

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS

**CARRERA DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA**

Título de la Investigación

**ANÁLISIS DEL USO DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
PARA MEDIOS DE TRANSPORTE AUTOMOTRIZ EN COSTA RICA**

Profesor

Álvaro Rojas Camacho

SEDE ARANJUEZ

FEBRERO, 2025

Tabla de Contenido

Capítulo I. Planteamiento del Problema	3
1.1. Planteamiento	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3. Justificación.....	5
1.4. Antecedentes	7
Capítulo II. Marco Teórico.....	10
Capítulo III. Marco Metodológico	18
3.1. Diseño de la investigación.....	18
3.2. Fuentes de información	18
3.3. Técnicas de recolección de información	18
3.4. Técnicas de análisis de datos.....	19
3.5. Validez y confiabilidad.....	19
Capítulo IV: Análisis de Resultados.....	20
4.1 Hidrógeno como vector energético	20
4.2 Producción del hidrógeno.....	20
4.3 Transporte y almacenamiento del hidrógeno.....	21
4.4 Uso de compuestos portadores de hidrógeno	21
4.5 Celdas de combustible.....	22
4.6 Comparativa de compuestos.....	22
4.7 Infraestructura de suministro de combustible en Costa Rica	22
4.8 Comparación de costos entre hidrógeno y otros combustibles.....	23
4.9 Tecnologías Actuales de Hidrógeno como Combustible para el Transporte	23
8.10 Infraestructura de Suministro de Combustible en Costa Rica	24
8.11 Comparación de Costos entre Hidrógeno y Otros Combustibles	26
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones.....	29

Capítulo I. Planteamiento del Problema

1.1. Planteamiento

Costa Rica ha avanzado considerablemente en el uso de fuentes renovables para la generación de electricidad, logrando que más del 90% de su oferta energética secundaria provenga de recursos limpios. Sin embargo, este avance contrasta con la realidad del sector transporte, donde el uso de combustibles fósiles continúa siendo predominante, especialmente en la flota vehicular. Esta dependencia representa no solo un desafío ambiental, debido a las emisiones contaminantes que genera, sino también un riesgo económico vinculado a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo y a la necesidad de importación constante.

En este contexto, el hidrógeno se perfila como una opción energética con alto potencial para diversificar la matriz energética primaria del país. Sus posibles aplicaciones en el transporte automotriz abren la puerta a una transformación estructural del sistema energético nacional, promoviendo la autosuficiencia energética, la reducción de emisiones y el fomento de nuevas industrias tecnológicas. No obstante, su implementación requiere una evaluación rigurosa, particularmente desde la perspectiva económica.

La producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno en vehículos implican altos costos iniciales, el desarrollo de una infraestructura específica, y la adaptación tecnológica del parque automotor. Por lo tanto, surge la necesidad de analizar de manera integral el impacto económico que podría tener, entre 2025 y 2030, la incorporación de combustibles a base de hidrógeno en el sector transporte automotriz costarricense, considerando variables como el costo-beneficio frente a otras fuentes, el estado actual de la infraestructura nacional, y el potencial de generación con energías renovables.

La problemática radica en que, si bien se reconoce el valor ambiental y estratégico del hidrógeno, aún no se cuenta con estudios específicos que aborden su viabilidad económica en el país desde un enfoque orientado al transporte automotor.

Esta falta de análisis representa una brecha en el conocimiento necesario para una toma de decisiones informada por parte de los sectores público y privado. Por ende, esta investigación busca aportar evidencia que permita valorar si el desarrollo de una economía del hidrógeno en el ámbito vehicular es económicamente sostenible para Costa Rica en el corto y mediano plazo.

Pregunta Problema

¿Cuál es el impacto económico en Costa Rica, período 2025-2030 del uso de combustibles a partir del hidrógeno en los medios de transporte automotriz?

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar el impacto económico en el uso de combustibles a partir del hidrógeno para medios de transporte automotriz en Costa Rica, período 2025-2030

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las tecnologías actuales utilizadas como combustible a partir del hidrógeno para medios de transporte automotriz.
- Identificar la infraestructura para el suministro de combustible con que cuenta el país, que podría ser utilizada para el uso del hidrógeno.
- Comparar costos del uso de los recursos empleados como combustibles para medios de transporte automotriz.

1.3. Justificación

En el desarrollo que presenta la humanidad hacia la búsqueda de opciones energéticas no solo más amigables con el ambiente, sino también más sostenibles a largo plazo, el uso del hidrógeno en sus diferentes formas (hidrógeno directo, amoníaco, metanol y agua) presenta cada vez más relevancia. En el caso de Costa Rica, específicamente en el área automotriz, estos desarrollos impactan no solo técnicamente sino también económicamente.

La transición hacia un modelo energético basado en hidrógeno podría generar beneficios económicos significativos, incluyendo la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles importados, la creación de nuevas oportunidades de empleo en la producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno, y el desarrollo de tecnologías innovadoras que podrían posicionar al país como líder en energías renovables en la región. Esto se alinea directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, especialmente:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante, al promover el acceso a fuentes energéticas sostenibles, modernas y no contaminantes.
- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, al generar nuevos sectores productivos y empleos verdes en la economía nacional.
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, al incentivar la investigación, el desarrollo tecnológico y la infraestructura necesaria para una economía basada en hidrógeno.
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, al contribuir con sistemas de transporte más limpios.
- ODS 13: Acción por el clima, al reducir las emisiones del sector transporte, uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero.

Este estudio se circunscribe al uso del hidrógeno en la oferta energética primaria, ya que su aplicación tendría el potencial de sustituir las fuentes de energía basadas en petróleo que actualmente alimentan la flota vehicular del país. Aunque es cierto que en muchos países la transición hacia energías limpias se concentra en la oferta energética secundaria (la conversión y distribución de la energía ya transformada), Costa Rica presenta una particularidad: según Madrigal (2024), más del 90 % de la oferta energética secundaria proviene de fuentes renovables. En 2023, el

94,91 % de la producción del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) provino de fuentes limpias nacionales, siendo la hidroeléctrica la principal fuente con un 69,74 %, seguida de la geotérmica con un 12,39 % y la energía eólica con un 12,24 %.

Sin embargo, el problema radica en la oferta primaria, ya que gran parte de la energía utilizada en el sector automotriz aún depende de los derivados del petróleo, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y al calentamiento global. En este contexto, el uso del hidrógeno como vector energético surge no solo como una alternativa lógica, sino como una necesidad urgente.

El hidrógeno tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y mitigar los efectos negativos del cambio climático. No obstante, su adopción práctica plantea diversos desafíos, como las formas y fuentes de producción de hidrógeno que deben basarse en energías renovables (como la solar, eólica y otras fuentes limpias), así como los métodos de transporte y almacenamiento. Además, es crucial analizar cómo el hidrógeno puede derivarse de otros elementos como el amoníaco, el metanol o incluso el agua para su uso en el sector automotriz.

Por lo tanto, este estudio busca proporcionar una visión integral de los diferentes aspectos que están involucrados en la viabilidad del hidrógeno como fuente energética primaria en Costa Rica. La producción sostenible, las alternativas de conversión y almacenamiento, y la adaptación de los métodos de transporte son algunos de los puntos claves que se deben evaluar con el fin de garantizar que la transición hacia un sistema energético más limpio no solo sea posible, sino también beneficiosa para el desarrollo económico, social y ambiental del país.

La necesidad de una transición hacia energías más limpias y sostenibles en Costa Rica, junto con el creciente interés por el hidrógeno como opción viable para sustituir los combustibles fósiles, justifica la realización de este estudio, que busca analizar de manera detallada los retos y oportunidades que presenta la adopción del hidrógeno en el ámbito automotriz del país, considerando tanto su impacto ambiental como económico. Esta investigación, por lo tanto, se enmarca dentro de los esfuerzos globales por avanzar hacia un desarrollo sostenible, resiliente e inclusivo, en línea con la Agenda 2030 y los ODS mencionados.

1.4. Antecedentes

En este apartado se analizarán algunos antecedentes tanto a nivel nacional como internacional, sobre el uso del hidrógeno como combustible en el sector del transporte. Estos estudios ofrecen una visión integral del progreso en la transición hacia una energía más sostenible, situando al hidrógeno como un pilar clave en este tema.

Estos antecedentes se valoran según los temas claves en el desarrollo del uso del hidrógeno, así podemos ver el caso de **“El hidrógeno como fuente de energía renovable en América Latina”** donde **Rodríguez et al. (2021)** valoran el potencial del hidrógeno como fuente de energía renovable en América Latina, destacando especialmente a países como Chile y Costa Rica debido a su alta capacidad de generación de energía renovable. El estudio concluye que el hidrógeno verde podría desempeñar un papel fundamental en la descarbonización de los sectores de transporte y energía, aprovechando recursos como la energía solar, eólica y geotérmica. También recomiendan a los gobiernos de la región priorizar políticas que incentiven la producción de hidrógeno verde para maximizar ese potencial.

Se analiza también el informe **“transición energética y adopción de hidrógeno en el sector automotriz”** donde la **International Energy Agency (IEA, 2019)** establece los avances globales en la adopción de vehículos a hidrógeno y tecnologías emergentes para su producción. El informe subraya que la transición hacia un modelo energético basado en hidrógeno requiere un enfoque coordinado de políticas públicas que apoyen la investigación y el desarrollo de infraestructuras adecuadas. Concluye que las estrategias gubernamentales son esenciales para acelerar la adopción del hidrógeno en el sector automotriz.

En lo referente al impacto del hidrógeno en la industria automotriz, podemos ver a **Vázquez et al. (2020)** donde se comparan los costos y beneficios económicos del hidrógeno frente a otros combustibles alternativos como la electricidad y el gas natural, el estudio reveló que, aunque la inversión inicial en infraestructura de hidrógeno es significativa, a largo plazo, los beneficios económicos, como la creación de empleos y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, superan los costos. También recomiendan un enfoque escalonado para la implementación del hidrógeno, combinando incentivos económicos con desarrollo tecnológico.

Sumado a lo anterior, **Gonzalez y Pérez (2021)** analizaron las barreras para la adopción masiva de vehículos a hidrógeno en países en desarrollo. Se identificaron desafíos en la infraestructura de estaciones de servicio y en el almacenamiento del

hidrógeno. El estudio recomienda desarrollar políticas específicas para fomentar la inversión en infraestructuras críticas y reducir las barreras logísticas asociadas con la distribución de hidrógeno.

En lo referente a Costa Rica, se destaca por su infraestructura de generación de energía renovable, que según lo mencionan **Bolaños et al. (2022)** en su estudio llamado **“El potencial de las energías renovables para la producción de hidrógeno en Costa Rica”**, donde destaca que el país está bien posicionado para integrar el hidrógeno como combustible en su sector automotriz. La investigación concluye que el país podría liderar en la producción de hidrógeno utilizando fuentes limpias, lo que contribuiría significativamente a la reducción de emisiones y fortalecería su independencia energética.

Cuando se considera el hidrógeno y sus diferentes fuentes de producción, se puede hacer un análisis puntual según algunos elementos químicos específicos como amoníaco, Metanol y agua entre otros, según Serrano et al. (2020) en su investigación titulada **“Uso del amoníaco como combustible en vehículos de hidrógeno”** se explora el uso del amoníaco como portador de hidrógeno para aplicaciones en transporte. Aunque el amoníaco no es un combustible limpio por sí solo, su capacidad para liberar hidrógeno eficientemente lo convierte en una alternativa viable para vehículos de hidrógeno. Se concluye que, por su facilidad de almacenamiento y transporte, el amoníaco podría desempeñar un papel importante en la transición hacia el hidrógeno, especialmente en regiones con limitaciones de infraestructura.

Como ya se indicó el hidrógeno puede ser utilizado integrado en diferentes elementos químicos, pero también puede ser usado en forma directa, así lo indican **Zhao et al. (2019)** quienes en su estudio llamado **“Uso de hidrógeno directo como combustible para vehículos”** investigan el uso de hidrógeno directo en pilas de combustible para automóviles. Su investigación demostró que el hidrógeno directo es una opción viable para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos. Sin embargo, los desafíos relacionados con la distribución y almacenamiento del hidrógeno aún persisten. Se recomienda la inversión en investigación para mejorar la eficiencia de las pilas de combustible y la infraestructura de suministro.

También el agua como agente portador de hidrógeno es una opción viable en el uso de este elemento, así lo indican **Singh et al. (2021)** en su estudio **“Uso del agua para la producción de hidrógeno como combustible automotriz”** examinan la

electrólisis del agua como un método para producir hidrógeno de forma limpia y eficiente. El estudio destacó los avances en la eficiencia de los electrolizadores y recomienda la integración de esta tecnología con fuentes de energía renovables para potenciar su viabilidad en el sector automotriz.

Otro compuesto muy utilizado en el uso del hidrógeno es el metanol, según **Kumar y Yadav (2020)** en su estudio “**Uso del metanol como fuente de hidrógeno en el sector automotriz**”, este es una fuente de hidrógeno, argumentando que su facilidad de transporte y almacenamiento lo hace una opción atractiva para el sector automotriz. El estudio concluye que el metanol podría ser una alternativa económica y ambientalmente viable para producir hidrógeno, comparado con otros compuestos portadores.

Estos antecedentes, evidencian la versatilidad del hidrógeno como vector energético, no solo en el transporte automotriz, sino también en diversas aplicaciones. Se explorarán las ventajas y desafíos asociados a diferentes portadoras de hidrógeno, como el amoníaco, el metanol y el hidrógeno directo, así como su potencial para contribuir a una matriz energética más sostenible.

Capítulo II. Marco Teórico

La dependencia de los derivados del petróleo utilizados como combustibles en el transporte en Costa Rica no solo genera un impacto económico significativo en la economía nacional, sino que también tiene repercusiones ambientales de gran alcance, debido a que el país debe importar la mayor parte de estos combustibles, por lo que se incrementa la vulnerabilidad ante las fluctuaciones de precios del mercado internacional del petróleo, lo que puede afectar el costo de vida, la inflación y la competitividad de diversos sectores productivos.

Además, la quema de estos combustibles libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, uno de los principales gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global. Esto contribuye al cambio climático, exacerbando fenómenos como el aumento de la temperatura, alteraciones en los patrones de lluvia, incremento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, y afectaciones en la biodiversidad y los ecosistemas del país.

7.1) Concepto de Vector Energético y su Relación con el Hidrógeno

Según la **Fundación Naturgy. (2020)**. El hidrógeno se considera un elemento clave en el despliegue masivo de las energías renovables, puesto que puede compensar la intermitencia de estas al actuar como portador energético transportable y almacenable en las infraestructuras de gases que ya existen en la mayoría de los países desarrollados. Este concepto se refiere a la capacidad del hidrógeno para almacenar y transportar energía de manera eficiente, facilitando su integración en diversos sectores y contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

7.2) Almacenamiento de Energía

Existe una alta viabilidad de adoptar el hidrógeno como un portador de energía y fuente de combustible. Indicando varias ventajas que el hidrógeno presenta, así como algunos inconvenientes. Según **Mazloomi & Gomes, 2012**, uno de los aspectos importantes es el almacenamiento de energía que, de otro modo, se desperdiciaría durante la generación en redes eléctricas de gran escala, mediante su desvío en períodos de baja demanda hacia cargas ficticias. Indican que para el año 2050, solo en Estados Unidos habrá una demanda de más de 42 millones de toneladas métricas de hidrógeno, equivalentes a 45 mil millones de galones de gasolina, suficiente para abastecer a 342 millones de vehículos ligeros para un recorrido anual de 8.2 billones de kilómetros.

7.3) Transporte, Distribución de Energía y Sustitución de Combustibles Fósiles

Según Rifkin (2003), el hidrógeno debido a su alta densidad energética por masa y su naturaleza como el elemento más ligero, ofrece diversas opciones de almacenamiento y transporte que pueden adaptarse a diferentes necesidades y escalas de distribución. Estas opciones incluyen:

El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso a alta presión (generalmente entre 350 y 700 bares) en cilindros o tanques especializados. Esta forma es común en aplicaciones de transporte, como vehículos de hidrógeno, debido a su facilidad de recarga y distribución en estaciones de servicio especializadas. Sin embargo, su baja densidad volumétrica en comparación con otros combustibles representa un desafío en términos de eficiencia de almacenamiento.

Para mejorar la densidad energética por volumen, el hidrógeno puede enfriarse a temperaturas extremadamente bajas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) y almacenarse en forma líquida. Este método es ideal para el transporte a largas distancias, como en barcos o camiones cisterna, debido a la mayor cantidad de hidrógeno que se puede transportar en comparación con su forma gaseosa. No obstante, el proceso de licuefacción es energéticamente costoso y requiere aislamiento térmico avanzado para evitar la evaporación del hidrógeno **(Endress & Hauser, s.f.)**.

Para mejorar la densidad energética por volumen, el hidrógeno puede enfriarse a temperaturas extremadamente bajas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) y almacenarse en forma líquida. Este método es ideal para el transporte a largas distancias, como en barcos o camiones cisterna, debido a la mayor cantidad de hidrógeno que se puede transportar en comparación con su forma gaseosa. No obstante, el proceso de licuefacción es energéticamente costoso y requiere aislamiento térmico avanzado para evitar la evaporación del hidrógeno. **(Endress & Hauser, s.f.)**.

Otra alternativa es transportar hidrógeno en compuestos químicos como amoníaco (NH_3), metanol o líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHC, por sus siglas en inglés). Estos compuestos permiten almacenar y transportar hidrógeno de manera más segura y eficiente, ya que pueden manejarse a temperatura ambiente sin necesidad de altas presiones o temperaturas extremadamente bajas. Luego, el hidrógeno se libera mediante procesos químicos en el punto de consumo.

7.4) Implicaciones para la Economía del Hidrógeno

La versatilidad en el transporte del hidrógeno permite su integración en una economía energética global, donde podría producirse en regiones con abundante energía renovable (como Costa Rica, con su alto potencial hidroeléctrico, solar y eólico) y exportarse a mercados con alta demanda energética. Esta capacidad de distribución a gran escala es clave para la transición hacia una economía baja en carbono y para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte y la industria.

A medida que las tecnologías de almacenamiento y transporte de hidrógeno mejoran, su viabilidad como fuente de energía limpia y sostenible se fortalece, acercándonos a un futuro donde este gas juega un papel central en la matriz energética mundial.

El hidrógeno, como alternativa energética, tiene un gran potencial para sustituir a los combustibles fósiles, especialmente en sectores industriales de difícil descarbonización como la industria pesada (acero, cemento, productos químicos) y el transporte marítimo. Este concepto se menciona en el trabajo de **Lewis & Nocera (2006)**, quienes analizan el potencial del hidrógeno como una fuente limpia que, al ser utilizado como combustible, solo genera vapor de agua como subproducto. Esto representa una importante oportunidad para reducir la huella de carbono de estas industrias.

En el transporte marítimo, el hidrógeno puede reemplazar los combustibles fósiles como el fuelóleo pesado, el cual es altamente contaminante. El uso de celdas de combustible de hidrógeno o motores de hidrógeno en buques puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ y otras sustancias nocivas como los óxidos de nitrógeno (NO_x).

En cuanto al impacto ambiental, el hidrógeno se destaca por ser una fuente de energía sin emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a mitigar el calentamiento global y la contaminación del aire. Además, su implementación en sectores industriales y de transporte marítimo permite una diversificación de fuentes energéticas, lo que reduce la dependencia de fuentes contaminantes.

Sin embargo, aún existen desafíos tecnológicos y económicos, como los costos de producción y la infraestructura necesaria para la distribución del hidrógeno. A pesar de estas barreras, el desarrollo continuo de las tecnologías del hidrógeno podría ser un motor clave para la transición hacia una economía más verde. Antes de definir el

hidrógeno como una fuente casi inagotable de energía debemos comprender su presencia en el universo y por ende en nuestro planeta.

Según **Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017)**, el hidrógeno, el elemento más abundante del universo, constituye aproximadamente el 75% de la masa elemental del cosmos y se encuentra predominantemente en estrellas y nubes interestelares, principalmente en forma de plasma. Su simplicidad estructural compuesto por un solo protón y un electrón en su estado neutro lo convierte en un componente esencial en la formación de otros elementos a través de procesos nucleosintéticos como la fusión en estrellas.

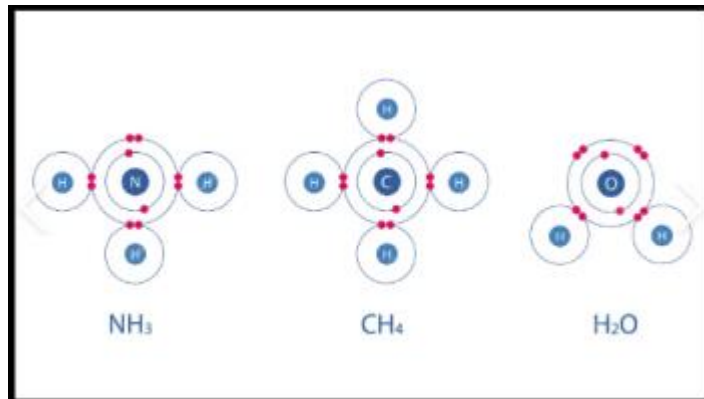
Es de esta forma que el hidrógeno es una fuente casi inagotable de energía, con aplicaciones en diferentes campos entre las cuales se pueden mencionar el transporte de cualquier tipo (aéreo, terrestre o marino), o la generación eléctrica para usos residencial, comercial e industrial. La separación del hidrógeno de las moléculas de diferentes elementos químicos como Amoniaco, Metanol, o agua convidada en celdas de combustible genera energía eléctrica y procesos de combustión.

Con lo indican **Mazloomi & Gomes (2012)** en las celdas de combustible, el hidrógeno se utiliza en un proceso electroquímico que genera electricidad. Este sistema funciona al separar los electrones y protones de las moléculas de hidrógeno en el ánodo, lo que permite que los electrones fluyan a través de un circuito externo para generar corriente eléctrica. En el cátodo, los protones, los electrones y el oxígeno se combinan, formando agua como subproducto. Las celdas de combustible son ampliamente utilizadas en vehículos eléctricos, sistemas estacionarios de generación de energía y dispositivos portátiles.

Por otro lado, el hidrógeno también puede emplearse mediante combustión directa, generando energía térmica que impulsa motores o turbinas. Este enfoque tiene aplicaciones en sistemas de transporte y generación eléctrica. La principal ventaja de la combustión de hidrógeno es que produce vapor de agua como subproducto, lo que minimiza las emisiones contaminantes.

Figura 1

Moléculas de Amoníaco, Metanol y agua



Nota: Representación de las estructuras moleculares de amoníaco (NH₃), metanol (CH₄O) y agua (H₂O) mediante diagramas de Lewis. Estas moléculas son consideradas portadoras o fuentes de hidrógeno para su uso como combustible en el sector transporte, debido a su alta disponibilidad y potencial energético. Imagen adaptada de www.freepik.es (2022).

7.4) Celdas de combustible:

Dentro de los sistemas electroquímicos las celdas combustibles son dispositivos que convierten la energía química de un combustible directamente en electricidad. Existen diversos tipos de celdas de combustible, dependiendo del tipo de combustible que se utilice para liberar el hidrógeno necesario para producir electricidad, según el electrolito que utilizan y el tipo de combustible empleado. A continuación, se presentan algunos tipos de celdas de combustible que utilizan metanol, amoníaco y agua como fuentes de energía:

- **Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC):**

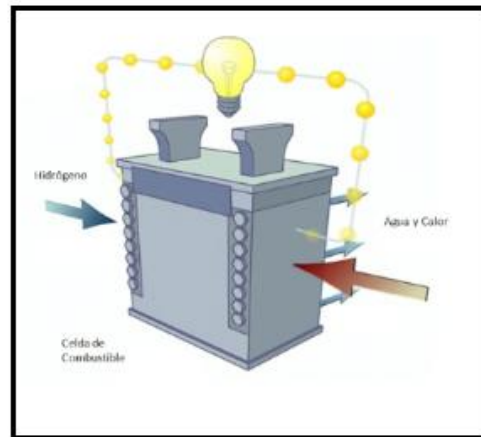
Estas celdas utilizan metanol como combustible y oxígeno del aire como oxidante. Son conocidas por su alta densidad de energía y facilidad de almacenamiento y transporte del metanol. Son adecuadas para aplicaciones en dispositivos portátiles y sistemas de energía estacionarios (**Detiposplus, s.f.**).

Segun **Inesem. (2015)** El matanol usado es líquido, el cual se oxida directamente en el ánodo para producir electricidad. Son similares a las celdas de membrana de intercambio de protones (PEM) pero emplean metanol en lugar de hidrógeno.

- **Celda de Combustible de Amoníaco:**
 Estas celdas emplean amoníaco como combustible y oxígeno del aire como oxidante. Ofrecen alta eficiencia y bajas emisiones, siendo aptas para aplicaciones en sistemas de energía estacionarios (**Detiposplus, s.f.**).
 Como lo indican **Saab, et al., (2019)**, en estas celdas el amoníaco se oxida en el ánodo para generar electricidad. El amoníaco es un compuesto libre de carbono, lo que significa que su uso en celdas de combustible no produce emisiones de CO₂, siendo una opción atractiva para energía limpia.
- **Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC):**
 Aunque no utilizan agua como combustible, estas celdas emplean ácido fosfórico como electrolito y pueden operar a temperaturas de hasta 200°C. Son utilizadas en aplicaciones estacionarias, como hospitales y hoteles, debido a su alta eficiencia y capacidad para utilizar combustibles como gas natural y biogás.
- **Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio de Proton (PEM):**
 Según se establece en **Libre Texts español, (2021)**, aunque las celdas de intercambio protónico comúnmente utilizan hidrógeno como combustible, el hidrógeno puede obtenerse a través de la electrólisis del agua, donde el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad. El hidrógeno producido puede ser utilizado en las celdas PEM para generar electricidad, cerrando así un ciclo sostenible si la electricidad utilizada en la electrólisis proviene de fuentes renovables.
- **Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC):**
 Lo indicado por el **Instituto de Síntesis Química y Catálisis Homogénea (ISQCH)**, es que estas celdas operan a altas temperaturas y pueden utilizar una variedad de combustibles, incluyendo hidrógeno, monóxido de carbono y algunos hidrocarburos. El agua puede ser utilizada en el proceso de reformado para producir hidrógeno, que luego es empleado en la celda de combustible.

Figura. 2

Celda de combustible de óxido sólido



Nota: Esquema de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés), tecnología que convierte la energía química del hidrógeno o de combustibles portadores de hidrógeno (como el metanol o el amoníaco) en electricidad mediante reacciones electroquímicas a alta temperatura. Imagen adaptada de <https://www.researchgate.net/>

7.5) Oxidación del Combustible (Reacción en el Ánodo):

Según **Barbi, F. (2023)** en el ánodo el combustible (como hidrógeno, metanol o amoníaco) se oxida, liberando electrones y produciendo iones positivos. Por ejemplo, en una celda de hidrógeno, el hidrógeno se divide en protones (H^+) y electrones (e^-) según la siguiente reacción:

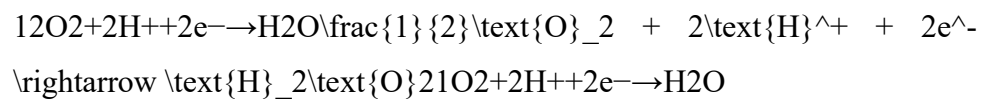


- **Transporte de Iones a través del Electrolito:** como lo indican **O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016)**. destacan la generación eléctrica por medio del transporte de iones a través del electrolito hacia el cátodo. El electrolito es una sustancia que permite el paso de iones, pero bloquea el flujo de electrones, forzando a los electrones a viajar a través de un circuito externo, generando así electricidad.

7.6) Reducción del Oxígeno (Reacción en el Cátodo):

Según **Hoogers, G. (Ed.). (2003)** en el cátodo, el oxígeno del aire se combina

con los iones positivos y los electrones a través del circuito externo, produciendo agua (en forma de vapor) y liberando energía. En una celda de hidrógeno, la reacción es:



Estas tres etapas se producen de forma continua mientras haya suministro de combustible y oxígeno, generando electricidad y subproductos (como vapor agua en el caso de celdas de hidrógeno).

Capítulo III. Marco Metodológico

Esta investigación se enmarca en un enfoque **cualitativo** de carácter **descriptivo y exploratorio**, orientado a comprender en profundidad los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales relacionados con la incorporación del hidrógeno como fuente energética para el transporte automotriz en Costa Rica durante el período 2025-2030. El enfoque cualitativo permite analizar fenómenos complejos en su contexto, interpretando el significado de los datos más allá de su cuantificación.

3.1. Diseño de la investigación

Se empleó un **diseño documental**, sustentado en una **revisión bibliográfica sistemática** y un **análisis documental comparativo**. Esto permitió recopilar, organizar e interpretar información relevante proveniente de fuentes primarias y secundarias tanto nacionales como internacionales, centradas en:

- Tecnologías de producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno.
- Aplicaciones del hidrógeno en el sector transporte.
- Infraestructura disponible en Costa Rica.
- Costos comparativos con combustibles fósiles.
- Modelos de transición energética.
- Estudios de caso de otros países.

3.2. Fuentes de información

Las fuentes utilizadas incluyeron artículos científicos revisados por pares, informes de organismos internacionales (como la Agencia Internacional de Energía), publicaciones gubernamentales (MINAE, CNE), literatura técnica, tesis, libros especializados y reportajes periodísticos. Se priorizó el uso de información publicada entre 2015 y 2025 para asegurar la actualidad y pertinencia de los datos.

3.3. Técnicas de recolección de información

- **Revisión bibliográfica sistemática:** Se definieron criterios de inclusión (relevancia temática, actualidad, rigor científico) y exclusión (duplicación, baja calidad metodológica). Se utilizó una matriz de análisis documental para organizar los hallazgos.

- **Análisis de contenido:** Se aplicó a los documentos seleccionados para identificar categorías emergentes, patrones y relaciones relevantes para la investigación.
- **Desarrollo de escenarios prospectivos:** Se construyeron escenarios hipotéticos de impacto económico bajo diferentes niveles de adopción del hidrógeno (bajo, moderado y alto), considerando variables como inversión en infraestructura, costos de producción y beneficios ambientales.

3.4. Técnicas de análisis de datos

El análisis se realizó mediante una triangulación de fuentes y perspectivas. Se interpretaron los datos cualitativos bajo un enfoque inductivo, articulando los hallazgos con los objetivos de investigación. Asimismo, se elaboraron matrices comparativas para visualizar diferencias y similitudes entre tecnologías y contextos.

3.5. Validez y confiabilidad

Para asegurar la **validez** del estudio se realizó una contrastación de fuentes de diferentes orígenes (académicas, gubernamentales, industriales), garantizando una visión amplia y equilibrada. La **confiabilidad** se fortaleció mediante la sistematización del proceso de selección y análisis documental, y la trazabilidad de cada hallazgo a su fuente original.

Capítulo IV: Análisis de Resultados

4.1 Hidrógeno como vector energético

El hidrógeno es un elemento que destaca por su capacidad para almacenar energía y actuar como vector energético. No obstante, su aprovechamiento eficiente implica procesos complejos que abarcan desde su producción hasta su transporte y almacenamiento.

Cuando el hidrógeno reacciona con el oxígeno en conjunto con un catalizador, genera energía eléctrica mediante el movimiento de electrones en un conductor. Esta reacción química produce agua (H_2O) como subproducto, junto con calor y vapor no contaminantes. Estos atributos posicionan al hidrógeno como una alternativa más limpia frente a los combustibles fósiles, cuya combustión libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2).

4.2 Producción del hidrógeno

El hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza debido a su alta reactividad, lo que lo lleva a formar compuestos estables como el agua y los hidrocarburos. Para usarlo como vector energético, es necesario extraerlo mediante procesos que dependen de la fuente de origen y del tipo de energía utilizada.

Las principales categorías son según **International Energy Agency. (2022)**. El hidrógeno se puede producir de diferentes fuentes (derivados del petróleo o de energías renovable, por lo que se pueden clasificar en colores según su fuente de producción, algunos de estos colores son:

- **Hidrógeno gris:** Se produce a partir de hidrocarburos como gas natural o petróleo. Su producción emite grandes cantidades de CO_2 , siendo un proceso contaminante.
- **Hidrógeno verde:** Se obtiene a partir de agua, utilizando energía renovable como solar o eólica. Este método es más sostenible, ya que no genera emisiones de carbono.

Otros compuestos, como el amoníaco (NH_3) y el metanol (CH_3OH), contienen hidrógeno y pueden usarse como portadores moleculares. Sin embargo, si estos

compuestos derivan de fuentes no renovables, el hidrógeno resultante se clasifica también como "gris".

4.3 Transporte y almacenamiento del hidrógeno

El transporte y almacenamiento del hidrógeno presentan varios desafíos técnicos debido a sus propiedades físicas y químicas.

- **Tamaño molecular:** El hidrógeno, debido a su pequeño tamaño molecular, puede filtrarse a través de materiales convencionales, lo que genera pérdidas durante el transporte y almacenamiento. Esta característica requiere el uso de materiales y técnicas de sellado especializados para minimizar las fugas (Todo Ingenierías, s.f.).
- **Corrosividad:** Aunque el hidrógeno en sí no es corrosivo, puede provocar un fenómeno conocido como "fragilización por hidrógeno" en ciertos metales, debilitando su estructura y causando fallos en infraestructuras diseñadas para otros combustibles, como el gas licuado de petróleo (GLP). Para mitigar este efecto, es necesario utilizar recubrimientos especializados, como polímeros, en tuberías y tanques (Todo Ingenierías, s.f.).
- **Estado líquido:** Para aumentar su densidad energética y facilitar su transporte, el hidrógeno debe ser licuado. Esto requiere enfriarlo a temperaturas extremadamente bajas (aproximadamente -253 °C), lo que incrementa significativamente los costos de licuefacción, almacenamiento y transporte. Además, mantener estas bajas temperaturas implica desafíos técnicos y energéticos considerables (Rincón Educativo, s.f.).

Abordar estos desafíos es esencial para el desarrollo eficiente y seguro de una infraestructura de hidrógeno que apoye su uso como fuente de energía limpia en el futuro.

4.4 Uso de compuestos portadores de hidrógeno

Para superar las limitaciones del hidrógeno puro, se pueden emplear compuestos como el amoníaco y el metanol. Estos portadores moleculares facilitan su transporte y almacenamiento al aprovechar infraestructuras existentes diseñadas para combustibles líquidos o gaseosos.

Ventajas del amoníaco:

- **Mayor densidad energética por volumen:** Permite almacenar más energía en menos espacio.
- **Compatibilidad con infraestructura existente:** Puede utilizarse en sistemas diseñados para GLP, reduciendo la necesidad de nuevas inversiones.
- **Subproducto reutilizable:** El nitrógeno liberado en el proceso puede emplearse en la fabricación de fertilizantes.

Desventajas del amoníaco:

El uso del amoníaco como portador requiere un paso adicional para separar el hidrógeno del nitrógeno, reduciendo la eficiencia del proceso.

4.5 Celdas de combustible

Las celdas de combustible generan energía eléctrica al combinar hidrógeno con oxígeno. Aunque el uso de hidrógeno puro ofrece la mayor eficiencia, implica desafíos logísticos. Los portadores moleculares, como el amoníaco o el metanol, simplifican el transporte, aunque requieren una etapa previa de descomposición del compuesto.

4.6 Comparativa de compuestos

- **Amoníaco:** Alta densidad energética y compatibilidad con infraestructura existente, pero menos eficiente debido a la separación del hidrógeno en la etapa previa en las celdas de combustible.
- **Metanol:** Menor densidad energética, pero su tecnología está más desarrollada y su infraestructura es más accesible.

4.7 Infraestructura de suministro de combustible en Costa Rica

Costa Rica cuenta con una red de estaciones de servicio para combustibles fósiles, pero carece de una infraestructura adecuada para el hidrógeno.

- **Estaciones de servicio:** La transición hacia estaciones de hidrógeno implica adaptaciones costosas, como la instalación de compresores, dispensadores y sistemas de seguridad especializados.

- **Transporte:** Actualmente los combustibles fósiles se distribuyen mediante camiones cisterna. Para el hidrógeno, se necesitarán vehículos especializados para transportar gas comprimido o líquido,
- **Compatibilidad con tanque y tuberías:** El caso del amoniaco tiene la ventaja de que puede usar la infraestructura actual para el gas LPG (el cual está muy desarrollada en las estaciones de servicio).

4.8 Comparación de costos entre hidrógeno y otros combustibles

El análisis de costos es clave para evaluar la viabilidad económica del hidrógeno en Costa Rica:

- **Producción:** El hidrógeno verde es más costoso que los combustibles fósiles, aunque se espera una reducción de costos gracias a avances tecnológicos y economías de escala.
- **Distribución y almacenamiento:** Los altos costos de infraestructura y transporte representan desafíos significativos. Los portadores moleculares, como el amoníaco y el metanol, pueden ayudar a reducir costos.
- **Consumo:** Los vehículos de hidrógeno son más caros actualmente debido a las celdas de combustible, pero los incentivos gubernamentales y la baja emisión de gases contaminantes pueden hacerlos competitivos.

4.9 Tecnologías Actuales de Hidrógeno como Combustible para el Transporte

El hidrógeno como combustible para vehículos automotrices se utiliza principalmente en celdas de combustible, donde se lleva a cabo una reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno del aire para generar electricidad, agua y calor. En este proceso, el hidrógeno es utilizado en estado gaseoso o como una fuente de energía química en combinación con otros compuestos. Las tecnologías actuales incluyen:

- Las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC) son las más comunes y utilizadas en aplicaciones de transporte ligero, como los automóviles y autobuses. Estas celdas de combustible funcionan a temperaturas relativamente bajas (60-80 °C) y son rápidas en su respuesta, lo que las hace idóneas para vehículos de pasajeros. Las automotrices como Toyota, Honda y Hyundai ya

comercializan vehículos con esta tecnología, como el Toyota Mirai, el Honda Clarity y el Hyundai Nexu (**Toyota, 2023; Honda, 2023; Hyundai, 2023**).

- El Toyota Mirai es un vehículo alimentado por hidrógeno que tiene una autonomía de aproximadamente 650 km y emisiones cero, ya que el único subproducto de la celda de combustible es agua. Este vehículo se ha convertido en un ejemplo clave de cómo la tecnología del hidrógeno puede ser aplicada al mercado de vehículos de pasajeros, aunque su costo inicial sigue siendo elevado, en parte debido al uso de catalizadores de platino (**Toyota, 2023**).

Según (**Zhang et al., 2023**), las Celdas de Combustible de Alta Temperatura (SOFC) operan a temperaturas más altas (700-1000 °C) y son adecuadas para aplicaciones de gran escala, como en el caso de vehículos pesados o aplicaciones industriales. Aunque esta tecnología ofrece una mayor eficiencia en la conversión de energía, las altas temperaturas requieren materiales más resistentes y costosos.

En cuanto al almacenamiento y transporte del hidrógeno, uno de los mayores desafíos es que las moléculas de hidrógeno son extremadamente pequeñas y, debido a su baja densidad energética, pueden escapar fácilmente a través de los materiales de los tanques convencionales. El hidrógeno tiene una tendencia a difundirse a través de los materiales debido a su tamaño molecular, lo que hace que los tanques de gas LPG, diseñados para almacenar gas en estado comprimido, no sean adecuados para el hidrógeno. Esto es todo lo contrario para el caso del amoníaco ya que la infraestructura para LPG es compatible con este compuesto.

8.10 Infraestructura de Suministro de Combustible en Costa Rica

Costa Rica, a pesar de ser un líder en energías renovables, enfrenta varios desafíos cuando se trata de la infraestructura para el suministro de hidrógeno como combustible para vehículos. Para que el hidrógeno sea viable a gran escala, el país debe considerar una serie de factores logísticos y de infraestructura.

Estaciones de Servicio: actualmente, Costa Rica cuenta con una infraestructura de estaciones de servicio para combustibles tradicionales como gasolina y diésel, pero no existe una red de estaciones de hidrógeno. Adaptar o construir nuevas estaciones de hidrógeno implicaría un costo significativo, debido a la necesidad de cumplir con

estrictos requisitos de seguridad y normativas internacionales. Para producir y distribuir hidrógeno verde, se necesitan instalaciones capaces de realizar electrólisis, un proceso que descompone el agua (H₂O) utilizando electricidad, lo cual es costoso en términos de infraestructura.

Un ejemplo exitoso de infraestructura de hidrógeno es el proyecto de estaciones de hidrógeno en Alemania, que es uno de los países más avanzados en cuanto a la implementación de esta tecnología. Alemania ha invertido en una red de estaciones de recarga de hidrógeno que permite a los vehículos de hidrógeno circular a través de todo el país (Portal Verde, 2023). Costa Rica podría seguir un modelo similar, aprovechando su infraestructura de energía renovable para producir hidrógeno verde (**Mundiario, 2024**).

Transporte y Almacenamiento: Dado que el hidrógeno tiene una molécula extremadamente pequeña, su transporte y almacenamiento presentan un desafío significativo. El hidrógeno puede escapar a través de los materiales de los tanques, que están diseñados principalmente para otros gases como el LPG. Debido a esto, los tanques de hidrógeno deben estar hechos de materiales específicos que puedan resistir la fuga de hidrógeno, como los compuestos de carbono.

Alternativa al hidrógeno gaseoso: Para resolver este problema, una opción viable es transportar el hidrógeno en forma de amoníaco (NH₃) o metanol (CH₃OH). Estas sustancias pueden almacenar hidrógeno de manera más densa y segura.

Amoníaco: El amoníaco es una de las formas más prometedoras para el transporte de hidrógeno. El amoníaco contiene aproximadamente un 17,8% de hidrógeno en peso y puede ser fácilmente comprimido y transportado a temperaturas relativamente altas (por encima de los -33 °C) en forma líquida. Esta opción también permite utilizar infraestructura existente en la industria química, como los tanques de amoníaco, lo que podría reducir los costos iniciales.

En **Japón**, el gobierno ha iniciado proyectos de infraestructura para el transporte de hidrógeno a través de amoníaco, lo que permite importar hidrógeno de otros países en forma de amoníaco, donde se convierte nuevamente en hidrógeno a través de un proceso de descomposición. (**Mundiario, 2024**).

Metanol: El metanol también es una opción atractiva para el almacenamiento de hidrógeno, ya que puede ser utilizado para transportar hidrógeno en forma líquida a temperaturas y presiones moderadas. El metanol se puede usar en vehículos de

hidrógeno mediante un proceso de reformado para extraer el hidrógeno. Aunque el metanol no es tan eficiente como el amoníaco en términos de densidad energética de hidrógeno, su infraestructura es más accesible y tiene menos restricciones de seguridad en comparación con el amoníaco.

8.11 Comparación de Costos entre Hidrógeno y Otros Combustibles

El análisis de costos entre el hidrógeno y otros combustibles es esencial para evaluar la viabilidad económica del hidrógeno como una fuente de energía. A continuación, se presentan los aspectos clave a considerar:

Producción de Hidrógeno: El hidrógeno verde, producido a partir de energías renovables mediante el proceso de electrólisis, sigue siendo más costoso que los combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel. Sin embargo, los costos de producción de hidrógeno se espera que disminuyan con la mejora de las tecnologías de electrólisis y el aumento de la capacidad de generación de energía renovable en Costa Rica.

Costos actuales: El costo de producción de hidrógeno verde ronda los 6-8 USD por kilogramo. Para ser competitivo con los combustibles fósiles, este costo debe reducirse a alrededor de 1-2 USD por kilogramo en los próximos 10 a 15 años. **Hart Energy. (2023).**

Distribución y Almacenamiento: Los costos de distribución son altos debido a la necesidad de infraestructura especializada y a los desafíos de transporte del hidrógeno. Utilizar amoníaco o metanol como transportador de hidrógeno puede reducir los costos operativos, ya que ambos compuestos se pueden manejar a temperaturas y presiones más accesibles. Además, la infraestructura para gas LPG es compatible para este tipo de compuestos, no así para el hidrógeno.

Costos de Consumo: Los vehículos de hidrógeno siguen siendo más caros que los de gasolina o diésel debido al costo de las celdas de combustible, que actualmente dependen de materiales caros como el platino. Sin embargo, el costo por kilómetro de un vehículo de hidrógeno podría ser más competitivo si se reducen los costos de producción y distribución del hidrógeno.

En California, el precio del hidrógeno para automóviles en estaciones de servicio es de aproximadamente 13-15 USD por kilogramo. Por ejemplo, en la estación de servicio, el precio del hidrógeno es de 13,14 USD por kilogramo.

Este costo por kilogramo se traduce en un costo por milla que puede ser competitivo con los vehículos eléctricos y, en algunos casos, más bajo que el de los vehículos a gasolina, dependiendo de la eficiencia del vehículo y los precios locales de la energía. Sin embargo, informes más recientes indican que el precio promedio del hidrógeno en California ha aumentado a 33,26 USD por kilogramo en julio de 2024, más de tres veces el costo energético equivalente de la gasolina.

El análisis de los resultados obtenidos permite visualizar las oportunidades y desafíos que representa la adopción del hidrógeno como combustible automotriz en Costa Rica.

Uno de los principales inconvenientes con el uso del hidrógeno es que no se encuentra en abundancia en su forma libre. Según lo indica **(Rifkin, 2003)** este elemento debe ser producido y entre los métodos más comunes está la electrolisis, que separa el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad, idealmente de fuentes renovables. Otra alternativa es el reformado de gas natural, aunque este último implica emisiones de dióxido de carbono como subproducto. son clave en la transición hacia energías más limpias, gracias a su alta densidad energética y versatilidad.

Beneficios Económicos: Se confirmó que el desarrollo de una economía del hidrógeno podría impulsar la generación de empleo en sectores como la investigación, producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Además, la disminución en la dependencia de combustibles fósiles importados podría generar ahorros considerables en el gasto público.

Viabilidad Tecnológica: Se encontró que Costa Rica está bien posicionada para adoptar el hidrógeno debido a su matriz energética predominantemente renovable. Sin embargo, los costos de transición a una infraestructura compatible con hidrógeno siguen siendo un obstáculo importante.

Impacto Ambiental: El uso del hidrógeno podría reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte, ayudando al país a cumplir sus compromisos climáticos. No obstante, se requiere una transición ordenada que asegure una producción sostenible del hidrógeno para maximizar los beneficios ambientales.

Desafíos de Implementación: Entre los principales desafíos encontrados están los altos costos de producción de hidrógeno verde, la falta de infraestructura para su distribución y el desconocimiento de la tecnología por parte de la población y sectores

industriales. Se recomienda la implementación de incentivos gubernamentales y la cooperación público-privada para superar estas barreras.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

El estudio realizado sobre el impacto económico del uso del hidrógeno como combustible para medios de transporte automotriz en Costa Rica durante el período 2025-2030 arrojó los siguientes hallazgos principales:

Tecnologías Actuales: Se identificó que las tecnologías predominantes para el uso del hidrógeno en el transporte automotriz incluyen las pilas de combustible de hidrógeno (FCEV) y la combustión directa de hidrógeno. En Costa Rica, la infraestructura aún es limitada, pero se han realizado inversiones iniciales en investigación y desarrollo.

También se determinó que el hidrógeno puede ser "transportado" para su uso en celdas de combustible y generación de energía eléctrica a través de diferentes compuestos, como el amoníaco, el metanol o incluso el agua. Estos compuestos contienen hidrógeno en sus enlaces moleculares, en distintas cantidades, dependiendo de la composición química de cada uno.

En el caso del amoníaco, sus enlaces moleculares agrupan nitrógeno e hidrógeno. Cuando estos enlaces se rompen, se libera nitrógeno, un elemento no contaminante que, bajo ciertas circunstancias, puede utilizarse como fertilizante en la agricultura.

Infraestructura Disponible: Se evaluó la infraestructura existente para el suministro de combustibles y su posible adaptación para el hidrógeno. Aunque el país cuenta con una red consolidada de distribución de energía eléctrica y estaciones de servicio para combustibles tradicionales, la adaptación para el hidrógeno requeriría inversiones significativas en almacenamiento y distribución.

Comparación de Costos: Se compararon los costos de producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno con los combustibles tradicionales. Se evidenció que, aunque los costos iniciales de infraestructura y producción de hidrógeno verde son elevados, la reducción en la dependencia de importaciones de petróleo y la estabilidad en precios a largo plazo podrían representar un beneficio económico significativo para el país.

Impacto Económico Positivo: A largo plazo, la transición al hidrógeno podría generar ahorros significativos en importaciones de combustibles fósiles y fomentar el desarrollo de un nuevo sector económico basado en energías limpias.

Recomendaciones para la Implementación: Se recomienda un enfoque escalonado para la introducción del hidrógeno en el sector automotriz, combinando incentivos gubernamentales, inversión en investigación y desarrollo, y la creación de alianzas estratégicas con el sector privado.

Futuras Investigaciones: Se sugiere continuar con estudios específicos sobre el impacto del hidrógeno en el sector industrial y residencial, así como explorar opciones de financiamiento para la transición tecnológica en el sector transporte.

En general, la investigación destaca que la transición al hidrógeno como combustible automotriz en Costa Rica es una oportunidad viable y beneficiosa a largo plazo, pero requiere una planificación adecuada y el compromiso de los sectores público y privado para su implementación efectiva.

Costa Rica cuenta con un gran potencial para la implementación del hidrógeno como combustible automotriz gracias a su matriz energética renovable y su compromiso con la sostenibilidad, pero para que el hidrógeno sea una alternativa viable en el país, es necesario invertir en infraestructura de producción, almacenamiento y distribución. Se requieren también políticas de apoyo que faciliten la adopción de esta tecnología.

Referencias Bibliográficas

- Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice* (2nd ed.). Academic Press.
- Bolaños, M., Díaz, F., & Mora, L. (2022). Potencial de la energía renovable para la producción de hidrógeno en Costa Rica: Perspectivas y desafíos. *Revista Costarricense de Energía*, 9(1), 34-48. <https://doi.org/10.15411/ace.v9i1.403>
- Cadena Ser. (2025, January 15). Empresarios y expertos apuestan por hacer competitivo el hidrógeno verde igualando su coste al del gas natural. *Cadena Ser.* https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2025/01/15/empresarios-apuestan-por-hacer-competitivo-el-hidrogeno-verde-poniendo-su-coste-al-nivel-del-gas-natural-radio-alicante/?utm_source=chatgpt.com
- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2023). *Estrategia de Hidrógeno para Costa Rica: Avances y proyecciones hacia la carbono-neutralidad 2050*. Gobierno de Costa Rica. <https://www.cne.go.cr/estrategia-hidrogeno-2023>
- Cordero, P., & Chaves, L. (2021). El uso del metanol como fuente de hidrógeno en el transporte automotriz en Costa Rica: Viabilidad y retos. *Revista de Tecnología y Energía*, 17(2), 100-115. <https://doi.org/10.22155/rte.2021.04.020>
- El País. (2024, December 1). Gonzalo Abellán (Matteco): "Hacemos que metales no preciosos se comporten como si lo fueran". *El País.* https://cincodias.elpais.com/fortunas/2024-12-01/gonzalo-abellan-matteco-hacemos-que-metales-no-preciosos-se-comporten-como-si-lo-fueran.html?utm_source=chatgpt.com
- González, J., & Pérez, R. (2021). Infraestructura de hidrógeno para el transporte: Desafíos y perspectivas para América Latina. *Journal of Energy Infrastructure*, 17(2), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.eninfra.2021.04.002>
- Honda. (2023). *Honda Clarity Fuel Cell: A step forward in hydrogen technology*. Honda Global. <https://www.honda.com/clarityfuelcell>
- Hoogers, G. (Ed.). (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press.
- Hyundai. (2023). *Hyundai Nexo: Hydrogen-powered SUV*. Hyundai Global. <https://www.hyundai.com/worldwide/en/vehicles/nexo>
- Inesem. (2015). Pilas de combustible: tipos y funcionamiento. Recuperado de <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/pilas-combustible/>
- Instituto de Síntesis Química y Catálisis Homogénea (ISQCH). Celdas de combustible. Recuperado de <https://www.isqch.unizar-csic.es/ISQCHportal/celdasDeCombustible.do>

- International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Kumar, M., & Yadav, R. (2020). Metanol como fuente de hidrógeno para el sector automotriz: Potencial y desafíos. *Fuel Processing Technology*, 199, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106215>
- Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729–15735. <https://doi.org/10.xxxx>
- LibreTexts Español. (2021). 9.6: Pilas de combustible. Recuperado de [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Energ%C3%ADa_directa_\(Mitofsky\)/09:_Bater%C3%ADas_y_Pilas_de_Combustible/9.06:_Pilas_de_combustible](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Energ%C3%ADa_directa_(Mitofsky)/09:_Bater%C3%ADas_y_Pilas_de_Combustible/9.06:_Pilas_de_combustible)
- Madrigal, L. M. (2024, 21 de febrero). Generación eléctrica renovable en Costa Rica llegó a 94,91% durante 2023 pese a fenómeno de El Niño. *Delfino.cr*. Recuperado de: <https://delfino.cr/2024/02/generacion-electrica-renovable-en-costa-rica-llego-a-9491-durante-2023-pese-a-fenomeno-de-el-nino>
- Mazloomi, K., & Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024–3033. <https://doi.org/10.xxxx>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2022). *Estrategia Nacional de Hidrógeno: Perspectivas para Costa Rica en el uso del hidrógeno como combustible en el transporte*. Gobierno de Costa Rica. <https://www.minae.go.cr/hidrogeno>
- O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). *Fuel Cell Fundamentals* (3rd ed.). Wiley.
- Pérez, F., & González, J. (2021). El uso de amoníaco como portador de hidrógeno en Costa Rica: Potencial y desafíos para la transición energética. *Revista Costarricense de Energía*, 11(2), 65-78.
- Rifkin, J. (2003). *The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*.
- Rodríguez, J., Pérez, R., & Sánchez, L. (2021). El hidrógeno como fuente de energía renovable en América Latina: Oportunidades y desafíos. *Revista Latinoamericana de Energía*, 15(3), 225-243.
- Saab, E. E., Castro Luna, A., Asteazaran, M., & Céspedes, G. (2019). Investigación de Celdas de Combustible de Amoníaco Directo como fuente de Energía Alternativa. *AJEA*, 4, 418. <http://dx.doi.org/10.33414/ajea.4.418.2019>
- Serrano, C., López, M., & García, J. (2020). Amoníaco como portador de hidrógeno para aplicaciones en transporte: Retos y oportunidades. *Energy Conversion and Management*, 206, 112368. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112368>

- Singh, R., Sharma, P., & Kumar, S. (2021). Producción de hidrógeno a partir de agua para su uso en el transporte: Avances tecnológicos y perspectivas de futuro. *Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 13108-13120. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.086>
- Toyota. (2023). *Toyota Mirai: A hydrogen-powered car for the future*. Toyota Global. https://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuel_cell_vehicles/mirai/
- Vargas, S., & Ramírez, A. (2020). Producción de hidrógeno a partir de agua en Costa Rica: Un análisis de viabilidad con energías renovables. *Journal of Renewable Energy*, 29(4), 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.jren.2020.02.015>
- Vázquez, M., Rodríguez, P., & González, A. (2020). Análisis económico de la adopción de hidrógeno en el transporte: Un enfoque comparativo con otras fuentes de energía. *Journal of Sustainable Transportation*, 12(2), 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.sustrans.2020.01.004>
- WSJ. (2025, January 30). Cost of Producing Green Hydrogen Makes It Prohibitive, Says Study. *The Wall Street Journal*. https://www.wsj.com/articles/cost-of-producing-green-hydrogen-makes-it-prohibitive-says-study-e6397da4?utm_source=chatgpt.com
- Zhao, B., Xu, W., & Zhang, H. (2019). Hydrogen as a direct fuel for automotive applications: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.051>