariyaboon, Alissara Reungsang, Tsuyoshi Imai and Prawit Kongja | Obtención de hidrógeno verde a partir de fermentación oscura  | Inglés  |
| 2018 | Artículo       | Bautista  | Generación de hidrógeno mediante Foto electrocatálisis  | Español |
| 2019 | Artículo       | El-Shafie, M., Kambara, S. and Hayakawa, Y.   | Análisis de las diversas tecnologías para la producción de hidrógeno verde, arco plasma, gasificación, electrolisis, fermentación oscura, entre otros métodos | Inglés  |
| 2018 | Tesis          | Núñez   | Electrólisis como método para la obtención de hidrógeno   | Español |
| 2021 | Tesis          | Ledesma   | Producción de hidrógeno por el método de arco plasma  | Español |
| 2017 | Tesis          | Méndez  | Descomposición por arco plasma para la producción de hidrógeno  | Español |
| 2019 | Tesis          | De la Cruz y Pacheco  | Descomposición por arco plasma para la producción de hidrógeno  | Español |
| 2021 | Artículo       | Brijaldo, et. al.   | Principales Rutas en la Producción de hidrógeno   | Español |
| 2020 | Tesis          | Fuentes   | Producción de hidrógeno a partir de métodos con energía bioquímica  | Español |

Cada uno de los documentos fueron vaciados en el formato y posterior a ello se realizó la identificación y análisis de los hallazgos encontrados en los documentos que formaron parte del análisis, a continuación, en la figura 5 se presentan los aspectos de mayor relevancia encontrada tras la revisión bibliográfica y su posterior desarrollo organizados por subapartados.

### **Figura 5.**

*Modelos de obtención del hidrógeno verde.*



En la siguiente tabla, se muestran las diferentes vías o procedimientos para producir hidrógeno, tomando en cuenta el tipo de energía primaria utilizada y el material empleado como fuente de hidrógeno.

**Tabla 5.**

*Obtención de hidrógeno*

| Método                           | Fuente           |                      | Descripción   |
|----------------------------------|------------------|----------------------|---|
|                                  | Energía Primaria | Material             |   |
| Electrólisis                     | Eléctrico        | Agua                 | Se utiliza corriente continua para llevar a cabo la reacción electroquímica que divide el agua en hidrógeno y oxígeno.                      |
| Descomposición de arco de plasma |                  | Combustibles fósiles | Se hace pasar gas natural a través de un arco de plasma con el fin de producir hidrógeno y carbono negro, una sustancia parecida al hollín. |
| Termólisis                       | División de agua | Agua                 | La ruptura de las moléculas de agua (vapor) mediante calor a temperaturas que superan los 2500 K.   |
|                                  |                  | Agua                 | Se refiere a procesos químicos en los que se produce la división del agua en hidrógeno, y que se llevan a cabo en                           |

|                                  |                         |                   |  |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------|--|
| Procesos termoquímicos           | Térmico                 |                   | ciclos repetitivos para lograr una reacción neta de producción de hidrógeno.   |
|                                  | Conversión de biomasa   |                   | Conversión termo catalítica de la materia orgánica.  |
|                                  | Gasificación            | Biomasa           | Conversión de biomasa en gas de síntesis.  |
|                                  | Reformado               |                   | Conversión de biomasa líquida (biocombustibles) en H <sub>2</sub> .  |
| Electrolisis PV                  |                         |                   | La electricidad se produce a través de paneles fotovoltaicos.  |
| Foto electrocatálisis            | Fotónico                | Agua              | La división del agua en H <sub>2</sub> ocurre mediante la utilización del par electrón-agujero producido por el fotocatalizador. |
| Fermentación oscura              | Bioquímico              | Biomasa           | El hidrógeno se puede producir mediante sistemas biológicos en condiciones de oscuridad.   |
| Electrólisis de alta temperatura |                         |                   | Se emplea la energía eléctrica y térmica de manera conjunta para promover la división del agua a altas temperaturas.             |
| Ciclos termoquímicos híbridos    | Eléctrico/<br>Térmico   | Agua              | Electricidad y calor se combinan para impulsar procesos químicos en un ciclo repetitivo.   |
| Gasificación de carbón           |                         |                   | Conversión de carbón en gas de síntesis.   |
| Reformado de combustible fósil   |                         |                   | Los combustibles fósiles se convierten en H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> .   |
| Biofotólisis                     |                         |                   | Los sistemas biológicos (microbios, bacterias, etc.) Se utilizan para generar H <sub>2</sub> .                                   |
| Fotofermentación                 | Fotónico/<br>Bioquímico | Biomasa +<br>Agua | Proceso de fermentación activado por exposición a la luz.  |
| Fotosíntesis artificial          |                         |                   | Los sistemas de ingeniería química imitan la fotosíntesis para generar H <sub>2</sub> .  |
| Fotoelectrólisis                 | Eléctrico/<br>Fotónico  | Agua              | Los foto-electrodos y la electricidad externa se utilizan para conducir la electrólisis del agua.                                |

Se pueden categorizar las fuentes de energía limpia que se utilizan para producir hidrógeno verde en cuatro grupos: térmico, eléctrico, fotónico y bioquímico. Entre estos grupos, los métodos

fotónicos han despertado mucho interés debido a su naturaleza ecológica. Algunos ejemplos de métodos fotónicos incluyen la fotoelectrólisis, la fotocatalisis y la biofotólisis, entre otros (Dincer, 2012).

#### ***4.1.1 Métodos con energía eléctrica***

**4.1.1.1 Electrólisis.** Este método implica la combinación de reacciones de oxidación y reducción que generan hidrógeno y oxígeno por separado a partir de moléculas de agua (Núñez, 2018). Se basa en aplicar un campo eléctrico externo mayor al campo eléctrico interno de las moléculas de agua, lo que permite separar la molécula y obtener hidrógeno y oxígeno.

Para realizar este proceso, se introducen dos electrodos en una solución acuosa y se les aplica un potencial eléctrico, lo que produce un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para separar los iones  $O^-$  y  $H^+$  en la solución, y de este modo producir gas oxígeno y gas hidrógeno como resultado de su combinación (Corredor, 2022; Miranda, 2013 y Muñoz; Muñoz y Beleño, 2021).

Las fuentes o el origen energético para llevar a cabo este proceso son diversas, en las cuales se pueden encontrar fósiles, petróleo, gas, carbón, energía nuclear, presentando diferente huella de carbono en cada caso (Roy, 2020). Para realizar la electrólisis del agua bajo condiciones estándar, se necesita un mínimo teórico de 237 kJ de energía eléctrica para separar cada molécula de agua (Kelly, 2014). Si se tuviera un electrolizador teórico con una eficiencia del 100%, se requerirían 142 MJ para producir un kilogramo de hidrógeno (Castiblanco y Cárdenas, 2020).

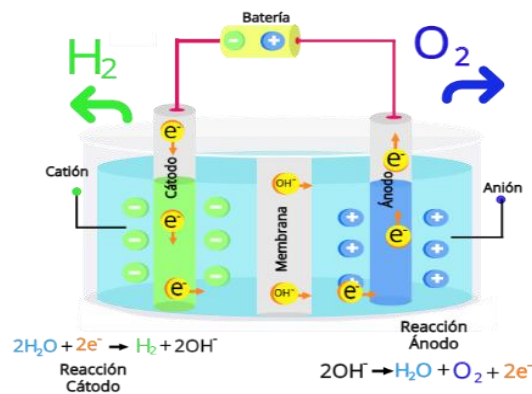
Hay dos tecnologías principales disponibles en el mercado, los electrolizadores alcalinos y los de membrana de intercambio de protones (PEM), las celdas de óxido Sólido (SOEC) y los de membrana de intercambio de aniones (AEM) aún se está investigando antes de su aceptación y

difusión. Para Gambou et. al. (2018) la electrólisis alcalina es el proceso que se realiza a baja temperatura, y presentan rendimientos eléctricos del 62 al 82% y un consumo energético de 4,5 a 7,0 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. El electrolito se basa en una solución líquida que puede ser hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH).

Sin embargo, los fabricantes de electrolizadores alcalinos prefieren usar KOH en lugar de NaOH, ya que una solución acuosa con 25–30% en peso de KOH presenta una conductividad electrolítica específica más alta en un rango de 50 – 80 °C (Cruz, 2018). La figura 6 ilustra el proceso de electrólisis alcalina:

### Figura 6.

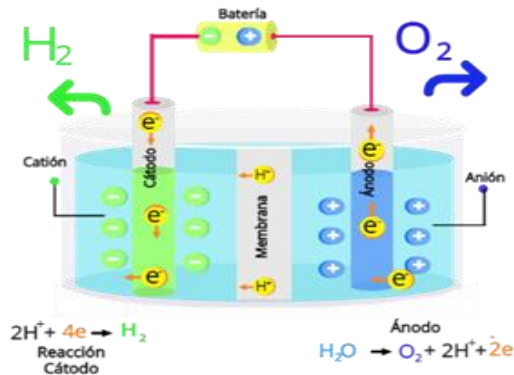
#### *Principio de funcionamiento de electrólisis alcalina*



Por otro lado, la electrólisis puede ser llevada a cabo mediante la utilización de tecnologías de membrana, como la Membrana de Intercambio de Protones (PEM) y la Membrana de Intercambio de Aniones (AEM), las cuales operan a bajas temperaturas y requieren de agua desionizada de alta pureza para la producción (Cruz, 2018). Estos sistemas presentan un rendimiento eléctrico que oscila entre el 67 y el 82%, y un consumo energético de 4,5 a 7,5 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (Roy, 2020). La figura 7 ilustra este proceso.

**Figura 7.**

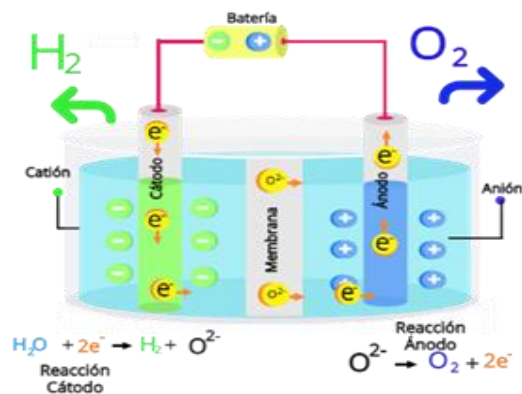
*Principio de funcionamiento de electrólisis PEM*



Por último, se encuentra el proceso de **Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC)** que se realiza a alta temperatura, cercanas a los 1000 °C con sales fundidas: Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) (Gambou, et. al., 2022). Tienen menor consumo energético y la eficiencia por las altas temperaturas aplicadas puede ser del 100% (Cruz, 2018). La figura 8 ilustra este proceso.

**Figura 8.**

*Principio de funcionamiento de electrólisis SOEC*



Al realizar el proceso de revisión sobre el método, se pudo comprender que las principales ventajas y desventajas del mismo son las siguientes:

**Tabla 6.**

*Ventajas y desventajas de la electrólisis*

| <b>Ventajas</b>  | <b>Desventajas</b>           |
|--|------------------------------|
| Al emplearse agua como materia prima no se generan emisiones de CO <sub>2</sub> derivadas de esta fuente sino del origen de la electricidad necesaria para el proceso. | Alto consumo de electricidad |
| Se puede obtener oxígeno de alta pureza como subproducto.  | Baja eficiencia              |
| Utiliza una infraestructura eléctrica de generación y transporte que ya existe.  | Altos costos de inversión    |

**4.1.1.2 Descomposición de gas natural por arco de plasma.** En los procesos de disociación por plasma, se descarboniza el biogás (CH<sub>4</sub>) para descomponerlo en hidrógeno (H<sub>2</sub>) y carbono (C) a nivel molecular (Ledesma, 2021). Este método utiliza un reactor que consta de 3 electrodos y un plasma inyectado que se utiliza en estado ionizado, donde sus electrones se encuentran en estado excitado, y que se utiliza como medio de alta tensión para la descarga (Méndez, 2017). El reactor no quema el metano, sino que simplemente lo divide en sus componentes individuales, evitando las dañinas emisiones de CO<sub>2</sub> (Shafie, et. al., 2019). El metano se descompone en hidrógeno y carbono negro, donde el hidrógeno permanece en forma gaseosa y el carbono se solidifica en hollín.

Producción de hidrógeno reformado por plasmas, los plasmas térmicos se caracterizan por alcanzar temperaturas de 3000-10000°C (De la Cruz y Pacheco, 2019) y pueden ser utilizados para acelerar la cinética de reacciones de reformado sin siquiera utilizar catalizadores, los plasmas son generados por arcos eléctricos, mezclas de reactivos como el metano con vapor o diesel con aire y agua, se alimentan al reactor para producir H<sub>2</sub> (De la Cruz y Pacheco, 2019), entre otros hidrocarburos, en forma de adsorbentes, que son convertidos por las membranas. Posterior a la

revisión del método se pudieron conocer las ventajas y desventajas del mismo, la tabla 7 lo muestra:

**Tabla 7.**

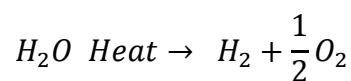
*Ventajas y desventajas del método de descomposición del gas natural por arco plasma*

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
|---|--|
| Flexibilidad de combustible   | Alto consumo de energía eléctrica  |
| El proceso de materia prima heterogénea (RSM) implica el uso de residuos sólidos con una preparación mínima.<br>Carbono casi al 100% de conversión (mayores ingresos ROC).  | Balance energético muy deficiente.<br><br>El gas de síntesis posee menos de la mitad de densidad de energía que el gas natural.                        |
| El gas de síntesis después de tratado su quema es tan limpia como la del gas natural.<br>Disminuir la dependencia de una sola materia prima y maximizar los ingresos utilizando las materias primas disponibles de manera óptima. | Se requiere mano de obra altamente calificada.<br><br>El costo de la electricidad y los materiales que deben soportar altas temperaturas son elevados. |
| Aumenta las tres R (Reducir, Reusar, Reciclar).   | La rápida desactivación de los catalizadores existentes por los depósitos de carbono.  |

#### **4.1.2 Métodos con Energía Térmica**

**4.1.2.1 Termólisis.** Se refiere al proceso de separar un compuesto en dos o más componentes mediante el aumento de la temperatura. En el caso del agua, para lograr una disociación significativa, se necesita una fuente de calor capaz de proporcionar temperaturas superiores a 2500°C (Pérez, 2020).

Este es un proceso reversible, por lo tanto, es necesario realizar un enfriamiento con un gas auxiliar que no sea reactivo con el H<sub>2</sub> con el fin de detener la reacción química y no perder el hidrógeno obtenido (Shafie et al., 2019). Esta reacción puede escribirse de la siguiente manera:



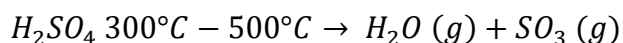
A simple vista, los métodos de termólisis y descomposición termoquímica del agua pueden parecer similares, ya que ambos implican el uso de altas temperaturas como fuente de energía. Sin embargo, la descomposición termoquímica involucra tanto reacciones químicas como procesos de transferencia de calor.

**4.1.2.2 Procesos termoquímicos.** Este proceso se lleva a cabo a través de cuatro formas diferentes, que son la división del agua, conversión de biomasa, gasificación y reformado (Moreno y Vargas, 2013), cada uno de ellos se describe a continuación:

**División del agua:** El proceso de división termoquímica del agua combina la termólisis del agua con reacciones químicas para lograr una reducción en la temperatura necesaria para la descomposición del agua, llegando a ser de 900 °C (Bautista, 2018).

Se han llevado a cabo múltiples investigaciones para explorar los ciclos termoquímicos en la producción de hidrógeno mediante la división del agua. Entre ellos, se han estudiado ciclos como el cobre-cloro, zinc-óxido de zinc, ferrita de níquel-manganeso y el ciclo de azufre-yodo. Este último ha sido objeto de numerosos estudios, como el realizado por El-Shafie, M., Kambara, S., & Hayakawa, Y. (2019):

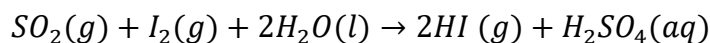
La primera reacción es el ácido sulfúrico que se descompone entre 300°C y 500°C para desprender agua sin catalizador,



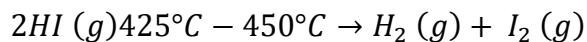
Entonces, el  $SO_3$  es separado entre 800°C y 900°C para liberar oxígeno,



La siguiente reacción se realiza a baja temperatura para producir el ácido sulfúrico,



Finalmente, el hidrógeno se produce a partir de la descomposición del yodo en un intervalo de temperatura de 425°C a 450°C,



El desafío que enfrenta esta tecnología consiste en mejorar su eficacia a través del aumento de la escala (El-Shafie, M., Kambara, S., & Hayakawa, Y, 2019).

Los ciclos termoquímicos de división del agua implican una serie de reacciones químicas en las que se utilizan sustancias intermedias y que se reciclan durante el proceso para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. En teoría, solo se requiere energía térmica para llevar a cabo este proceso. Estos ciclos son una técnica para la producción de hidrógeno que implica la utilización de energía térmica y la recuperación de materiales para su reutilización. Además, no dependen significativamente de catalizadores y solo se consume agua, que es la fuente de hidrógeno, mientras que todos los demás materiales pueden reciclarse (Comedor y Farid, 2020). Algunas de sus ventajas y desventajas son:

**Tabla 8.**

*Ventajas y desventajas de los procesos termoquímicos*

| <b>Ventajas</b>  | <b>Desventajas</b>   |
|--|--|
| No se requiere membrana para la separación $O_2 - H_2$<br>Rangos de temperaturas de 500-1800 °C (en la mayoría de los casos) | La temperatura de trabajo requerida es demasiado alta.<br>Los reactivos son demasiado corrosivos y dañinos para ser utilizados en aplicaciones industriales.   |
| Los TWSC puros no requieren electricidad y los TWSC híbridos requieren poca electricidad.                                    | Los ciclos termoquímicos aún no se consideran competitivos en costos en comparación con los métodos convencionales, mientras que es necesaria una integración adecuada con reactores nucleares o solares concentrados para una mayor mejora. |

Aunque General Atomic ha identificado más de 200 ciclos termoquímicos para la división del agua, se ha demostrado que muy pocos de ellos tienen la capacidad de producir hidrógeno a gran escala y proceder a demostraciones experimentales. El ciclo de Sulfuriodine (SI) es la versión

más famosa y mejor estudiada de estos ciclos y fue propuesto por General Atomics como un proceso prometedor con respecto a la utilización de fuentes de calor nuclear que pueden suministrar calor a temperaturas cercanas a los 900 °C (Cicenergigune., 2022).

**Gasificación:** Es un proceso que convierte la materia orgánica, carbón o biomasa en gas / líquido y sólido a alta temperatura, hasta 700°C, a baja presión y en presencia de agentes gasificantes como el aire, oxígeno o el vapor en condiciones por debajo de la estequiometría de la combustión (Brijaldo, et. al., 2021). El autor describe los beneficios de la gasificación para obtención de hidrógeno son:

- Materias disponibles y abundantes respecto al CO<sub>2</sub>.
- Posibilidad de gestión de residuos (en condiciones especiales) y/o empleo de líquidos renovables como materia prima.
- Tecnología desarrollada aplicable ya desarrollada para gasificación de carbón.
- Tecnología sostenible a largo plazo.

Los desafíos para el escalado de la solución de obtención de hidrógeno son:

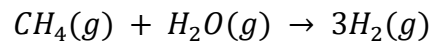
- Altos costes del reactor.
- Alto consumo energético.
- Captura y almacenamiento de carbono posterior
- Rendimiento de hidrógeno fluctuante (30-40%) debido a impurezas en la materia prima (posibilidad de empleo de líquidos renovables).
- Formación de alquitránes, compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otros productos indeseados y contaminantes.

**Reformado de hidrocarburos:** El método más comúnmente empleado para generar hidrógeno es el reformado de hidrocarburos, el cual produce hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros subproductos a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, una

desventaja significativa de este método de producción es que el azufre presente en la mayoría de los hidrocarburos puede afectar negativamente al catalizador utilizado en el proceso (Brijaldo, et al., 2021). Los principales procesos implicados en este método son:

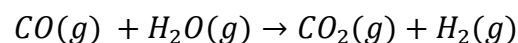
- Reformado del metano con vapor (RMV)
- Oxidación parcial (OP)
- Reformado Autotérmico (RA)

El reformado de vapor (RMV) es un proceso que transforma el metano y vapor de agua en hidrógeno y CO mediante una reacción endotérmica. Por lo general, se lleva a cabo a temperaturas entre 700 y 850 °C y en presiones de 3 a 25 bares. El gas resultante contiene un 12% de CO que puede transformarse en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> mediante su reacción con vapor de agua. La reacción principal de reformado según *Producción de hidrógeno. (s/f)* es:



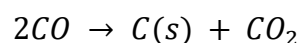
$$\Delta H^\circ (209^\circ K) = 206.14 \text{ KJ/mol}$$

La etapa inicial es conocida como Reacción sin Desplazamiento, en la que se puede obtener una cantidad adicional de hidrógeno al agregar más agua. Este proceso implica la reacción del vapor de agua con el monóxido de carbono a una temperatura menor de alrededor de 130°C.



$$\Delta H^\circ = -41.17 \text{ KJ/mol}$$

En esencia, durante la primera fase del proceso, se separa el átomo de oxígeno (O) del vapor de agua adicional para oxidar el CO y convertirlo en CO<sub>2</sub>. Además, esta oxidación proporciona la energía necesaria para mantener la reacción en marcha. En la segunda fase del proceso se producen reacciones de formación de carbono sólido (no deseado):



Cuando el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) se someten a altas temperaturas (700-1100 °C), se produce syngas, también conocido como gas de síntesis o gas natural sintético. El catalizador utilizado para esta reacción es níquel soportado en alúmina,  $\text{Ni}/\text{AL}_2\text{O}_3$ . Aunque la reacción ocurre a alrededor de 900°C y 20 bares de presión, esta presión no es óptima para lograr una conversión máxima del metano debido a que la estequiometría de la reacción implica un aumento de volumen molar, lo que indica que un aumento en la presión resulta en una disminución de la conversión de equilibrio.

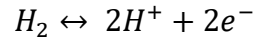
Este método es el más extendido en la producción a gran escala de hidrógeno y se encuentra ampliamente investigado y conocido. Su principal desafío es la transferencia de calor, debido a que la reacción es altamente endotérmica, lo que requiere el uso de grandes y complejos hornos de reformado. Este aspecto, sumado a los costos asociados, hace que el proceso solo sea económicamente viable en caso de grandes producciones.

Se puede decir que una ventaja de este método es que es la principal fuente para la producción de hidrógeno con una eficiencia del 65-75%, además de ser relativamente económico. Sin embargo, su principal desventaja es que se utiliza gas natural, que es una fuente de energía no renovable, y la producción del hidrógeno a través de este proceso resulta en emisiones de  $\text{CO}_2$ . También es importante destacar que la presencia de  $\text{CO}_2$  en el gas producido puede ser problemática en ciertos procesos, por lo que puede ser necesario implementar sistemas adicionales para reducir la concentración de  $\text{CO}_2$  a niveles adecuados.

#### ***4.1.3 Métodos con Energía Bioquímica***

El método bioquímico emplea seres vivos, algas, bacterias y microbios para la producción de hidrógeno que son los encargados de romper las moléculas orgánicas y lograr generar hidrógeno como parte de sus procesos metabólicos. La enzima encargada de producir  $\text{H}_2$  de forma reversible

es la hidrogenasa que se encuentra en estos microorganismos (Miranda, 2013). La reacción presente en este método según Shafie et. al. (2019) es:



La producción de hidrógeno de forma biológica la puede realizar gran variedad de organismos y sus procesos van a diferir según la distinción entre procesos realizados por la luz o independientes de la luz (Domenech, 2020).

**Tabla 9.**

*Procesos de producción de hidrógeno biológico*

| Proceso metabólico     | Organismos              | Enzimas                  | Ligero | Fuente de electrones | Productos                              |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------|----------------------|--|
| Biofotólisis Directa   | Alga verde              | Hidrogenasa              | Si     | H <sub>2</sub> O     | H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>        |
| Biofotólisis Indirecta | Cianobacterias          | Nitrogenasa, Hidrogenasa | Si     | H <sub>2</sub> O     | H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>        |
| Foto fermentación      | Bacterias fototróficas  | Nitrogenasa, Hidrogenasa | Si     | Compuestos Orgánicos | H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>       |
| Cambio Agua-Gas        | Bacterias fototróficas  | Hidrogenasa              | No     | CO                   | H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>       |
| Fermentación Oscura    | Bacterias fermentativas | Nitrogenasa, Hidrogenasa | Si     | Compuestos Orgánicos | H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , AGV |

**4.1.3.1 Fermentación Oscura.** La fermentación oscura es un proceso bioquímico anaeróbico que se realiza en ausencia de luz realizado por bacterias acidogénicas que forma parte del metabolismo de los carbohidratos. En este método las bacterias hidrolizan los polímeros orgánicos complejos, glúcidos, para generar monómeros que se convierten mediante reacciones anaeróbicas en hidrógeno y una mezcla de ácidos orgánicos y alcoholes (Castiblanco y Cárdenas, 2020).

Los tipos de reactores que se utilizan para estas reacciones son: CSTR (continuos stirred tank reactor), UASB (upflow anaerobic sludge blanket biorreactor), ASBR (Anaerobic Sequencing Batch reactor y AF / MBR (Anaerobic Fluidized / Moving bed reactor).

La principal ventaja que presenta este método de producción es la amplia variedad de sustratos que es capaz de transformar en biohidrógeno: desde azúcares sencillos hasta biomasa lignocelulósica, residuos alimenticios y corrientes residuales, o glicerol (Domenech, 2020).

**4.1.3.2 Foto fermentación.** La foto fermentación convierte el sustrato orgánico mediante bacterias fotosintéticas procariotas, algas verdes y cianobacterias. Son reacciones anaeróbicas con presencia de luz. En este proceso no se sintetizan los compuestos a partir de  $\text{CO}_2$ , sino que consumen moléculas del medio como se puede ver en la reacción de la derecha con el metano ( $\text{CH}_4$ ) (Sittijunda, et. al., 2022).

Otros organismos que fijan el nitrógeno son las bacterias púrpuras no del azufre que consumen ácidos orgánicos volátiles que se producen en la fermentación oscura con lo que ambos procesos pueden desarrollarse en serie para optimizar la producción de biohidrógeno liberando  $\text{CO}_2$  a la atmósfera (Fuentes, 2020).

**4.1.3.3 Biofotólisis.** En el proceso natural de la fotosíntesis los organismos absorben energía de la luz y la transforman en energía química en los enlaces de las moléculas orgánicas, principalmente azúcares. Las células utilizan el dióxido de carbono y electrones presentes en el entorno, junto con la luz, para llevar a cabo su proceso metabólico. Son, de esta manera, autótrofos. En el contexto, las cianobacterias y microalgas verdes poseen la enzima hidrogenasa que produce hidrógeno como parte de estas reacciones metabólicas.

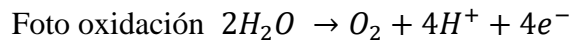
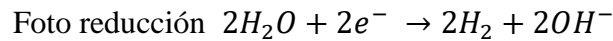
Sin embargo, la enzima hidrogenasa se inhibe en la presencia de oxígeno es por ello que las algas, en condiciones aeróbicas, no producen  $H_2$ , y carecen de esta enzima. En condiciones anaeróbicas, sintetizan de nuevo la hidrogenasa y cambian al metabolismo productor de  $H_2$ . Esta capacidad hace que sea posible diseñar el proceso de generación en dos pasos para optimizar la producción de hidrógeno: En la primera etapa la célula produce  $O_2$  por fotosíntesis y acumula carbono en forma de biomasa. En la segunda etapa anaerobia, las algas consumen metabolitos celulares y producen  $H_2$ . La separación de las etapas se realiza controlando el azufre inorgánico como nutriente. La biofotólisis puede darse de manera directa o indirecta mediante un proceso previo donde el  $CO_2$  se fija a sustratos.

Este proceso puede llevarse a cabo de forma directa mediante microalgas que son capaces romper la molécula de agua en paso mediante enzimas hidrogenasas y luz para obtener hidrógeno y oxígeno e indirecta donde las cianobacterias y alga verde-azules fijan el  $CO_2$  en el proceso de fotosíntesis a sustratos ricos en hidrógeno endógeno que luego es liberado en un segundo paso, biofotólisis indirecta, cuando los microorganismos se incuban en condiciones anaeróbicas.

#### ***4.1.4 Métodos con energía fotónica***

**4.1.4.1 Electrolisis PV.** De acuerdo con Venegas, et. al. (2016), es uno de los métodos de producción de hidrógeno más caros; aproximadamente 25 veces mayor que la de las alternativas de combustibles fósiles. La fotocatalisis convierte la energía fotónica en energía química. Cuando un fotón incide en el fotocatalizador, se produce la generación de un par electrón-hueco, lo cual resulta en la obtención de carga eléctrica que se emplea para separar el agua. Para que un fotocatalizador sea capaz de descomponer el agua y producir hidrógeno, es necesario que tenga una brecha de banda adecuada, así como las bandas de conducción ubicadas de manera correcta

para llevar a cabo reacciones de oxidación/reducción. Estas reacciones se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones:



Las celdas fotoelectroquímicas (PEC) transforman la energía solar en un conductor de energía mediante el uso de la luz para incitar procesos electroquímicos, logrando que los dos procesos se combinen en una sola unidad. La producción de hidrógeno mediante la electrólisis en estas celdas resulta en una huella de carbono aproximadamente nula, debido a que proviene de medios de energía limpia. Esto significa que tanto la producción como el consumo de hidrógeno no generan emisiones gaseosas perjudiciales para el medio ambiente.

De acuerdo con Polanco (2018, p. 14), en el proceso de electrólisis se pueden identificar diversas etapas:

- **Ionización:** Esta etapa inicial consiste en la disolución del compuesto antes de entrar en contacto con la corriente eléctrica.
- **Orientación:** Una vez que la corriente eléctrica está activa, los iones, en función de su carga ya sea positiva o negativa, se desplazan hacia el cátodo y el ánodo respectivamente.
- **Descarga:** En esta fase, los aniones ubicados en el ánodo liberan electrones, en tanto los cationes presentes en el cátodo adquieren electrones.

En la Tabla 10 se muestran las ventajas y desventajas de la electrólisis PV.

**Tabla 10.**

*Ventajas y desventajas de la electrólisis PV.*

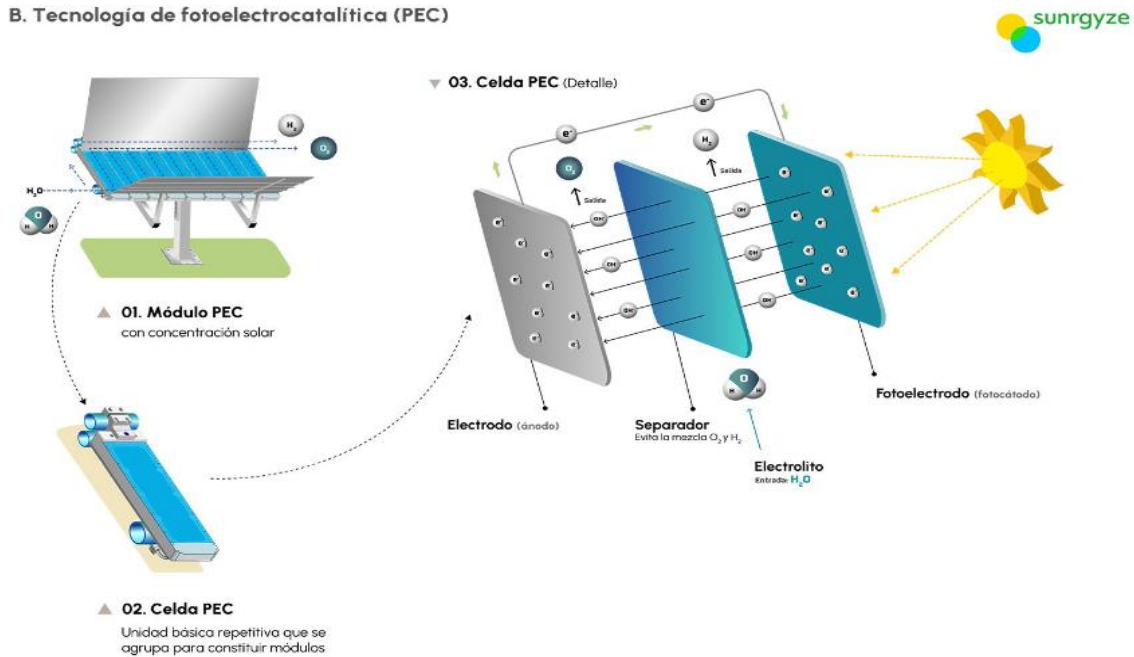
| <b>Ventajas</b>                                     | <b>Desventajas</b>                            |
|---|---|
| - Producción 25 veces mayor que los fósiles.        | - Procedimiento costoso                       |
| - Es la fuente más abundante de energía renovable.  | - Baja eficiencia de captura de energía       |
| - Fuente de energía en forma de calor y luz.        | - Alto nivel de fluctuaciones del flujo solar |
| - Libre disposición en diferentes partes del mundo. | - Dependiente de las estaciones del país.     |

- 
- Sistema compacto, de una sola unidad.
  - Huella de carbono nula.
- 

**4.1.4.2 Foto electrocatálisis.** Una de las formas de obtención de hidrógeno renovable, o verde es a partir de electricidad renovable, mediante la fotoelectrocatalisis, que es un proceso en el cual se utiliza el agua como materia prima y se hace la descomposición para obtener hidrógeno y oxígeno (Monllor, 2010).

La fotoelectrocatalisis es un proceso fotoquímico que convierte la energía solar en energía química a través de un catalizador que utiliza la luz solar. Según Caravantes y Carbajal (2022), su objetivo es descomponer la molécula de agua en  $H_2$  y  $O_2$ , similar al proceso de electrólisis, pero con la diferencia de que utiliza directamente la energía luminosa del sol. Fernández et al. (2021) señala que el método más común para producir hidrógeno mediante la descomposición del agua utilizando luz solar es con el uso de celdas fotoelectroquímicas, que combinan la celda solar y la electroquímica en una sola etapa, lo que puede aumentar la eficiencia y reducir los costos de material debido a que ocupan menos espacio.

**4.1.4.2.1 Configuración del sistema.** En un único dispositivo se lleva a cabo la reacción que genera electricidad e hidrógeno, lo que proporciona al proceso una mayor eficiencia energética en comparación con otras opciones que también utilizan la energía solar. Según Medina (2022), esto no solo reduce los costos de inversión, sino que también permite alcanzar mayores eficiencias en el proceso, ya que elimina las pérdidas asociadas a la conversión de corriente continua a alterna, el transporte de energía desde el lugar de producción hasta el electrolizador, la conversión de alterna a continua y las pérdidas inherentes al proceso de electrólisis. Estas ventajas permiten obtener un costo de generación de hidrógeno renovable más competitivo que otras tecnologías. Esto se puede ver en la siguiente figura:

**Figura 9.***Proceso de foto electrocatálisis*

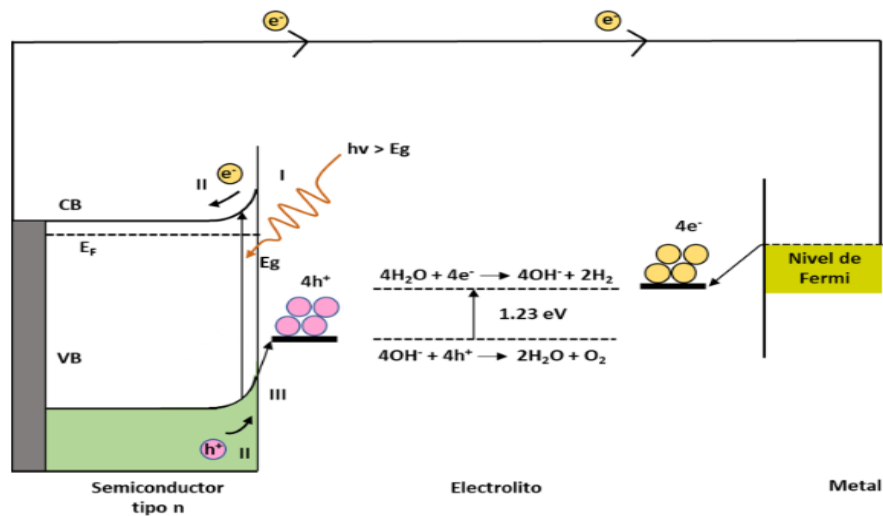
*Nota:* Sunryze – Fotoelectrocatalisis (s. f.).

El proceso tecnológico se basa en la combinación de procesos electroquímicos en los que se utiliza un semiconductor. Este material cuenta con tres regiones diferentes en su estructura de energía electrónica: la banda de valencia (VB), la banda de conducción (CB) y la anchura de banda prohibida. Cuando la VB está completamente llena de electrones, el semiconductor se comporta como aislante, mientras que la CB está completamente vacía. Al ser irradiado con luz, si la energía de la luz es mayor que la anchura de banda prohibida del semiconductor, los electrones se transfieren desde la VB a la CB, generando así pares electrón-hueco ( $e^-/h^+$ ), los cuales llevan a cabo reacciones de oxidación y de reducción. Los huecos oxidan la molécula de agua a protones y  $O_2$ , y los electrones reducen los protones liberados a hidrógeno. Durante el proceso, el electrón

llega a la superficie del fotocatalizador, reacciona y lleva a cabo el proceso fotocatalítico, en el cual se irradia el agua con luz, el catalizador promueve una reacción y se obtiene el hidrógeno. En la figura 10 se muestra el mecanismo de funcionamiento de la rotura de la molécula de agua en una celda fotoelectroquímica, utilizando un fotocatalizador como ánodo y un metal como cátodo.

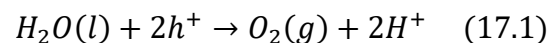
### Figura 10.

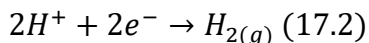
*Mecanismo de funcionamiento de la foto electrocatálisis*



*Nota:* Fernández, et al. (2021)

Según Fernández, et al. (2021), este proceso implica la generación de pares electrón/hueco en el semiconductor cuando la luz incide en el fotoánodo. Para evitar que estos pares se recombinen, se aplica un potencial o bias que facilita la separación de cargas. Los huecos generados por la luz oxidan el agua y producen oxígeno gaseoso (Ecuación 17.1), mientras que los electrones son transportados hacia el cátodo por medio de un circuito externo, donde se reduce el agua y se forma el hidrógeno gaseoso. (Ecuación 17.2).





**Módulo PEC:** Según Wang, Wang, & Yan (2021), el módulo PEC se compone de un sustrato, una capa de absorción de luz, una capa de transferencia de carga, un catalizador y un electrolito. El sustrato es generalmente una placa conductora, como un vidrio conductor o una lámina de metal, que proporciona una base para el resto de los componentes. La capa de absorción de luz es la capa donde se produce la excitación de los electrones por la luz solar. La capa de transferencia de carga se utiliza para transportar los electrones excitados hacia el catalizador. Por otro lado, según Monllor-Satoca et al. (2021), el diseño del módulo PEC debe ser cuidadosamente considerado para maximizar su eficiencia

La celda PEC (Fotoelectroquímica) permite la conversión de la energía solar en energía química. El fotoánodo está compuesto por un semiconductor que absorbe la luz solar y genera electrones y huecos. Los electrones fluyen hacia el fotocátodo a través del circuito externo, mientras que los huecos se transfieren al electrolito. En el fotocátodo, los electrones y los huecos se reúnen para formar hidrógeno o algún otro producto químico. La celda PEC también puede incluir un contraelectrodo para cerrar el circuito y facilitar la reacción química en el fotocátodo. Según Chong y Bae (2019), la eficiencia de la celda PEC puede verse afectada por varios factores, como la composición y la estructura del fotoánodo y el fotocátodo, la calidad del electrolito y la geometría de la celda.

Liu et al. (2019) describen los componentes básicos de la tecnología fotoelectrocatalítica (PEC) para la producción de hidrógeno. Los componentes incluyen un fotoelectrodo, un electrolito, un separador y un contraelectrodo. El fotoelectrodo consta de un semiconductor con una estructura de banda adecuada, y a menudo se utiliza dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en combinación con un fotocatalizador. El electrolito se usa para proporcionar iones para la reacción electroquímica y mantener la carga eléctrica equilibrada entre el fotoelectrodo y el contraelectrodo.

El separador se utiliza para evitar la mezcla entre el electrolito y los gases producidos durante la reacción. El contraelectrodo proporciona electrones adicionales para equilibrar la carga eléctrica y completa la celda electroquímica.

**4.1.4.2.2 Fotocatalizador.** En su investigación, Fernández, et al. (2021) examinaron dos tipos de materiales como fotocatalizadores: semiconductores y nanopartículas con resonancia de plasmón de superficie localizada. Según el autor, se han evaluado más de 130 materiales semiconductores, incluyendo óxidos metálicos, nitruros y sulfuros, para su uso como fotocatalizadores en celdas fotoelectroquímicas con el objetivo de lograr la rotura fotoelectrocatalítica de la molécula de agua. Entre estos el  $\text{TiO}_2$  ha sido el más estudiado, pero en las últimas décadas está creciendo el interés en otros óxidos semiconductores de tipo n como el ZnO, el  $\text{WO}_3$  o el  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ .

En *Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica* consideran que se deben tener en cuenta las siguientes características al momento de elección y el diseño de un fotocatalizador eficiente:

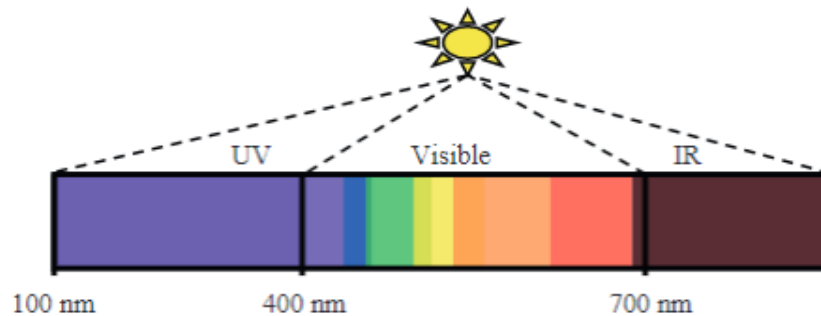
- **Energía de banda prohibida ( $E_g$ ):** La energía de banda prohibida, también conocida como band gap, es un parámetro crucial de los fotocatalizadores, ya que es la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado a un estado libre, lo que permite su conducción. Se define como la diferencia de energía entre el nivel de energía más bajo de la banda de conducción (CB) y el nivel más alto de la banda de valencia (VB) en un semiconductor. La relación entre la longitud de onda de los fotones de la luz ( $\lambda$ ) y su energía viene dada por la siguiente ecuación, donde  $\nu$  es la frecuencia,  $h$  es la constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s) y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>).

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Para que los electrones se exciten desde la banda de valencia (VB) de un semiconductor a la banda de conducción (CB), se requiere una energía mayor a la energía de la banda prohibida. La ecuación muestra que el semiconductor absorberá luz con longitudes de onda inferiores a la energía de la banda prohibida o gap. Por lo tanto, el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), con una energía de banda prohibida de 3,2 eV, absorberá toda la luz con una longitud de onda inferior a 388 nm, correspondiente a la radiación UV del espectro solar, mientras que la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), con una energía de banda prohibida de 2,1 eV, absorberá la luz con una longitud de onda inferior a 590 nm, que corresponde a parte de la luz visible y a la región UV del espectro, como se muestra en la figura 11.

### Figura 11.

*Espectro de la luz solar*

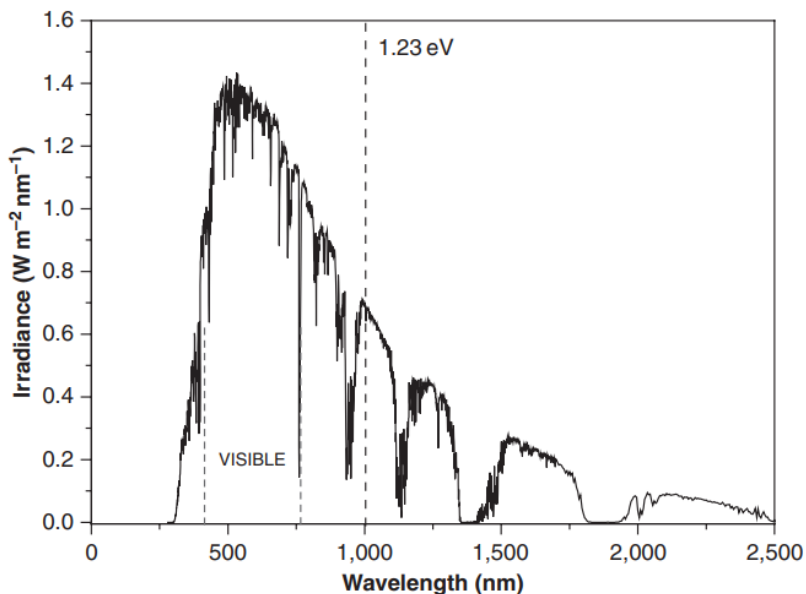


*Nota:* Fernández, et al. (2021)

La Figura 12 ilustra la distribución espectral de la irradiancia solar global representativa para la Atmósfera Media (AM), que es una medida del camino óptico de la luz solar a través de la atmósfera. AM 0 representa la luz solar extraterrestre, AM 1 se refiere al sol en el cenit y AM 25 se refiere a un sol poniente o naciente.

**Figura 12.**

*La energía de radiación en función de la longitud de onda del fotón de la irradiación espectral solar (AM 1,5).*



*Nota:* (Navarro et al., 2009)

Navarro et al. (2009) describe que, para lograr la división del agua, se necesita una energía mínima de 1,23 eV por fotón. Esta energía se corresponde con un fotón de alrededor de 1.010 nm de longitud de onda, lo que implica que el 70% de los fotones solares teóricamente están disponibles para la división del agua. Además, es necesario que el fotocatalizador tenga una estructura de banda óptima para aprovechar eficientemente la energía luminosa, que debe estar cerca de la energía de los fotones de la región visible (2,0-2,4 eV), pero mayor que los 1,23 eV del SHE. Para lograr la disociación del agua, se requiere un band-gap de energía superior a 1,23 eV, y el valor de 2,0-2,4 eV es la energía correspondiente al espectro visible de la luz. También se deben considerar las pérdidas de energía debido a factores como la pérdida termodinámica ocasionada por el cambio de entropía, el flujo de los portadores de carga (electrones/huecos) en la

superficie del fotocatalizador, la recombinación de los pares electrón-hueco y las pérdidas cinéticas, entre otras.

La energía de la banda prohibida en un semiconductor es esencial para realizar la reacción redox en una celda fotoelectroquímica. Por lo tanto, su valor debe ser adecuado para permitir la absorción de fotones de longitudes de onda mayores, pero también lo suficientemente alto para lograr la reacción redox deseada.

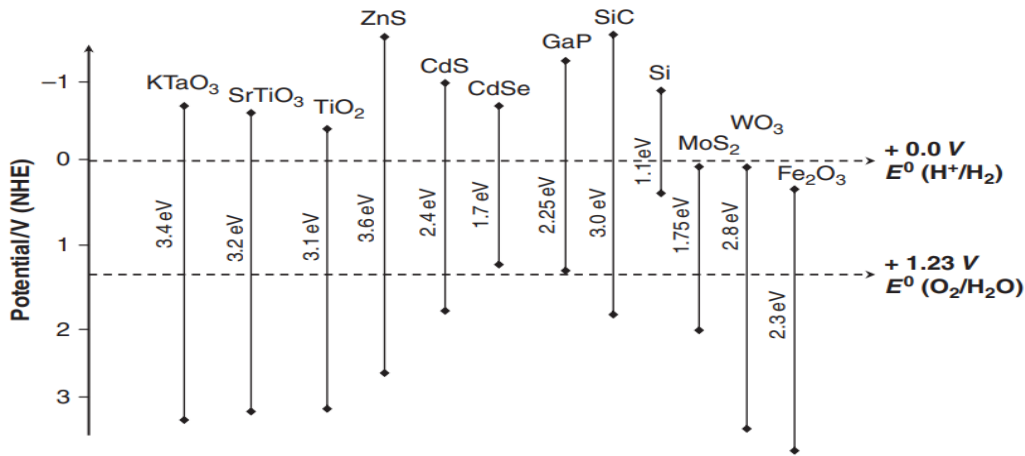
- **Posiciones de banda apropiadas:** Fernández, et al. (2021) explican que además de la energía de banda prohibida, la posición de la banda de conducción y de la banda de valencia del fotocatalizador debe ser compatible con el potencial redox de la reacción deseada. El potencial de reducción de la reacción debe ser menor que el borde inferior de la banda de conducción, para que el electrón pueda transferirse de la banda al electrolito. Del mismo modo, el potencial de oxidación de la reacción debe ser mayor que el borde superior de la banda de valencia del fotocatalizador, para que los huecos fotogenerados puedan transferirse desde la banda al electrolito.

En la fotoelectrólisis del agua, se requiere un potencial redox específico para la evolución del hidrógeno y del oxígeno. El potencial para la evolución del hidrógeno es de 0 eV ENH, mientras que el potencial para la evolución del oxígeno es de 1,23 eV ENH. Por lo tanto, en un fotocatalizador adecuado para la rotura fotoelectrolítica del agua, la CB debe estar por encima del potencial de evolución del hidrógeno, es decir, a potenciales más negativos que 0 V ENH, mientras que la VB debe estar por debajo del potencial de evolución del oxígeno, a potenciales más positivos que 1,23 V ENH.

En la figura 13 se presenta la información sobre la energía de banda prohibida y la ubicación de las bandas de conducción y valencia en relación al electrodo normal de hidrógeno para ciertos semiconductores utilizados como fotocatalizadores.

**Figura 13.**

La energía de banda prohibida y la posición de las bandas relativas de varios semiconductores se muestran en relación con los potenciales de oxidación/reducción del agua (NHE)



Nota: (Navarro et al., 2009)

Por lo tanto, según la posición de las bandas en la Figura 13 que muestra los potenciales (NHE) para procesos de oxidación/reducción del agua de varios semiconductores, se puede concluir que KTaO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnS, CdS y SiC son los semiconductores que cumplen con los requisitos termodinámicos para la división general del agua.

- Potencial de banda plana (EFB):** El potencial de banda plana se define como la cantidad de energía eléctrica necesaria para evitar el doblamiento de las bandas de un semiconductor en contacto con una solución electrolítica, el cual se produce debido a una diferencia de potencial en la interfaz. Según (En, M., Juan, E. Q., & Rocha, M.), cuando un semiconductor de tipo n es colocado en contacto con un medio electrolítico, se produce un desplazamiento de los bordes de banda debido a las diferencias de energía entre los niveles de Fermi del semiconductor y del medio electrolítico. Esto conduce a la separación de los portadores de carga mayoritarios y minoritarios, creando una región de carga espacial cerca de la superficie

del semiconductor y un campo eléctrico asociado a la diferencia de potencial entre la superficie y el interior del material. Este proceso de separación de cargas se detiene cuando se alcanza un nuevo estado de equilibrio, donde la diferencia energética entre los niveles de Fermi se anula y se produce el doblamiento de las bandas cerca de la superficie del semiconductor.

El valor del potencial de banda plana indica la eficacia de un fotoelectrodo. En una celda fotoelectroquímica, cuanto menor sea la diferencia entre el potencial de inicio de fotocorriente y el potencial de banda plana del fotoelectrodo, menor será el potencial necesario para lograr una separación efectiva de las cargas y minimizar la recombinación de pares electrón-hueco, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia de la celda.

- **Conductividad eléctrica y transferencia de carga:** Para lograr una efectiva separación de cargas y reducir la recombinación, es esencial que el transporte de electrones y huecos en el semiconductor sea eficiente. La conductividad eléctrica del semiconductor de óxido metálico se puede ajustar al variar los defectos en su estructura cristalina. La densidad de estos defectos, que generalmente consisten en vacantes de oxígeno y elementos intersticiales, debe ser lo suficientemente alta para mejorar la conductividad del material, pero no tanto como para aumentar la recombinación de portadores de carga y afectar negativamente la eficiencia del fotocatalizador.

- **Conductividad eléctrica y transferencia de carga:** Los fotoelectrodos deben ser capaces de resistir la exposición prolongada al electrolito y a las condiciones operativas de la celda fotoelectroquímica, siendo estables en ambos aspectos. Para la fotodisociación del agua, se requieren ciertas propiedades semiconductoras y electroquímicas en los fotocatalizadores, según lo explicado por Navarro et al. (2009): (i) capacidad de absorción adecuada de la luz solar visible, con una banda prohibida de alrededor de 2,0-2,2 eV y potenciales de borde de banda adecuados para la división general del agua, (ii) capacidad para separar los electrones fotoexcitados de los

huecos reactivos, (iii) minimización de pérdidas de energía relacionadas con el transporte y recombinación de cargas fotoexcitadas, (iv) estabilidad química para resistir la corrosión y fotocorrosión en ambientes acuosos, (v) propiedades adecuadas de transferencia de electrones desde la superficie del fotocatalizador al agua y (vi) facilidad de síntesis y bajo costo de producción.

Algunos materiales que se utilizan como fotocatalizadores en la fotoelectrocatalisis incluyen:

- **Dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ):** Fernández et al. (2021) describe un catalizador de semiconductor tipo "n" que ha sido ampliamente estudiado debido a sus características prometedoras. El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) tiene ocho fases cristalinas, pero sólo las fases rutilo y anatasa han sido estudiadas en detalle. La anatasa ha demostrado tener una mejor actividad fotocatalítica, aunque el rutilo es la fase más estable desde el punto de vista termodinámico. El  $\text{TiO}_2$  tiene una energía de banda prohibida alta, 3,2 eV en la anatasa y 3,0 eV en el rutilo, y la posición de sus bandas en relación con el potencial redox permite utilizar la luz para la rotura efectiva de la molécula de agua y la producción de hidrógeno. Además, el  $\text{TiO}_2$  es químicamente estable y resistente a la fotocorrosión. Sin embargo, debido a su elevada energía de banda prohibida, el  $\text{TiO}_2$  solo absorbe la luz ultravioleta, lo que representa aproximadamente el 5% del espectro solar y limita su eficacia como catalizador en la producción de hidrógeno.

- **Trióxido de wolframio ( $\text{WO}_3$ ):** Otro semiconductor de tipo n es el óxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), cuya estructura cristalina varía con la temperatura, aunque la fase monoclinica entre 17 y 330 °C es la más común. El valor de su energía de banda prohibida,  $E_g$ , oscila entre 2,5 y 2,7 eV, lo que es menor que el de  $\text{TiO}_2$ , lo que da lugar a una mayor eficiencia bajo la irradiación de luz visible. Esto se debe a su facilidad para formar pares electrón-hueco.

- **Hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ):** La hematita, una forma de óxido de hierro, tiene una anchura de banda de prohibición de alrededor de 2,1 eV, lo que indica su capacidad para absorber la luz visible hasta alrededor de 590 nm, lo que equivale a aproximadamente el 40% de la energía del espectro solar. A pesar de tener algunas desventajas como la baja movilidad de portadores y la corta longitud de difusión de huecos, estas deficiencias se pueden corregir mediante la nanoestructuración de la hematita. La obtención de nanoestructuras aumenta la superficie del semiconductor y proporciona rutas alternativas para los electrones y huecos generados por la luz, lo que mejora el comportamiento fotoelectroquímico de la hematita. Existen varias nanoestructuras de  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  como nanopartículas, nanotubos, nanobarras, nanoorquídeas y nanohojas, entre otras. Específicamente, las nanoestructuras tubulares son muy interesantes ya que mejoran la movilidad de electrones y huecos.

**4.1.4.2.3 Almacenamiento.** El almacenamiento del hidrógeno producido mediante la fotoelectrocatalisis es uno de los desafíos actuales en este campo. Una opción común es en forma de gas comprimido en cilindros o en forma líquida en tanques criogénicos. Sin embargo, estas opciones tienen limitaciones en términos de costo, seguridad y transporte. Según (Morante, J., et al.) hay varios sistemas de almacenamiento de hidrógeno que almacenan energía durante largos períodos de tiempo sin pérdidas sustanciales con el tiempo. Sin embargo, el principal desafío para dicho almacenamiento radica en la baja densidad por unidad de volumen en comparación con la alta energía por unidad de masa. Esto se debe a que la consideración principal al almacenar productos es el volumen que estos ocupan, no la masa. Por lo tanto, se utilizan diversos métodos para aumentar la densidad volumétrica, tales como la licuefacción y la condensación.

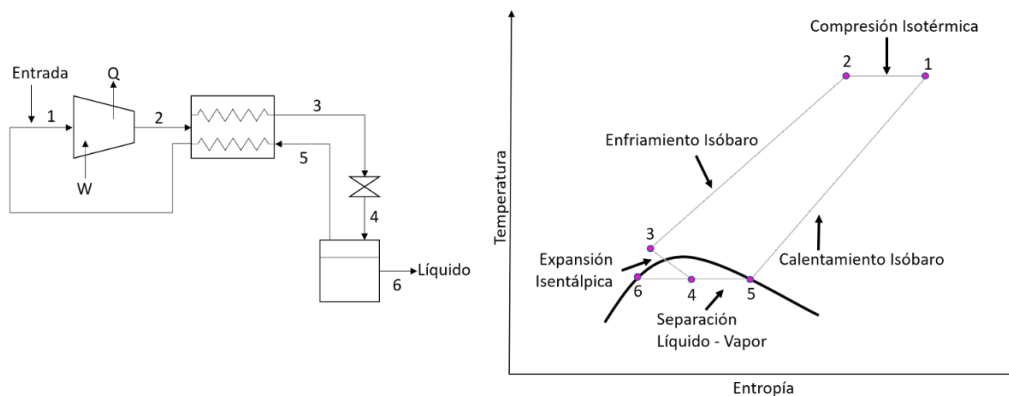
Otras opciones incluyen el almacenamiento en materiales de almacenamiento sólidos como hidruros metálicos, carbono activado, zeolitas y otros materiales porosos. Estos materiales tienen

la ventaja de tener una alta capacidad de almacenamiento de hidrógeno y pueden liberarlo cuando se necesita. Sin embargo, también tienen desventajas, como la necesidad de altas temperaturas para liberar el hidrógeno y la pérdida de capacidad de almacenamiento con el tiempo debido a la formación de aglomerados o la reducción del área superficial.

- Licuefacción:** Según Cancino Silva (2021), la licuefacción es un proceso que convierte el gas en líquido a través de cambios en la presión y temperatura, utilizando intercambiadores de calor, compresores y válvulas de expansión para enfriar y producir el líquido. El gas enfriado se devuelve al compresor mediante intercambiadores de calor, mientras que el líquido resultante se desecha. Los ciclos de licuefacción del hidrógeno se clasifican en dos grupos principales: ciclos de Claude y ciclos de Linde Hampson. Estos ciclos presentan algunas diferencias importantes, como el uso de expansores en el primer ciclo y de válvulas de expansión en el segundo. El ciclo de Linde-Hampson o ciclo de expansión de Joule-Thompson se considera el más sencillo de los ciclos de licuefacción, como se ilustra en la figura 14. Además, los resultados del proceso muestran que es posible cumplir simultáneamente tres requisitos principales: alta eficiencia, estabilidad y bajo costo.

**Figura 14.**

*Modificación del Diagrama de flujo y gráfico temperatura-entropía ciclo Linde-Hampson.*



*Nota:* Adaptado de (Morante et al., 2020)

En este proceso el gas primero se comprime isotérmicamente a temperatura ambiente ( $1 \rightarrow 2$ ), luego se enfría a presión constante dentro de un intercambiador de calor ( $2 \rightarrow 3$ ) y finalmente se expande isentálpicamente ( $3 \rightarrow 4$  y  $4 \rightarrow 5$ ). El gas se licua y el resto pasa por el intercambiador de calor de regreso al compresor para completar el ciclo  $5 \rightarrow 1$ .

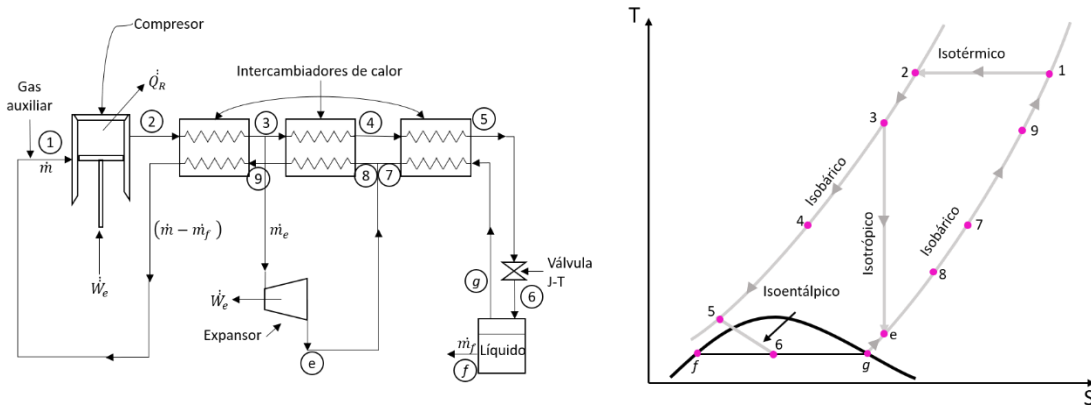
Según Cancino Silva (2021), el ciclo de Linde Hampson se basa en la expansión de gases como el nitrógeno que se enfrían a temperatura ambiente. Sin embargo, el hidrógeno se calienta durante la expansión a temperatura ambiente. Para enfriar el hidrógeno gaseoso en expansión, es necesario que su temperatura esté por debajo de la temperatura de inversión de 202 K ( $-95\text{ °C}$ ). Para lograr esto, los procesos modernos de licuefacción utilizan nitrógeno líquido para preenfriar el hidrógeno gaseoso a una temperatura inferior a 78 K ( $-319\text{ °C}$ ) antes de expandirlo a través de la válvula (conocido como ciclo de preenfriamiento con Linde-Hampson). El nitrógeno gaseoso se recicla en un ciclo continuo de refrigeración.

Según Cancino Silva, R. (2021), en la licuefacción de hidrógeno a gran escala, la mayoría de los procesos se basan en el ciclo de Claude, donde el hidrógeno se utiliza como tanto como fluido de trabajo y como producto. En la Figura 16 se muestra cómo uno o varios intercambiadores de calor disminuyen la temperatura del fluido de trabajo y una válvula Joule-Thomson fuerza al fluido a pasar a dos fases una vez que se elimina el líquido saturado del circuito. La entrada de gas en el extremo caliente mantiene constante la masa de hidrógeno en el sistema. Los cambios en el ciclo de Claude incluyen un segundo compresor. El primero comprime hidrógeno de baja a media presión, el segundo de media a alta presión. En consecuencia, el expansor trabaja entre media y baja presión, enfriando aún más el gas de alta presión a través de su salida. A menudo se usa una variación de este sistema en grandes plantas de licuefacción de hidrógeno, combinada con

preenfriamiento con nitrógeno, múltiples catalizadores de conversión y generalmente dos o tres expansores.

**Figura 15.**

*Diagrama de flujo y gráfico temperatura-entropía ciclo Claude*



*Fuente:* Adaptado de (Morante et al., 2020)

La licuefacción es una forma efectiva de almacenar grandes cantidades de hidrógeno debido a que la densidad de energía es muy alta en comparación con otros métodos de almacenamiento como el almacenamiento de gas comprimido o la absorción en materiales porosos. Sin embargo, la licuefacción del hidrógeno requiere temperaturas muy bajas ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) y altas presiones, lo que puede ser costoso y requerir equipos especializados. Además, hay preocupaciones de seguridad asociadas con el manejo y almacenamiento del hidrógeno líquido debido a su alta inflamabilidad y posibilidad de explosiones en ciertas condiciones. En la fotoelectrocatalisis, se ha investigado la posibilidad de utilizar la licuefacción del hidrógeno como una forma de almacenamiento, pero aún hay muchos desafíos que deben superarse antes de que pueda ser una opción viable y segura.

- **Compresión:** Según Cancino Silva, R., 2021, cuando se utiliza hidrógeno como gas, se requiere comprimirlo a alta presión, lo que implica un trabajo sobre el gas. Sin embargo, el cálculo preciso del trabajo de compresión del hidrógeno requiere conocimientos de las ecuaciones de estado y calor adecuadas, que no están fácilmente disponibles. Para simplificar los cálculos, muchos investigadores consideran que la compresión de hidrógeno es un proceso isentrópico (adiabático), lo que implica que no hay transferencia de calor entre el compresor y el medio ambiente durante la compresión y el proceso es reversible. No obstante, ya que el hidrógeno se comporta como un gas ideal a altas presiones, se pueden cometer errores considerables.

El almacenamiento del hidrógeno en forma de gas comprimido en cilindros es una de las técnicas más extendidas y desarrolladas en la actualidad. Consiste en contenedores de hidrógeno comprimido con presiones de trabajo nominales de 350 y 700 bar, que se almacenan típicamente a temperatura ambiente. Sin embargo, también se puede almacenar hidrógeno comprimido criogénicamente a temperaturas inferiores a  $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que aumenta su densidad. A pesar de que los cilindros son seguros y eficientes para aplicaciones móviles y estacionarias, requieren un gran espacio de almacenamiento y no son adecuados para grandes cantidades de hidrógeno. Además, se deben tener en cuenta los riesgos asociados con la alta presión y la necesidad de mantener las condiciones adecuadas para evitar fugas o explosiones. Morante et al. (2020) analizan estos tipos de almacenamiento.

- **Almacenamiento del hidrógeno líquido criogénico LH<sub>2</sub>:** Cancino Silva, R., 2021 Plantea que el hidrógeno en estado líquido tiene una capacidad de energía considerablemente mayor que el hidrógeno en estado gaseoso, lo que hace un método de almacenamiento tentador. Sin embargo, este método de almacenamiento presenta varias problemáticas. En primer lugar, se requiere una cantidad significativa de energía para licuar el gas, además de un control riguroso de la temperatura del contenedor para prevenir riesgos de sobrepresión. Asimismo, se necesitan

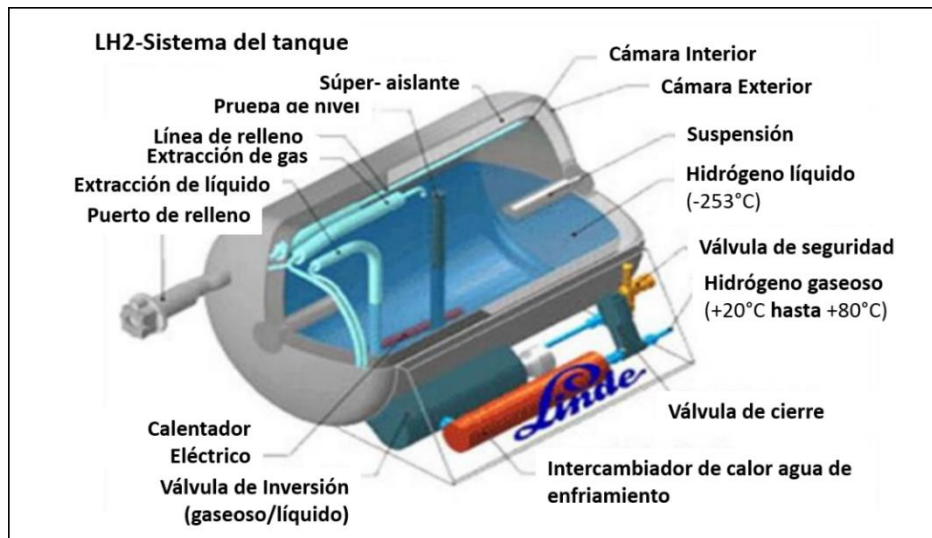
recipientes criogénicos y existe la posibilidad de pérdida de hidrógeno por evaporación, especialmente en contenedores más pequeños debido a una mayor relación de área superficial a volumen, en comparación con los contenedores más amplios.

Según la autora, los contenedores criogénicos utilizados para el almacenamiento de hidrógeno líquido son recipientes de doble pared fabricados en metal, con un aislamiento puesto entre ambas paredes. Para disminuir, si no eliminar, la pérdida de calor, se deben considerar los efectos de la radiación, la convección y la conducción del calor al diseñar un recipiente. Como se muestra en la figura 16, el contenedor interno que alberga hidrógeno a temperaturas criogénicas cuenta con varias capas de material aislante y en cada capa se han colocado espaciadores que funcionan como barreras térmicas.

Dado que las presiones de funcionamiento son menores comparadas con los sistemas de alta presión, el almacenamiento criogénico ofrece una excelente oportunidad para reducir el peso mediante la utilización de nuevos elementos compuestos que presentan un rendimiento mejorado. Mediante la implementación de un sistema de esta naturaleza, es posible alcanzar una capacidad de almacenamiento de energía determinada, semejante a la de los tanques que contienen los combustibles comunes. Aunque se ha tenido mucha cautela en la construcción de estos tanques de depósito para certificar la seguridad contra el ingreso de calor no deseado, el hidrógeno y los líquidos criogénicos, están sujetos a evaporación ("ebullición") debido a los efectos térmicos del sistema del estanque. Este fenómeno no se puede evitar y solo se puede minimizar (Cancino Silva, R., 2021).

**Figura 16.**

*Ilustración simplificada de un recipiente criogénico, diseño y elementos constituyentes*



*Nota:* (Linde AG).

**Almacenamiento del hidrógeno gaseoso criogénico CGH2:** Esta tecnología es una de las más simples, populares y eficientes que se utilizan actualmente. Consiste en almacenar hidrógeno a alta presión en tanques con paredes gruesas (generalmente cilíndricos o casi conformados), fabricados con materiales altamente resistentes para asegurar una larga vida útil.

Morante et al., 2020 afirma que la temperatura a la que ebulle el hidrógeno a presión atmosférica es de  $-252,8^{\circ}\text{C}$ , por lo que normalmente se requieren contenedores a alta presión (350-700 bar) para albergar el hidrógeno gaseoso, entretanto el almacenamiento de hidrógeno líquido requiere temperaturas criogénicas. Por otra parte, Cancino Silva, R., 2021 sostiene que los diseños de los tanques basados en enfoques de ingeniería determinista clásica, aún no se han optimizado. En realidad, los tanques se diseñan con un margen de tamaño mayor al necesario. Existe un uso excesivo de materiales y una evaluación deficiente de la vida útil del recipiente a presión. Del

mismo modo Morante et al., 2020 asegura que, los recipientes que albergan el hidrógeno comprimido se catalogan según su material de fabricación y la presión máxima permitida.

- **Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos:** Según Rodríguez, P., 2022 los hidruros metálicos son una opción viable para almacenar hidrógeno de forma sólida y a bajas presiones. Esto es posible porque las moléculas de hidrógeno se encuentran químicamente unidas dentro de la estructura cristalina del componente metálico. Los procedimientos de depósito de hidruros metálicos suelen operar típicamente a presiones de 10 a 40 bares, lo que representa un aproximado de 20 veces menos presión que los sistemas convencionales de almacenamiento de hidrógeno a alta presión.

No obstante, uno de los principales inconvenientes de este método es el peso de los hidruros. La capacidad de almacenamiento de estos es de aproximadamente 1,5 kilogramos de hidrógeno o lo que equivale a 50 kWh por cada 100 kilogramos de compuesto de hidruros metálicos. Además de ellos otro de sus desafíos radica en la complejidad del sistema. Primeramente, los hidruros requieren ser acumulados bajo atmósferas de nitrógeno o argón y protegidos del agua. Por otra parte, mientras que los alcoholes o amoniacos pueden utilizarse directamente en pilas de combustible, los hidruros metálicos necesitan de un proceso de activación para liberar el hidrógeno de su estructura. Cuando es necesario usar este hidrógeno, se promueve su liberación mediante el calentamiento a temperaturas de 50 a 100 °C. Este proceso de desorción térmica resulta inconveniente para aplicaciones en automoción, especialmente durante las fases de aceleración y desaceleración.

**4.1.4.2.4 Avances de la fotoelectrocatalisis:** La investigación de la fotoelectrocatalisis para la producción de hidrógeno es un área en constante evolución y aún hay mucho por explorar. Sin embargo, ha experimentado importantes avances a nivel mundial, uno de ellos es el desarrollo de nuevos materiales fotocatalizadores y una de las estrategias utilizadas ha sido la

nanoestructuración con el objetivo de producir materiales con un tamaño de partícula pequeño, alta área superficial y propiedades fotocatalíticas mejoradas.

La aplicación de luz solar y potencial en los semiconductores que actúan como fotoánodos genera cargas y nanoestructuras que proporcionan ventajas en su actividad electrocatalítica y fotoactividad. La oxidación del medio y la producción de hidrógeno ocurren gracias a las cargas generadas en los fotoánodos que pasan a través del circuito externo y llegan al cátodo para llevar a cabo la reacción de reducción. Fernández et al. (2021) explican que estas ventajas se deben principalmente al aumento de la superficie específica del material, lo que aumenta la transferencia de carga en la interfase semiconductor/electrolito y mejora su rendimiento electrocatalítico. La ruta de difusión de los huecos fotogenerados es más corta debido a las dimensiones nanométricas, lo que reduce la recombinación de los pares electrón-hueco. La superficie "rugosa" del semiconductor también aumenta la absorción de luz y fotoexcitación, ya que se produce la dispersión de los fotones y se reduce la reflexión.

Según lo indicado por Fernández et al. (2021), la fabricación de nanoestructuras de óxidos metálicos destinados a su uso en la fotoelectrocatalisis puede ser llevada a cabo mediante distintos procedimientos, como el sol-gel, la síntesis hidrotermal y el anodizado electroquímico.

- **Método Sol-Gel:** El método sol-gel es una técnica en fase líquida utilizada para sintetizar materiales nanoestructurados que ha sido ampliamente investigada. Este método implica la utilización de una disolución precursora que suele contener alcóxidos y cloruros metálicos. A través de varias reacciones de hidrólisis y condensación, se forma una dispersión coloidal que posteriormente se gelifica en una red. Tras la gelificación, se lleva a cabo un proceso de deshidratación y un tratamiento térmico para producir el óxido metálico nanoestructurado.

- **Síntesis hidrotermal:** La síntesis hidrotermal es un método para la producción de óxidos semiconductores que implica reacciones heterogéneas en un medio acuoso bajo

condiciones de temperatura y presión elevadas. Para llevar a cabo la síntesis, se mezclan precursores en una autoclave de acero inoxidable sellado, y se calienta la mezcla por encima del punto de ebullición del agua, lo que resulta en un aumento significativo de la presión. Se ajustan los parámetros de la reacción, incluyendo los precursores, los agentes estabilizadores, la temperatura y el tiempo de reacción, para controlar la síntesis de los óxidos metálicos obtenidos.

- **Anodizado electroquímico:** El anodizado electroquímico es una técnica simple y rápida para sintetizar nanoestructuras de óxidos semiconductores, que es económica y adecuada para la producción a gran escala. Este proceso se lleva a cabo en una celda electroquímica con dos electrodos sumergidos en un electrolito, donde el metal que se oxidará actúa como ánodo y otro metal noble o inerte se utiliza como cátodo. La aplicación de una diferencia de potencial entre los electrodos disuelve el metal y resulta en la formación de nanoestructuras de óxido metálico sobre la superficie del metal, mediante varios mecanismos.

Otro importante avance ha sido la planta piloto liderada por Enagás y Repsol, que tiene como objetivo demostrar la viabilidad técnica y económica de esta tecnología para la producción de hidrógeno verde. Este proyecto tiene definidas dos etapas para alcanzar la madurez comercial, la primera es una planta que se pondrá en marcha en 2024 en Puertollano, con una extensión cercana a media hectárea y con una producción de 100 kg/día de hidrógeno renovable, y una última etapa prevista para el 2028, con la instalación de una planta de 60 hectáreas y con una producción que llegue a las 10t/día.

Es importante mencionar que actualmente, la producción de hidrógeno mediante fotoelectrocatalisis es todavía una tecnología en desarrollo y no se ha alcanzado la escala comercial. Por lo tanto, no se podría prever con precisión cuál será el costo del hidrógeno producido por esta vía, sin embargo, la meta a largo plazo es lograr estar por debajo de los 2 dólares por kg para que sea competitivo con los combustibles fósiles en diferentes aplicaciones.

La fotoelectrocatalisis es considerada como uno de los proyectos más innovadores a nivel mundial debido a su tecnología disruptiva. Aunque se han desarrollado diferentes enfoques en Europa, EE.UU. y Japón, estos avances todavía se encuentran en etapas tempranas de madurez tecnológica.

Los resultados indican que esta tecnología cumple con tres requisitos importantes al mismo tiempo: alta eficiencia, estabilidad y bajo costo. Se ha logrado una eficiencia global superior al 14% en términos de la transformación de energía solar en hidrógeno (Sun To Hydrogen - STH), y se espera que aumente hasta el 20%, lo que duplicaría la eficiencia actual de un electrolizador integrado con una planta fotovoltaica solar (8-10%). Además, los fotoelectrodos muestran estabilidad, con más de 4.000 horas de operación en una planta piloto. El diseño se basa en materiales económicos y abundantes.

García (2022) señala que la foto-electrocatalisis del agua (PEC), es una técnica PEC cuyas mediciones de la eficiencia pueden variar enormemente debido a la falta de métodos estandarizados. De igual forma, Nature communications (2023), señala que los sistemas se utilizan in situ para una reacción catalítica de hidrogenación y que depende del tiempo de amortización energética lo que incide en su eficiencia.

### **Tabla 11.**

#### *Ventajas y desventajas Foto electrocatalisis*

| <b>Ventaja</b>  | <b>Desventaja</b>                                   |
|---|---|
| Se encuentra basado en fuentes de energía sostenibles y limpias | Catalizadores empleados con base a la recombinación |
| Disminución del impacto ambiental                               | No existen procedimientos estandarizados.           |
| Producción con precios competitivos en el mercado               |   |
| Se puede emplear aguas residuales para obtención del hidrógeno. |   |
| Hidrógeno obtenido 100% renovable.                              |   |
| Reducción del 100% de las emisiones.                            |   |
| Mayor eficiencia  |   |
| Menor costo.  |   |
| No depende de la electricidad                                   |   |
| Empleo de materiales de bajo coste.                             |   |

---

Simplificación de proceso en comparación con otros procesos de hidrógeno.  
Infraestructuras sencillas y fácil manejo.

---

#### 4.1.5 Conglomerado de los métodos analizados

En la Tabla 12 se describe las ventajas y desventajas de cada método analizado.

**Tabla 12.**

#### *Conglomerado de métodos*

| Método                         | Tipo  | Ventaja   | Desventajas   | Variables determinantes  |
|--------------------------------|---|---|---|--|
| Métodos con Energía Eléctrica  | Electrólisis                                      | Fuentes diversas<br>No se genera emisiones de CO <sub>2</sub>   | Presenta huella de carbono.   | <b>Eficiencia energética:</b><br>La foto electrocatálisis utiliza la energía solar para provocar la descomposición de las moléculas de agua y por ende la producción de hidrógeno, esta capacidad le diferencia de otros métodos que necesitan de fuentes de energía externas para su funcionamiento y no permiten el completo uso de energías verdes. |
|                                | Descomposición de gas natural por arco de plasma. | Oxígeno de alto pureza<br>Reducción de la dependencia de materia prima  | Alto consumo de electricidad.<br>Baja eficiencia<br>Altos costos de inversión.<br>Rápida desactivación de los catalizadores                       |  |
| Métodos con Energía Térmica    | Termólisis  | No se requiere membrana para la separación.   | Los ciclos termoquímicos aún no se consideran competitivos en costos.   | <b>Sostenibilidad ambiental:</b><br>Esta tecnología posee una reducción en la emisión de GEI, contribuyendo a la disminución de la huella de carbono, característica que no poseen muchos otros métodos que generan considerables cantidades de emisiones en el proceso.   |
|                                | Gasificación                                      | No requieren electricidad o en su defecto mínima.<br>Método más barato  | Los reactivos son corrosivos y dañinos para usos industriales.<br>La temperatura de trabajo requerida es demasiado alta.<br>Se puede producir CO. |  |
| Métodos con Energía Bioquímica | Fermentación Oscura                               | Uso de microorganismos o aguas residuales.  | Empleo de reactores, mantenimiento.   | <b>Simplificación de procesos:</b><br>La foto electrocatálisis combina la conversión fotoquímica y electroquímica en un solo proceso, lo que permite una simplificación  |
|                                | Foto fermentación                                 | Procesos realizados por la luz o independientes de la luz.<br>Se basa en la fotosíntesis.   | Dependencia de cantidad de hidrógeno según enzima.  |  |
| Métodos con Energía Fotónica   | Electrolisis PV<br>Foto electrocatálisis          | Producción alta en comparación con los fósiles.<br>Fuente de energía en forma de calor y luz.<br>Huella de carbono nula.<br>Versatilidad<br>Automatización. | Falta de procedimientos estandarizados.   |  |

|   |   |
|---|---|
| Fácil de manejar.<br>Basado en fuentes de energía sostenibles y limpias.<br>Producción con precios competitivos.<br>Hidrógeno obtenido 100% renovable.<br>Menor costo.<br>No depende de la electricidad.<br>Simplificación de proceso.<br>Infraestructuras sencillas. | significativa en comparación con métodos convencionales que requieren múltiples etapas y equipos separados. |
|---|---|

#### **4.2 Plan Energético Nacional para analizar posibles rutas de adopción del modelo híbrido, en dónde el hidrógeno verde sea un factor de inflexión en el desarrollo ambiental de Colombia**

Frente al actual contexto de deterioro ambiental generado por las diversas actividades de los seres humanos con implicaciones negativas en el equilibrio ambiental, ha surgido la necesidad de la búsqueda de alternativas que permitan mitigar las afectaciones del cambio climático, es evidente que el mundo requiere cambiar sus hábitos en cuanto a la sostenibilidad se refiere, por ello, Colombia cuenta con el Plan Energético Nacional (PEN, 2020-2050) que es un documento que se encuentra direccionado hacia la búsqueda de mejoras en cuanto a la producción y suministro de energía en el territorio nacional.

El documento fue diseñado con el propósito de “definir una visión de largo plazo para el sector energético colombiano e identificar las posibles vías para alcanzarla. En ese sentido, no pretende pronosticar cómo será el futuro, sino por el contrario, explorar las alternativas mediante las cuales se puede moldear” (Ministerio de Energía, 2020, p.18). Por lo cual, su análisis hace parte esencial del proceso investigativo que se desarrolló en este trabajo como eje para la propuesta estratégica de la adaptación de la foto electrocatálisis como nueva tecnología energética.

Para desarrollar este apartado se hará una síntesis de los aspectos más relevantes del Plan, en un total de 4 sub apartados en donde se describen los capítulos que conforman el documento, ello, con el propósito de identificar aspectos relevantes sobre la incorporación del proceso de obtención de hidrógeno verde por la foto electrocatálisis como alternativa innovadora de producción energética en el territorio colombiano.

#### ***4.2.1 Punto de partida del PEN***

En este capítulo el Plan describe que Colombia ha sido un país con un crecimiento poblacional e industrial, que ha incrementado la demanda energética, por ello, se evidencia y resalta la necesidad de que la matriz energética en el país sea reorientada en búsqueda de métodos más amigables con la preservación del ambiente. En este apartado se presentan una serie de estadísticas que permiten comprender el contexto energético en el país, la siguiente tabla contiene la síntesis de las cifras expuestas en el PEN:

**Tabla 13.***Indicadores del consumo energético*

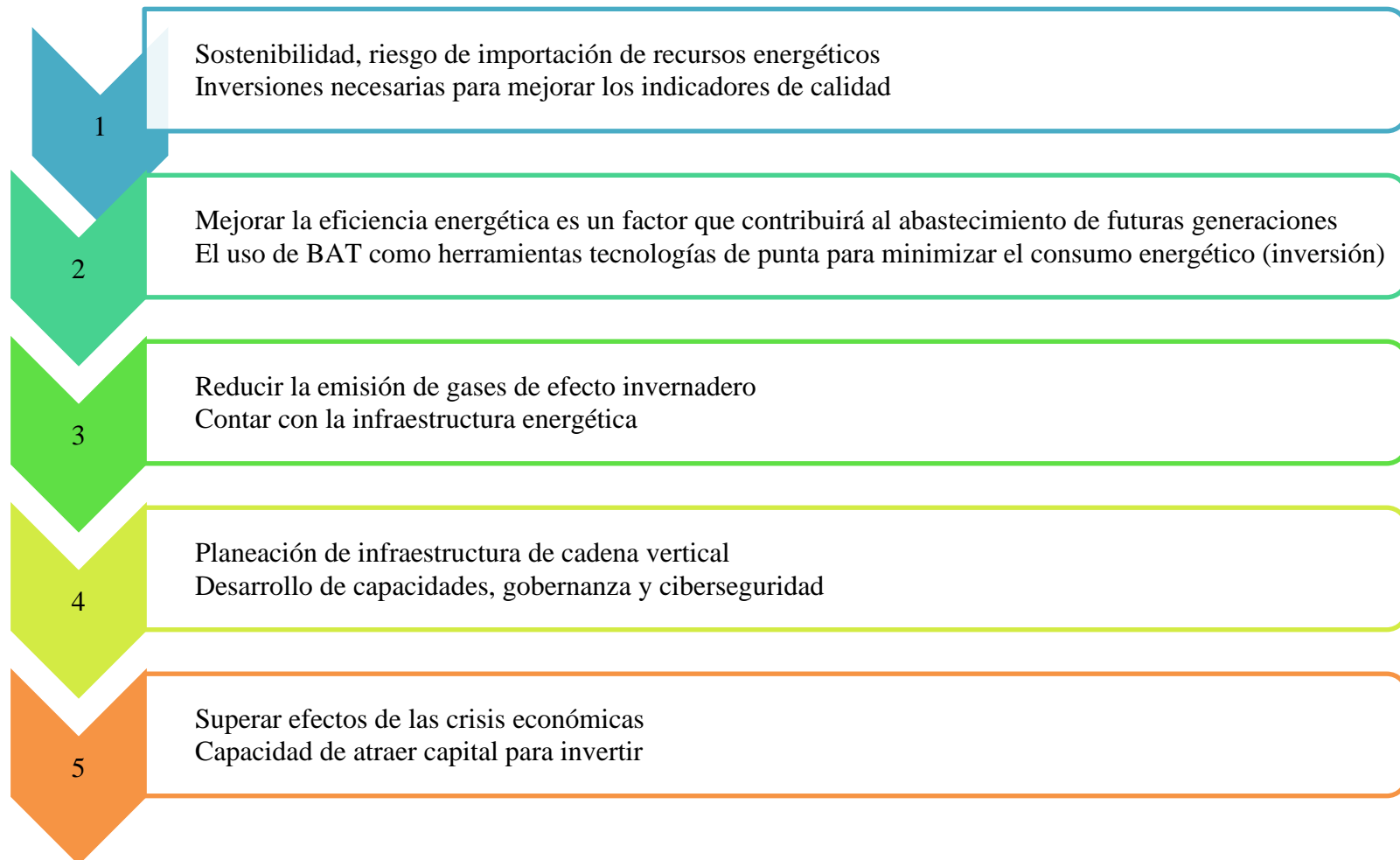
| Población, habitantes | PIB, MMCO P | Consumo de energía, PJ | Vehículos terrestres periodo 2002-2018 | Industrias de mayor consumo energético por crecimiento | Principales ofertas energéticas   | Consumo per cápita mundial Vs Colombia  | Consumo de combustibles líquidos derivados del petróleo sector transporte (40% del consumo energético total) | Consumo energético sector industrial (22% del total)   | Consumo energético residencial (20% del total)   | Consumo energético sector terciario (5% del total)   | Aporte al PIB del sector minero energético   |
|-----------------------|-------------|------------------------|--|--|---|---|--|--|--|--|--|
| 49.000.000            | 881.429     | 1.346                  | 3.207.316<br>a<br>13.862.679           | Manufacturera (2,4%) y transporte (5,9%)               | Combustibles líquidos (incremento del 20% al 40%)<br>Energía eléctrica (incremento tres veces) y Gas natural (incremento del 16%) | 3.132 kWh-año,<br>1.312 kWh-año en 2019 | Mundo 92 %, Latinoamérica 88 % y en Colombia 96 % (Gasolina y Diesel)  | gas natural (29 %), el carbón mineral (28 %), el bagazo (20 %) y la energía eléctrica (20 %).<br>A | la leña con 37 %8, la energía eléctrica con 35 %, el gas natural con 20 % y el GLP con 7 % | El principal energético usado en el sector es la electricidad que representa el 73 % del total, seguido por el gas natural con un 23 % y el GLP en menor proporción con el 5 % | 8 % y 14 % entre 2005 y 2019. La actividad de extracción y producción de hidrocarburos y minerales representa en promedio 5,1 % del PIB durante los últimos quince años. |

*Nota:* Elaboración propia con información adaptada del PEN 2020-2050

Ahora bien, en lo que respecta a la oferta energética e infraestructura disponible en Colombia, en este apartado se describe que el petróleo y sus derivados representan el 40%, el gas el 21% y la energía eléctrica el 16% siendo los recursos más utilizados en la matriz energética. En cuanto al carbono como energético se tiene un 9% del uso para la obtención de energía.

Es importante resaltar que en cuanto a la infraestructura en el país se cuenta con dos grandes refinerías de petróleo, además de otras plantas pequeñas ubicadas a lo largo del territorio nacional, en lo que respecta al gas natural se cuenta con 70 campos de producción y para la obtención de energía eléctrica “se cuenta con una capacidad instalada igual a 17.749 MW, de los cuales el 68 % corresponde a capacidad hidráulica y el 30 % térmica” (Ministerio de Energía, 2020, p. 31).

Otro de los temas considerados en este capítulo del PEN son los desafíos que se enfrenta el sector energético en Colombia en las próximas décadas, englobándolos en un total de 5 grandes aspectos: 1: Disponibilidad de recursos energéticos locales, cobertura universal y mejoras en calidad del servicio; 2: Brecha tecnológica y uso eficiente de los recursos energéticos; 3: Mitigación y adaptación al cambio climático; 4: Cambios estructurales en el sector energético asociados a la digitalización y la descentralización y 5: COVID y la toma de decisiones bajo incertidumbre. Para sintetizarlos se hizo uso de la figura 17 que se ilustra a continuación:

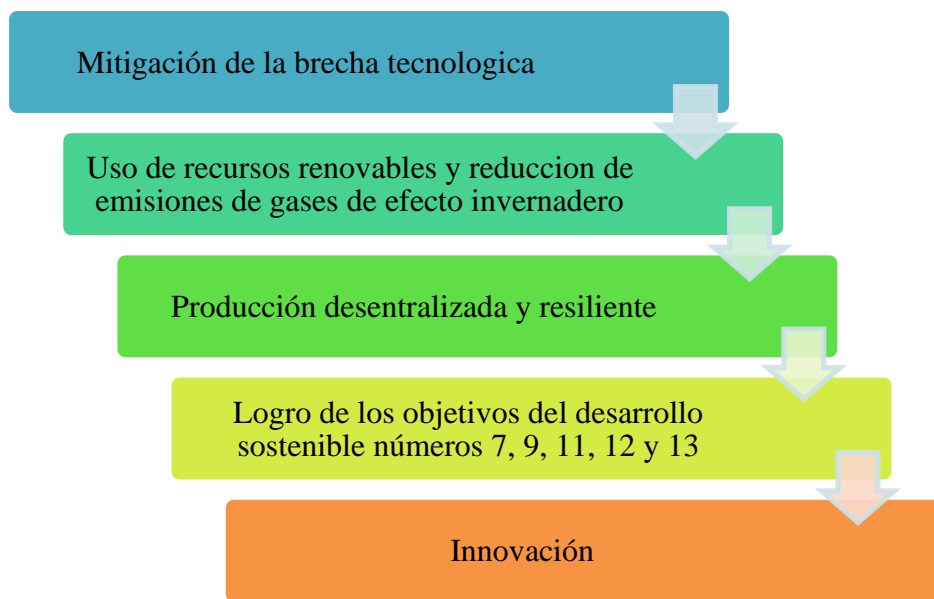
**Figura 17.***Desafíos del sector energético en Colombia*

#### 4.2.2 ¿Cómo imaginamos el sector energético colombiano en 2050?

En este capítulo del PEN se describen cada uno de los aspectos que se deben tener en consideración sobre la transformación energética, se describe la visión, los pilares y los objetivos que conformarán este proceso de transformación que se direcciona hacia la búsqueda y adaptación de nuevas formas de producir y suministrar energía en el territorio nacional con enfoque al desarrollo sostenible. La figura 14 presenta los aspectos más relevantes de la visión descrita en el plan.

#### Figura 18.

*Visión de transformación energética PEN*



Como se puede ver en la figura 14 la visión del plan está enfocada en la transformación energética nacional a través del uso de recursos renovables, la reducción de afectaciones ambientales, el uso de nuevas formas de producción energética y el desarrollo sostenible, lo que va de la mano con la obtención del hidrógeno verde a través de la foto electrocatálisis como alternativa de producción verde.

Ahora bien, en lo que respecta a los pilares el PEN establece cuatro grandes pilares que se direccionan al alcance del cambio energético 2020-2050, en pro de garantizar la disponibilidad de recursos y la sostenibilidad del sistema energético, las figuras 19 y 20 muestran los aspectos más relevantes de dichos pilares:

### Figura 19.

#### *Pilares 1 y 2 del PEN*

#### Pilar 1. Seguridad y confiabilidad del abastecimiento

| Resultado estratégico: | Aprovisionamiento seguro y confiable de energéticos para la demanda nacional   |
|------------------------|--|
| Alcance:               | <p>Este pilar describe las acciones del Estado orientadas a que el sistema energético colombiano tenga la capacidad de abastecer, transportar y distribuir la energía eléctrica, los gases combustibles y los combustibles líquidos requeridos para satisfacer la demanda de manera confiable, segura y eficiente.</p> <p>Este pilar hace referencia a las acciones encaminadas a contar con:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La infraestructura para el abastecimiento de energéticos y el acceso a ellos de acuerdo con la demanda esperada.</li> <li>• La infraestructura de transporte y distribución de energéticos suficiente y flexible en su operatividad.</li> <li>• La infraestructura, dispositivos, equipos y capital humano para cumplir con los estándares de calidad establecidos.</li> <li>• Un entorno de negocios atractivo para inversiones en infraestructura y desarrollo de programas de investigación y desarrollo.</li> <li>• Precios que reflejen las condiciones de un mercado en competencia, permitan el acceso a los energéticos e induzcan a decisiones de consumo eficientes.</li> </ul> |

#### Pilar 2. Mitigación y adaptación del cambio climático

| Resultado estratégico: | Reducción de emisiones de GEI y gestión de riesgos asociados al cambio climático   |
|------------------------|--|
| Alcance:               | <p>Este pilar describe las acciones del Estado orientadas a que el sistema energético pueda contribuir a mitigar el cambio climático con la reducción de emisiones de GEI, y a adaptarse a los riesgos asociados a la variabilidad climática.</p> <p>Este pilar hace referencia a las acciones encaminadas a contar con:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajas emisiones de GEI en la producción de energía primaria.</li> <li>• Bajas emisiones de GEI en el consumo de energía.</li> <li>• La información sobre riesgos e impactos climáticos para su integración en la planeación y normativa del sector.</li> <li>• Una cadena de valor operada desde la perspectiva de gestión de riesgos climáticos y otros eventos externos, en el abastecimiento, transporte, distribución y consumo de energéticos.</li> </ul> |

*Nota:* Ministerio de Energía (2020)

**Figura 20.***Pilares 3 y 4 del PEN***Pilar 3. Competitividad y desarrollo económico**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Resultado estratégico:</b> | <b>Uso de la mejor tecnología disponible para el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos</b>   |
| <b>Alcance:</b>               | <p>Este pilar describe las acciones del Estado orientadas a consolidar un entorno de mercado que integre nuevas tecnologías para hacer un uso eficiente de los recursos energéticos, con miras a mejorar la competitividad del sector productivo y aportar al desarrollo económico del país.</p> <p>Este pilar hace referencia a las acciones encaminadas a contar con:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de información para que los usuarios conozcan los desempeños energéticos y para que las autoridades establezcan estándares y requisitos mínimos de eficiencia energética.</li> <li>• Un mercado que incentive la inversión en nuevas tecnologías que habiliten la reducción de costos mediante el uso eficiente de los recursos energéticos.</li> <li>• Un mercado en el que se pueda innovar y crear nuevos esquemas de negocio y participación de nuevos actores.</li> <li>• Un entorno de mercado que valore la circularidad de los procesos productivos, tanto en la minimización de entrada de materiales vírgenes como en la producción de desechos.</li> </ul> |

**Pilar 4. Conocimiento e Innovación**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Resultado estratégico:</b> | <b>Gestión de conocimiento enfocado en la promoción de la transición energética y el desarrollo sostenible</b>   |
| <b>Alcance:</b>               | <p>Este pilar describe las acciones del Estado orientadas a contribuir en la producción, transferencia y uso de nuevas tecnologías y conocimiento, mediante el fortalecimiento del capital humano, la promoción de soluciones y tecnologías innovadoras y el aumento de las inversiones en proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) que potencialicen la transformación energética colombiana.</p> <p>Este pilar hace referencia a las acciones encaminadas a contar con:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Programas de capacitación en todos los niveles educativos en las áreas relacionadas con la transformación energética.</li> <li>• Grupos de investigación y capital humano capaces de hacer uso de los más recientes avances tecnológicos y proponer cambios transversales que agreguen valor y resuelvan problemáticas del sector y la sociedad.</li> <li>• Aumentar los recursos que se invierten en el desarrollo de proyectos de ciencia, tecnología e innovación en el sector energético.</li> </ul> |

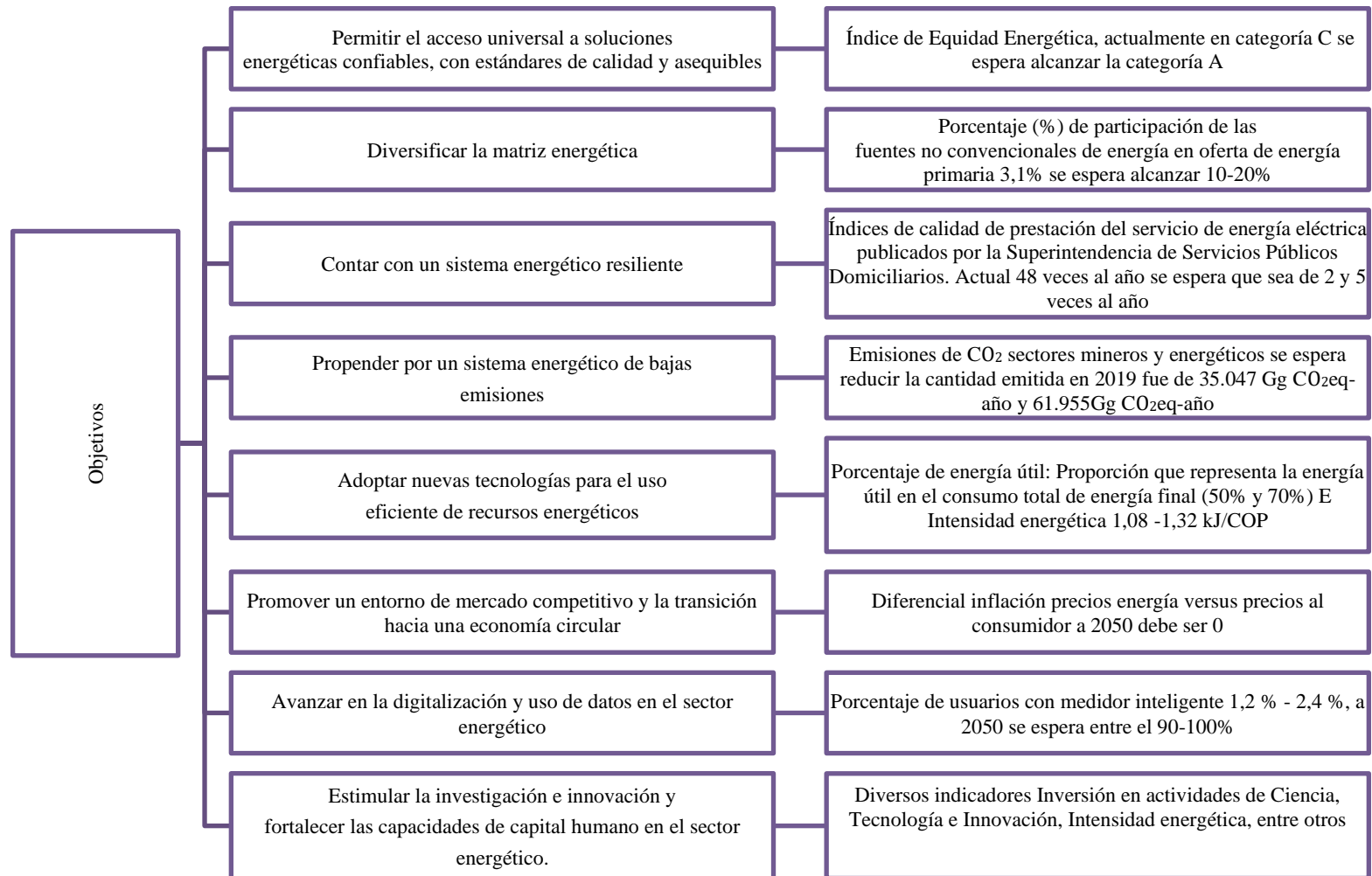
*Nota:* Ministerio de Energía (2020)

Los pilares que se establecen en el PEN 2020-2050 son evidencia de la necesidad de transformación energética del territorio colombiano, lo cual, se justifica desde las afectaciones del cambio climático, la falta de innovación, el uso de recursos no renovables, la participación de las fuentes hídricas para la generación de energía y los fenómenos naturales del niño y la niña, entre otros que demuestran la necesidad de transformación en pro de la sostenibilidad y la reducción de los riesgos de importación de recursos energéticos y limitaciones para la auto sustentación del consumo energético nacional.

Por último y no menos importante de este capítulo que compone el PEN es necesario mencionar los aspectos que conforman a los objetivos formulados en el plan, son un total de 8 y cada uno de ellos cuenta con indicadores de medición, la figura 21 engloba los elementos más importantes de esta parte del capítulo 2:

**Figura 21.**

*Objetivos PEN 2020-2050*



### **4.3 Estructurar una ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electrocatálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde.**

Como se ha descrito a lo largo de la investigación el uso de energías convencionales está generando diversas afectaciones en el ambiente, no solo por las emisiones de gases de efecto invernadero, sino por el deterioro en los recursos naturales como los hídricos que se utilizan en grandes proporciones para los procesos hidráulicos de generación energética, que además de comprometer las condiciones ambientales también ponen en riesgo la sostenibilidad de los recursos naturales.

Cuando en la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (ONU, 1992) se asumió que este era un cambio generado por la actividad humana se produjo, posteriormente, la aceptación de que el clima cambió y se debe actuar en consecuencia, tanto para prevenirlo como para adaptarse y construir resiliencia. De manera tal, que se lleva a cabo la respuesta, coordinada y colaborativa, de todos (gobiernos, expertos, comunidades, académicos, individuos, organizaciones) con el fin de hacer frente a los efectos adversos del CC y proteger, en consecuencia, el sistema climático para las generaciones presentes y futuras.

Como la acción humana es compleja y tiene muchas aristas en la dinámica de juego del CC, se producen una serie de afectaciones en la salud ambiental que permiten evidenciar la necesidad de cambios en los modelos actuales de generación y suministro de energía en Colombia. La revisión teórica y del PEN permitieron identificar que existen pautas para la medición de esta salud ambiental que es la que debe promoverse, ya que, con ello se hace evaluación de los impactos, la determinación de las vulnerabilidades existentes y, en consecuencia, la toma de decisiones para la acción. La tabla 14 muestra los indicadores de salud ambiental:

**Tabla 14.***Indicadores de salud ambiental*

| <b>Dimensiones de salud ambiental</b>         | Indicadores de salud ambiental  |
|---|---|
| <b>Indicadores ambientales</b>                | -Gases de efecto invernadero (GEI)<br>-Efectos de aire de masa estancada<br>-Ozono<br>-Temperaturas máxima y mínima (índice de calor)<br>-Alertas de ola de calor<br>-Conteo de polen<br>-Incendios forestales<br>-Sequías                          |
| <b>Indicadores de vulnerabilidad</b>          | -Brotos de algas peligrosas<br>-Ancianos viviendo solos<br>-Índice de pobreza<br>-Riesgo de inundaciones<br>-Elevación del nivel del mar  |
| <b>Indicadores de mitigación</b>              | -Eficiencia energética<br>-Uso de energía renovable<br>-Millas de vehículos recorridas<br>-Uso de recursos naturales de formas amigables<br>-Negocios verdes  |
| <b>Indicadores de adaptación</b>              | -Acceso a centros de enfriamiento<br>-Número de sistemas de alerta por olas de calor<br>-Número de planes municipales para el fenómeno <i>isla urbana de calor</i><br>-Número de sistemas de vigilancia<br>-Personas entrenadas en cambio climático |
| <b>Indicadores de morbilidad y mortalidad</b> | -Mortalidad por calor extremo<br>-Morbilidad por calor extremo<br>-Lesiones/muertes por eventos de clima<br>-Casos humanos de infecciones ambientales<br>-Enfermedad respiratoria por contaminación el aire<br>-Enfermedad alérgica por polen       |
| <b>Indicadores de políticas</b>               | -Ciudades incluidas en el Protocolo de Kioto<br>-Ciudades participando en iniciativas sobre cambio climático  |

*Nota:* Elaboración propia con datos tomados de Sánchez (2016)

Estos indicadores muestran que además de las amenazas existen vulnerabilidades para dar respuestas al cambio climático, por lo que la planeación estratégica, en planes como instrumentos de desarrollo, son la vía para hacer frente a los efectos adversos de los desastres y del CC. Por ello la articulación estratégica de esos planes con los ODS 2015 (ONU 2015) debe coordinarse de manera integrada con el desarrollo social y económico con miras a evitar efectos adversos sobre

este último, teniendo plenamente en cuenta las necesidades prioritarias legítimas de los países en desarrollo para el logro de un crecimiento económico sostenido y la erradicación de la pobreza.

Por ello, es importante reconocer que los países, especialmente los países en vía de desarrollo, para lograr un desarrollo económico y social sostenible, necesitan tener acceso a recursos necesarios y a conocimiento necesario de manera que alcancen comprensión sobre el problema de la GCC e impulsen desde ese punto de partida mejor uso de los recursos naturales para el control de las emisiones de gases de efecto invernadero en general, apliquen nuevas tecnologías económicas y socialmente beneficiosas, apoyen y participen en cooperación a experiencias por la GCC, manejen información de orden científico, tecnológico, técnico, socioeconómico y jurídico sobre el sistema climático y el cambio climático y las consecuencias económicas y sociales y puedan actuar, sosteniblemente, en distintas estrategias de respuesta de la GCC.

Por eso, la mirada estratégica de desarrollo puesta en los ODS 2015 insta a ser parte de la planeación del desarrollo por el ambiente, desde la que se asume, la siguiente figura lo ilustra:

**Figura 22.**

*Objetivos del desarrollo sostenible (2015)*



*Nota:* ONU (2016)

Estos ODS son un acuerdo mundial para asegurar el desarrollo, en todos sus aspectos, de la vida en el planeta y los países del mundo los han acordado. Según las Naciones Unidas (s.f.), en su página oficial, estos son:

Una herramienta de planificación y seguimiento para los países, tanto a nivel nacional como local. Gracias a su visión de largo plazo, constituirán un apoyo para cada país en su senda hacia un desarrollo sostenido, inclusivo y en armonía con el medio ambiente, a través de políticas públicas e instrumentos de planificación, presupuesto, monitoreo y evaluación (ONUc, s.f., s.p.).

De allí que las acciones de desarrollo sostenible deben planearse y seguirse en evaluaciones de largo plazo y en el cumplimiento de las políticas públicas y sus instrumentos de planificación, en este caso el PEN. Lo propio de esta investigación, en adecuación a esto, es un generar una ruta estratégica que permita la incorporación de la foto electrocatálisis como un modelo pionero en la obtención del hidrógeno verde, desde esto, establecer la articulación estratégica por lo ambiental, social y económico, que conduzca al alcance del desarrollo sostenible. De allí se generó la ruta estratégica que se presenta en la tabla 15 a continuación:

**Tabla 15.***Ruta estratégica para la incorporación de la foto electrocatálisis como herramienta de transformación energética*

| <b>Objetivo estratégico</b>  | <b>Acción estratégica</b>   | <b>Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)</b>    | <b>Metas del ODS</b>   | <b>Indicador de salud ambiental</b>  |
|--|---|--|--|--------------------------------------|
| Diversificar la matriz energética  | Inversión en la restructuración de plantas generadoras de hidrógeno, para obtener hidrógeno verde a través de la foto electrocatálisis                | Objetivo 7 energía asequible y no contaminante     | -Aumento de las energías renovables  | Indicador de políticas y mitigación  |
| Contar con un sistema energético resiliente  | Transformación de las maneras convencionales de obtención de energías con recursos no renovables  | Objetivo 9 Industria, innovación e infraestructura | - Aumento de la investigación e inversión en energías limpias                      | Indicador de mitigación y adaptación |
| Adoptar nuevas tecnologías para el uso eficiente de recursos energéticos                                       | Cambio en las modalidades de producción energética  | Objetivo 11 ciudades y comunidades sostenibles     | - Promoción de industria inclusiva y sostenible                                    | Indicador de políticas y mitigación  |
| Estimular la investigación e innovación y fortalecer las capacidades de capital humano en el sector energético | Trabajo multidisciplinario  | Objetivo 12  | - Apoyo a infraestructuras sostenibles y resilientes                               | Indicador de políticas y mitigación  |
|  | Desarrollo de políticas públicas que se direccionen hacia el campo investigativo de la obtención de energías limpias                                  | Objetivo 13  | -Protección del patrimonio cultural y natural                                      | Indicador de políticas y mitigación  |
|  | Adaptación de modalidades educativas que favorezcan al estudio y la investigación de uso de recursos renovables para la obtención de energías limpias | Acción por el clima                                | -Reducción del número de muertes por desastres y reducción de vulnerabilidad       |                                      |
|  |   |  | -Reducción del impacto ambiental en ciudades                                       |                                      |
|  |   |  | - Lograr el uso eficiente de recursos naturales                                    |                                      |
|  |   |  | - Adquisiciones públicas sostenibles   |                                      |
|  |   |  | - Incorporación del cambio climático en políticas, estrategias y planes nacionales |                                      |
|  |   |  | - Gestión cambio climático en los países menos avanzados                           |                                      |

**4.4 Impacto energético-ambiental en el país mediante el análisis de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que se desarrollan con la adopción de la foto electrocatálisis como nueva tecnología energética.**

Una vez presentada la ruta estratégica propuesta diseñada con los objetivos y metas de desarrollo sostenible, los objetivos del PEN y las acciones necesarias para la incorporación de la foto electrocatálisis, se procedió a hacer un análisis DOFA con los aspectos identificados a lo largo de este proceso investigativo para evaluar las Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas que se presentan ante la transformación de la matriz energética, a cual se muestra en la tabla 16 a continuación:

**Tabla 16.***Matriz DOFA*

| <b>FORTALEZA</b>  | <b>AMENAZA</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-El Plan Nacional de Desarrollo contempla el desarrollo sostenible del sector energético en el territorio nacional</li> <li>-La existencia de nuevas tecnologías verdes</li> <li>-Las condiciones naturales de Colombia que favorecen al desarrollo de proyectos energéticos a través del uso de energías renovables</li> <li>-Mitigación de la emisión de los gases de efecto invernadero</li> <li>-La innovación en la manera de producir energías renovables</li> <li>-Mitigar afectaciones de vulnerabilidad ante los desastres</li> <li>-Reduce las afectaciones generadas por el Cambio Climático</li> <li>-Mejoras en la salud ambiental</li> <li>-Incremento de las posibilidades de ser importador de recursos energéticos</li> <li>-Favorece al alcance de los objetivos propuestos en el PEN a través de lograr las metas que se especifican en los indicadores del PEN</li> <li>-Disminución de la vulnerabilidad al riesgo de desastre.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-La actual situación de decrecimiento económico del PIB de la nación</li> <li>-La falta de conocimiento para producir energías verdes</li> <li>-La competitividad del sector</li> <li>-La mano de obra capacitada</li> <li>-La experiencia del sector energético actual</li> <li>-El recurso humano calificado, capacitado y comprometido de la competencia</li> <li>-Costos de adaptación de sistemas de producción</li> </ul>  |
| <b>OPORTUNIDAD</b>  | <b>DEBILIDAD</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Existencia de la institucionalidad necesaria para la inversión pública, así como la legalidad establecida en su marco normativo</li> <li>-Demanda creciente de recursos energéticos</li> <li>-Cambios en formas de producción</li> <li>-Objetivos del desarrollo sostenible</li> <li>-Búsqueda de la sostenibilidad</li> <li>-Objetivos transformacionales del PEN</li> <li>-El enfoque de DS como posible enfoque de formación para la conciencia acerca de la sostenibilidad energética</li> <li>-Crecimiento de interés en nuevas formas de obtención de energías verdes</li> <li>-Políticas públicas, Plan Nacional de Desarrollo, direccionados hacia la innovación de la producción energética</li> <li>-La existencia de innovaciones tecnológicas y especializadas que instan a la capacitación y actualización sobre la producción de energías verdes</li> <li>-El creciente y constante desarrollo del sector y su necesidad de actualización permanente</li> <li>-Creciente creación de tecnologías para el desarrollo sostenible en ambiente y en escenarios complejos y adversos</li> <li>- El público objetivo aquel propio del modelo especialización de mercado que permite la adecuación constante a las necesidades del grupo</li> <li>-La competencia ofrece una formación específica y la obtención de energías convencionales</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Carencia de formación en nuevas tecnologías del sector</li> <li>-Necesidad de capacitación especializada y actualización en las ramas del sector para mantenerse al día con innovaciones y tecnologías</li> <li>-Necesidad de experiencias de aprendizaje para la experiencia laboral</li> <li>-Necesidad del perfil por competencias en la formación del personal</li> <li>-Necesidad de personal con formación académica</li> <li>-Necesidad de actualización en nuevas fuentes de producción y reserva</li> <li>-Necesidad de actualización en métodos alternativos</li> <li>-Necesidad de actualización de tecnologías de prospección y producción complejas.</li> <li>-Necesidad de determinación de estándares internacionales</li> </ul> |

## 5. Conclusiones

Una vez culminado el proceso investigativo se lograron comprender los aspectos abordados sobre la necesidad de adaptación de métodos para la producción de energías verdes, en pro de obtención de mejoras en cuanto a las condiciones ambientales y el uso adecuado de recursos renovables, los hallazgos de cada uno de los objetivos específicos desarrollados permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

El hidrógeno es un elemento de gran abundancia en el planeta tierra, además de ser simple y de gran utilidad como vector energético, por ello, existen diversos métodos para su obtención, que requieren el uso de energía, la evaluación de los métodos con energía eléctrica, térmica, bioquímica y fotónica, permitieron concluir que el uso de recursos renovables para la obtención de este compuesto representa una alternativa para mitigar las afectaciones que se generan en el ambiente por causa de la emisión de los gases de efecto invernadero.

También se pudo concluir que además de que favorece a la sostenibilidad del país y a la adaptación de nuevas tecnologías que a pesar de que generan un alto costo de inversión representa una infinidad de beneficios en cuanto a la obtención de energías verdes que en resumidas cuentas favorece a diversos sectores del país.

En cuanto al contenido del PEN se logró comprender que el Estado colombiano muestra interés por la transformación energética de la nación, en cuanto a producción, almacenamiento y suministro. Por ello, su fundamentación se encuentra direccionada en la adaptación de alternativas que permitan la consecución de sus 8 objetivos, cuyos pilares fueron diseñados en pro de la mitigación de los efectos ambientales, la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y el alcance de la sostenibilidad del sector energético.

En este sentido se concluye que el PEN es un instrumento que respalda la adaptación de nuevos métodos de producción energética con el uso de recursos renovables como la foto electrocatálisis.

Una vez analizados los métodos para la obtención del hidrógeno, descritas las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y el análisis del PEN se pudo identificar que la ruta estratégica para la transformación de la matriz energética nacional debe apoyarse en los objetivos formulados por el Plan, los objetivos 7,9,11,12 y 13 del desarrollo sostenible y sus correspondientes metas, por ello, las acciones propuestas en la ruta estratégica se direccionan al alcance de indicadores de mitigación, adaptación y políticas que favorezca al alcance de la salud ambiental. Por ello, se concluye que la adaptación de este método es favorable desde diversas perspectivas que favorecen a la sostenibilidad ambiental.

Por último, se elaboró una matriz DOFA sobre la adopción de la foto electrocatálisis como nueva tecnología energética, a través de la cual, se identificaron cada uno de los aspectos con respecto a la ruta estratégica, lo que permite concluir que a pesar de que existen ciertos desafíos la adaptación de este método representa una alternativa favorable para la producción de energías verdes.

## **6. Recomendaciones**

Para concluir; en base a los resultados obtenidos por este estudio y a las conclusiones a las que se llegó, a continuación, se enumeran algunas sugerencias que se consideran importantes para el avance de Colombia en la transición energética y en la aplicación de nuevas tecnologías que permitan un adecuado cumplimiento del desarrollo sostenible.

Se sugiere que:

Al ser la foto electrocatálisis un método bastante novedoso en la obtención de hidrógeno verde, donde la información hallada es limitada debido a el desarrollo reciente de proyectos pilotos; se propone extender el estudio de la tecnología a largo plazo, con el fin de obtener datos más aproximados, que permitan una adaptación a la coyuntura del País y así una posible implementación futura de la tecnología que genere alto rendimiento y bajos costos.

Se recomienda también al estado colombiano, continuar con la puesta en marcha del PEN, enfocándose en los objetivos 7,9,11,12 y 13 del plan de desarrollo sostenible y analizando a su paso nuevos factores, que creen innovadoras alternativas que permitan una transición energética progresiva, consciente y que favorezca la sostenibilidad ambiental.

Por último, promover proyectos de investigación de tecnologías híbridas de fotoelectrocatálisis con otras tecnologías de energía renovable, como la energía solar y eólica, para maximizar la eficiencia y rentabilidad de la producción.

**Referencias Bibliográficas**

- Acuña, N., Figueroa, L. y Wilches, M. (2017). Influencia de los Sistemas de Gestión Ambiental ISO 14001 en las organizaciones: caso estudio empresas manufactureras de Barranquilla. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(1), 143-153. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000100143>
- Bauknecht, D., Andersen, A. D., & Dunne, K. T. (2020). Challenges for electricity network governance in whole system change: Insights from energy transition in Norway. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 37(April), 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.09.004>
- Bautista, C. (2018). Generación de hidrógeno mediante foto electrocatálisis con foto ánodos de circonato de bario dopado con tierras raras (trabajo de grado).
- Balestrini, M. (2003). *Cómo se elabora un proyecto de investigación*. Caracas: BL Consultores Asociados.
- Bedoya, N. y Medina, J. (2021). Evaluación de la producción de hidrógeno a partir de Electrólisis de agua de mar utilizando energía renovable como Fuente de energía eléctrica. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8656/1/6161739-2021-2-IQ.pdf>
- Beltramo, G., Ramunni, V. y Pasianot, R. (2021). Estudio teórico y numérico de la difusión de hidrógeno en aleaciones base Zr-Nb. *Anales (Asociación Física Argentina)*, 32(4), 112-119. <https://dx.doi.org/10.31527/analesafa.2021.32.4.112>
- Bonell, C. (2007). El protocolo de Kioto y la tributación ambiental, *Revista Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, XL, N°. 1576–162, pp. 71–100.
- Bradshaw, A. (2017). Regulatory change and innovation in Latin America: The case of renewable energy in Brazil. *Utilities Policy*, 49, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2017.01.006>

- Brijaldo, M., Castillo, C. y Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *Ingeniería y competitividad*, 23 (2), e30211155. Epub 18 de mayo de 2021. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.11155>
- Budett, X., Pérez, A. (2018). Innovaciones tecnológicas en la cadena de suministro aplicadas al Commerce. *Revista de los Estudios de Economía y Empresa de Universitat Oberta de Catalunya Oikonomics*. N.º 9, pp. 41-57. [https://www.researchgate.net/publication/333225119\\_Innovaciones\\_tecnologicas\\_en\\_la\\_cadena\\_de\\_suministro\\_aplicadas\\_al\\_eCommerce/link/5ce35e6692851c4eabb1675b/download](https://www.researchgate.net/publication/333225119_Innovaciones_tecnologicas_en_la_cadena_de_suministro_aplicadas_al_eCommerce/link/5ce35e6692851c4eabb1675b/download)
- Caravantes, D. y Carbajal, J. (2022). Potencial de producción de H<sub>2</sub> verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú. <https://hdl.handle.net/11042/5800>
- Cárdenas, M. (13 de Octubre de 2018). Diagnóstico y plan de acción para las zonas no interconectadas (ZNI). Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Cartagena, S. (2018). Evaluación de la producción hidrógeno en una celda PEC, utilizando urea como de sustrato y óxidos de metales como semiconductores. Trabajo de grado publicado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68852>
- Castiblanco, O. y Cárdenas, D. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente* 23(2), 299-311. DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>
- Chacon, O. (2020). Emisión de gases de efecto invernadero en unidades de producción bovina en Chiapas, México (trabajo de grado). <https://www.biopasos.com/informes/TESIS-DIGITAL-MCPAT-FINALIZADA.pdf>

- Chang, D., JianMin, M. and HongXia, Li. (2014). Renewable Hydrogen Production by Alcohols Reforming Using Plasma and Plasma-Catalytic Technologies: Challenges and Opportunities
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E., & Sovacool, B. (2018). Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research and Social Science*, 37(November 2017), 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.015>
- Chopra, S. & Meindl, P. (2008). Administración de la cadena de suministro: estrategia, planeación y operación (3ª Ed.). México: Pearson Educación
- Cifuentes, F., Díaz, R. y Osses, S. (2018). Ecología del comportamiento humano: las contradicciones tras el mensaje de crisis ambiental. *Acta bioethica*, 24(2), 161-165. <https://dx.doi.org/10.4067/S1726-569X2018000200161>
- Collado, E. (2009). Tesis doctoral energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Nacional de Educación a distancia. <http://www.ieec.uned.es/personaldieec/archivos/tesis-doctoral-eduardo-collado.pdf>
- Congreso de Colombia. (1990). Ley 29 de 1990 Por la cual se dictan disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico y se otorgan facultades extraordinarias. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20183>
- Congreso del Colombia (1994). Ley 164 de 1994 (octubre 27) por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". <https://www.lexbase.co/lexdocs/indice/1994/10164de1994>
- Congreso de Colombia (2001). Ley 697 de 2001 (octubre 3) mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones <https://www.lexbase.co/lexdocs/indice/2001/10697de2001>

Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

[https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)

Cortes, S. y Arango, A. (2018). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25 (38), 375-390.

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8035/Art%  
c3%adculo%206.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8035/Art%c3%adculo%206.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Correa, J. (2016). Los casos de éxitos de tecnologías limpias en Colombia. *Semana: Diario Digital*.

Colombia. <https://www.semana.com/energias-alternativas-en-colombia/35965/>

Corredor, J. (2022). Modelo de optimización con prospectiva estratégica para la aplicación de una oportunidad de inversión enfocada en el aprovechamiento de hidrógeno teniendo en cuenta

la matriz energética del sector eléctrico actual (trabajo de grado).

[https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/63021/Tesis%  
20de%20Grado%20-%20Juan%20Corredor.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/63021/Tesis%20de%20Grado%20-%20Juan%20Corredor.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

De la Cruz, M. (2018). Generación de hidrogeno verde por electrolisis (trabajo de grado).

Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022:

Pacto por Colombia, pacto por la equidad.

[https://www.google.com/search?q=Plan+Nacional+de+Desarrollo+2018-  
2022:+Pacto+por+Colombia,+pacto+por+la+equidad.&rlz=1C1CHZO\\_esVE924VE925  
&sxsrf=ALeKk0114uMowhj84AunGZnkimdCtuptzQ:1627579759993&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=-  
xm4IZURdOWjzM%252Co\\_HChS88PmBxKM%252C\\_&vet=1&usg=AI4\\_-  
kRGRtxUjUbSgqbdgwX89cDUdlnvWw&sa=X&ved=2ahUKEwiK2L-  
L54jyAhUqSjABHe9xCVUQ\\_h16BAgbEAE#imgrc=-xm4IZURdOWjzM](https://www.google.com/search?q=Plan+Nacional+de+Desarrollo+2018-2022:+Pacto+por+Colombia,+pacto+por+la+equidad.&rlz=1C1CHZO_esVE924VE925&sxsrf=ALeKk0114uMowhj84AunGZnkimdCtuptzQ:1627579759993&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=-xm4IZURdOWjzM%252Co_HChS88PmBxKM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kRGRtxUjUbSgqbdgwX89cDUdlnvWw&sa=X&ved=2ahUKEwiK2L-L54jyAhUqSjABHe9xCVUQ_h16BAgbEAE#imgrc=-xm4IZURdOWjzM)

- Del Médico, F. (2021). Tecnología en la cadena de suministro: ¿qué pueden aprender las empresas de la transformación digital? <https://maplink.global/es/blog/tecnologia-en-la-cadena-de-suministro/>
- Dieck Assad, Flory A.; Peralta Solorio, Ernesto. (2014). Importancia de la energía para el crecimiento económico de México. *Entreciencias: diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 2 (5), 287-300. <https://www.redalyc.org/pdf/4576/457645127007.pdf>
- Dirección Nacional de Logística del Ministerio de Defensa Nacional (s.f.). Plan Maestro Logístico (PML)
- Domenech, P. (2020). Tecnologías de producción de hidrógeno basadas en métodos biológicos. [https://www.google.com/search?q=Domenech+Producci%C3%B3n+biol%C3%B3gica+de+hidr%C3%B3geno+verde%2C+fermentaci%C3%B3n+oscura%2C+Biofot%C3%B3lisis+directa+e+indirecta&rlz=1C1SQJL\\_esCO873CO873&oq=Domenech+%09+Producci%C3%B3n+biol%C3%B3gica+de+hidr%C3%B3geno+verde%2C+fermentaci%C3%B3n+oscura%2C+Biofot%C3%B3lisis+directa+e+indirecta&aqs=chrome..69i57.2516j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Domenech+Producci%C3%B3n+biol%C3%B3gica+de+hidr%C3%B3geno+verde%2C+fermentaci%C3%B3n+oscura%2C+Biofot%C3%B3lisis+directa+e+indirecta&rlz=1C1SQJL_esCO873CO873&oq=Domenech+%09+Producci%C3%B3n+biol%C3%B3gica+de+hidr%C3%B3geno+verde%2C+fermentaci%C3%B3n+oscura%2C+Biofot%C3%B3lisis+directa+e+indirecta&aqs=chrome..69i57.2516j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- Duque, I., Mesa, D., (2021). Transición energética. Un legado para el presente y el futuro de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica>
- Farla, J., Markard, J., Raven, R., & Coenen, L. (2012). Sustainability transitions in the making: A closer look at actors, strategies and resources. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(6), 991–998. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.02.001>
- Flores, J. (2018). Método para la mejora del suministro sostenible de energía eléctrica renovable con celdas fotovoltaicas en las zonas rurales de la región Arequipa. Trabajo de Máster en Ciencias mención en Gerencia Medioambiental. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/7214/ELMflaja.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gallardo, H. (2007). Elementos de investigación académica. (30° reimp.). Universidad Estatal a Distancia. (Original publicado en 1991).

García, J (2018). Gestión de la cadena de suministro: análisis del uso de las TIC y su impacto en la eficiencia. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/46224/1/T39544.pdf>

García, G. (2022). Así se mide la eficiencia de la producción de hidrógeno verde por división fotoelectroquímica. [https://www.hibridosyelectricos.com/coches/eficiencia-produccion-hidrogeno-verde-division-fotoelectroquimica\\_64484\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/coches/eficiencia-produccion-hidrogeno-verde-division-fotoelectroquimica_64484_102.html)

Gil, S., González, J., Núñez, J. (2018). Modelo de negocios para la gestión de la cadena de suministro: una revisión y análisis biométrico. I+D Revista de Investigaciones. Vol. 11, N° 1, pp. 38-55. <https://www.udi.edu.co/revistainvestigaciones/index.php/ID/article/view/159/164>

Gindner, K. (2007). Logistik als zentraler Wettbewerbsfaktor in der Pharmaindustrie. Pharm, 69, 660–665.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2011). Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren\\_report\\_es-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_es-1.pdf)

Guerron, J. (2021). *Generador de Hidrogeno verde para condiciones marinas* (trabajo de grado). Universidad de los Andes. [https://www.google.com/search?q=Guerr%C3%B3n+\(2021\)+Generador+de+Hidr%C3%B3geno+verde+para+las+condiciones+marinas&rlz=1C1SQJL\\_esCO873CO873&oq=Guerr%C3%B3n+\(2021\)%09Generador+de+Hidr%C3%B3geno+verde+para+las+condicion](https://www.google.com/search?q=Guerr%C3%B3n+(2021)+Generador+de+Hidr%C3%B3geno+verde+para+las+condiciones+marinas&rlz=1C1SQJL_esCO873CO873&oq=Guerr%C3%B3n+(2021)%09Generador+de+Hidr%C3%B3geno+verde+para+las+condicion)

es+marinas&aqs=chrome..69i57.2402j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-  
8#bsht=CgVic2hocBIECAQwAQ

Hekkert, M., Suurs, R., Negro, S., Kuhlmann, S., & Smits, R. (2007). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(4), 413–432. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002>

Herrera, Milton M., & Trujillo-Díaz, J. (2021). Towards a strategic innovation framework to support supply chain performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, ahead-of-p(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ijppm-03-2020-0131>

Herrera, Milton M., Uriona, M., & Dyrner, I. (2020). Dynamics performance of the wind-power supply chain with transmission capacity constraints. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(2), 1142–1148. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1.pp1142-1148>

Herrera, Milton M, & Trujillo-Díaz, J. (2021). Towards a strategic innovation framework to support supply chain performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, February. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2020-0131>

Jair, O. (2020). Estrategia eco pedagógica que disminuye el daño ambiental por la acción antrópica en el corregimiento del encano, municipio de pasto, departamento de Nariño (trabajo de maestría).

[https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4796/Jurado\\_Gam ez\\_Oscar\\_Jair\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4796/Jurado_Gam ez_Oscar_Jair_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Jiménez, F., Restrepo, A. y Mulcue, Luis. (2019). Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28 (52), 9-26. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9651>

- Jiménez, F. (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil (trabajo de grado). <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>
- Kishna, M., Niesten, E., Negro, S., & Hekkert, M. P. (2017). The role of alliances in creating legitimacy of sustainable technologies: A study on the field of bio-plastics. *Journal of Cleaner Production*, 155, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.089>
- Köhler, J., De Haan, F., Holtz, G., Kubezko, K., Moallemi, E., Papachristos, G., & Chappin, E. (2018). Modelling sustainability transitions: An assessment of approaches and challenges. *Journal Of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(1). <https://doi.org/10.18564/jasss.3629>
- Lache, M. (2015). Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Panorama en Colombia. *Revista Elementos*, 5, 95-111
- Lo, C. C., Wang, C. H., & Huang, C. C. (2013). The national innovation system in the Taiwanese photovoltaic industry: A multiple stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(5), 893–906. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.08.016>
- López, F. (2016). “Reacciones de oxidación selectiva en Química Orgánica promovidas por la luz (tesis doctoral)
- López, V. Alcalá, C. Moreno, L (2012). La Cadena de Suministro de la Energía Solar. *Revista*. N° 43, pp. 18-23. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94424470003.pdf>
- López Torres, V., Alcalá Álvarez, M., & Moreno Moreno, L. (2012). La cadena de suministro de la energía solar. *ConCiencia Tecnológica*, 43.
- Martínez, P. (2021). *Producción de hidrogeno negro*. <http://www.obela.org/analisis/produccion-de-hidrogeno-para-combustible>
- Mohammad, O. Paso, K. Rodríguez, S. Øi, E., Manenti, F. y Hillestad, M. (2020). Integración de Procesos de Hidrógeno Verde: Descarbonización de Industrias Químicas.

- <https://openarchive.usn.no/usn-xmlui/handle/11250/2430515/browse?type=author&value=Hillestad%2C+Magne>
- Naciones Unidas. (2021). *Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Nature communications (2023): Sustainable H2 production and hydrogenation of chemicals in a coupled photoelectrochemical device – a life cycle net energy assessment; Xinyi Zhang, Michael Schwarze, Reinhard Schomäcker, Roel van de Krol, and Fatwa F. Abdi.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955–967. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>
- Ministerio de Energía y Minas (2020). <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24226685/MemoriasCongresoMME-2020.pdf>
- Ministerio de Hacienda y Crédito público. (2020). decreto 829 de 2020 (10 de junio). Por el cual se reglamentan los artículos 11, 12, 13 Y 14 de la Ley 1715 de 2014, se modifica y adiciona el Decreto 1625 de 2016, Único Reglamentario en Materia Tributaria y se derogan algunos artículos del Decreto 1073, Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20829%20DEL%2010%20DE%20JUNIO%20DE%202020.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica>
- Miranda, M. (2013). Estudio de prefactibilidad de una planta de producción de hidrógeno a partir de energía eólica (trabajo de titulación)

- Mostafa, E., Shinji, K. Yukio, H. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 107-154
- Monllor, D. (2010). Foto electroquímica de electrodos semiconductores nano cristalinos: proceso de transferencia de carga y estrategias de mejora de la foto actividad (tesis doctoral)
- Morales, A. (2016). Electrocatálisis y fotocátalisis para la producción de hidrógeno a partir de agua, utilizando metalocorrolatos y metalopofirinas (tesis doctoral).
- Moreno, A. (2022). Salud y medio ambiente. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 65(3), 8-18. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2022.65.3.02>
- Moreno, L. y Vargas, C. (2013). La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia (trabajo de maestría).
- Muñoz, J. y Beleño, W. (2021), Análisis del potencial del uso de hidrogeno verde para la reducción de emisiones de carbono en Colombia (trabajo de grado).
- Negro, S. O., Alkemade, F., & Hekkert, M. P. (2012). Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3836–3846. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.043>
- Nieto, A. (2011). Tecnologías limpias que cambian el mundo. *Revista Digital Medio Ambiente Ser Verde*, (142). <https://www.mundohvacr.com.mx/2011/10/nueva-zelandia-tecnologias-limpas-que-cambian-el-mundo/>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2019) Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortiz, A. (2015). Enfoques y métodos de investigación en las ciencias sociales y humanas. Bogotá: Ediciones de la U. Recuperado de <https://books.google.co.ve/>
- Pinto, M., Gálvez, C (1996). Análisis documental de contenido. Procesamiento de información. Madrid: Síntesis.

- Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente. (2016). Opciones de energía verde: los beneficios, riesgos y compensaciones de las tecnologías bajas en carbono para la producción de electricidad. Informe del Panel Internacional de Recursos. EG Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.).  
<https://www.resourcepanel.org/es/informes/opciones-de-energ%C3%ADa-verde-beneficios-riesgos-y-compensaciones-tecnolog%C3%ADas-bajas-en-carbono-electricidad>.
- Ponce, J. (2019). La energía solar distribuida y las smart grid como modelo para diversificar la matriz energética de Ecuador. Tesis doctoral. Universidad UNED. [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:ED-Pg-TecInd-Maponce/PONCE\\_JARA\\_\\_Marcos\\_Antonio\\_Tesis.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:ED-Pg-TecInd-Maponce/PONCE_JARA__Marcos_Antonio_Tesis.pdf)
- Polanco, R. (2018). Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31495>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2021). Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>
- Rivera, G. (2016). “El hidrógeno como fuente alterna de energía” (trabajo de grado).
- Rodríguez, C. (2021). Cuestiones jurídicas sobre el papel de los entes locales en la transición energética: hacia la producción y el consumo del hidrogeno renovables. Revista de Estudios de la Administración Local y Autonómica, 16, 71-97.  
<https://www.redalyc.org/journal/5764/576469691004/html/¿>
- Rodriguez, P. (2022) Elegir el mejor método de almacenamiento de hidrógeno. (2022). Cicenergigune.com. tomado de : <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-almacenamiento-hidrogeno->



Unidad de Planeación Minero Energético. (2021). Generación aprobada.  
<https://www1.upme.gov.co/>

Unidad de Planeación Minero Energético. (2021). Balance nacional de energía 2020.  
[https://www1.upme.gov.co/Estadisticas/Archivos/BalanceEnergetico/BNE/BNE\\_2020.xlsx](https://www1.upme.gov.co/Estadisticas/Archivos/BalanceEnergetico/BNE/BNE_2020.xlsx)

Valderrama, M., Ocampo, P., León, H., Rodríguez, L., (2018) La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia y su situación actual. Revista Avances Investigación en Ingeniería. Vol. 15, N° 1, pp. 112-130. DOI:10.18041/1794-4953/avances.1.1368.

Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S. y Ayabaca, C. (2016). Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. Evento: II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación (La Plata, 2016). ISBN: 978-950-34-1361-6 Páginas: 95-104  
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77368>

Yáñez, J. (2020). Ventana al conocimiento, Open Mind BBVA (April),  
<https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/innovaciones-energias-renovables-mas-sostenibles/>

Yunez, A., Barbosa, R. y Escobar, B. (2016). Sistema híbrido solar-hidrógeno integrado a una casa sustentable en México. Revista internacional de energía e hidrogeno

World Economic Forum. (2022). *Este es el estado de la energía mundial - en gráficos*.  
<https://es.weforum.org/agenda/2022/08/este-es-el-estado-de-la-energia-mundial-en-graficos/>

Cortés, S. y Arango, A. (2018). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. Revista Ciencias Estratégicas, 25, (38), 375-390.