

**Estrategias para la Implementación de Hidrogeno Verde en sistemas de transporte
público en Colombia**

Elaborado por:

Laura Daniela Suarez – Esp. Gerencia de proyectos

Juan Felipe Bautista Martínez – Esp. Gerencia de proyectos

Juan Guillermo Zuluaga – Esp. Gerencia de proyectos

Juan Pablo Casas Carreño – Esp. Gerencia de proyectos

Universidad EAN

Escuela de Formación en Investigación – Seminario de Investigación

Bogotá

31/05/2024

Resumen

La integración del hidrógeno verde en el transporte público en Colombia no solo representa una medida ambientalmente responsable para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también una oportunidad para promover el desarrollo sostenible, fomentar la innovación tecnológica e impulsar el crecimiento económico a través de la creación de empleos en el sector de la energía renovable y la diversificación de la matriz energética del país hacia fuentes más limpias y sostenibles.

Problema de Investigación

El transporte público dentro de las principales ciudades de Colombia es un componente vital de la movilidad urbana sostenible, y su transición hacia formas más limpias y eficientes de energía es crucial para abordar los desafíos relacionados con la contaminación del aire y el cambio climático. (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

En este contexto, el hidrógeno verde ha surgido como una alternativa prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire. Sin embargo, la implementación exitosa del hidrógeno verde en el transporte público enfrenta una serie de desafíos multifacéticos que deben abordarse de manera integral. (Ecopetrol, 2022)

Durante las últimas 3 décadas se está replanteando la forma en la que se obtiene el tipo de energía con las que se mueve la industria global. La reducción de las emisiones de carbono ha redireccionado las hojas de ruta de varios países junto con las industrias en pro de la descarbonización, derivando en investigaciones y desarrollos destinados al uso del hidrogeno como fuente de energía renovable. El hidrogeno es un gas cuya concentración está dentro de una de las más abundantes del planeta y de la que se obtiene un producto

amigable con el medio ambiente y que se puede implementar en el uso del transporte, logrando ventajas competitivas en comparación con respecto a otras tecnologías para el desarrollo y progreso de la industria, salvaguardando los recursos naturales y el ambiente del país que las implementa y contribuyendo al resto del planeta.

Colombia dentro de su apuesta con la reducción de las emisiones de carbono, le apostó al cambio a energías limpias desde el año 2014 y desarrollo del hidrogeno verde desde el año 2020, su ubicación geográfica la pone frente a otros países como uno de los centros de producción de hidrogeno verde más importante del hemisferio e impactando ambientalmente de manera positiva y sostenible con respecto a otras tecnologías limpias.

El transporte, como una de las fuentes principales de emisión de gases que contribuyen al cambio climático, transformó este paradigma desde los años 80, destinando recursos a la investigación para obtener mejores tecnologías y productos que satisfagan las necesidades del consumidor y las ambientales. (Ministerio de Minas y Energia, 2021)

Los medios de transporte impulsados con tecnologías que contribuyen al calentamiento global están siendo evaluados y replanteados para transformar lo establecido y encaminar un rumbo donde prevalezcan las energías limpias y renovables para reducir las emisiones de carbono y el impacto ambiental a futuro. Colombia dentro de su plan de cambio estableció unas políticas que contribuyen a este giro y que plantea la conveniencia y el interrogante de cuál energía es más favorable tanto en el presente como para el futuro del medio ambiente, con esto se impulsó el desarrollo de mejorar los transportes masivos en las principales ciudades con buses de última tecnología y diferentes fuentes de energía renovables. Partiendo de esto, dentro de esta investigación se evaluará la viabilidad de la implementación de vehículos con sistema de hidrógeno verde en las principales ciudades como sistemas de transporte urbano seguro y sostenible en el tiempo. Agencia Nacional de Minería (2021). Revista Motor (2023).

¿Cuáles son los principales desafíos técnicos, económicos y legales para implementar sistemas de hidrogeno verde en transporte público en principales ciudades de Colombia, y cuáles son las estrategias más factibles para la adopción del hidrogeno verde?

Objetivos

Objetivo general

Establecer la viabilidad del proceso de implementación de hidrogeno verde como combustible para la flota de sistema de transporte público en principales ciudades de Colombia, mediante una revisión bibliográfica y a través de metodologías pertenecientes al marco de gestión de proyectos como los son la evaluación de riesgos y la matriz DOFA.

Objetivos específicos

- Identificar los principales retos para la integración del Hidrógeno como combustible vehicular en las ciudades más representativas del país.
- Establecer la autonomía y rendimiento del hidrógeno verde como combustible vehicular y realizar la comparación con combustibles tradicionales.
- Definir y evaluar riesgos asociados con la migración del hidrógeno verde como combustible vehicular en Colombia.
- Analizar el panorama actual de la infraestructura de distribución de combustibles tradicionales en el país.

Justificación

En el contexto actual, donde la urgencia de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es más evidente que nunca, la búsqueda de alternativas limpias y sostenibles en el sector del transporte se vuelve crucial. El transporte es una de las principales fuentes de contaminación en muchos países, incluido Colombia,

y por lo tanto, cualquier iniciativa que contribuya a su descarbonización merece una atención especial. (Climate Trade, 2023)

La introducción del hidrógeno verde en el transporte público colombiano representa una oportunidad significativa para abordar estos desafíos. Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se puede avanzar considerablemente hacia los objetivos de mitigación del cambio climático establecidos a nivel nacional e internacional. Además, al diversificar la matriz energética del país y disminuir su dependencia de los combustibles fósiles, se fortalece la seguridad energética y se reduce la vulnerabilidad frente a los precios volátiles del petróleo.

La implementación de proyectos de hidrógeno verde en el transporte público también tiene el potencial de impulsar el desarrollo tecnológico y la innovación en Colombia. Al seguir la Hoja de Ruta de hidrógeno (Ministerio de Minas y Energía, 2021), se pueden identificar y superar los desafíos técnicos, regulatorios y económicos asociados con esta tecnología emergente. Esto no solo abrirá nuevas oportunidades económicas y laborales en el sector de la energía, sino que también posicionará a Colombia como un líder regional en la adopción de tecnologías limpias y sostenibles.

Además, la investigación y la experimentación con proyectos de hidrógeno verde en el transporte público permitirán entender mejor los desafíos específicos y las oportunidades únicas que presenta esta tecnología en el contexto colombiano. Esta comprensión será invaluable para orientar futuras políticas y decisiones estratégicas en el ámbito energético y del transporte, asegurando que el país esté preparado para enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que surjan en los próximos años.

Marco Teórico

Durante el inicio y mediados del siglo XX empezó el cambio hacia energías limpias. Como consecuencia, se dio a lugar la construcción de varias hidroeléctricas y esfuerzos en desarrollo de investigación de energía nuclear. (UT-Battelle, 2024) Con la reducción de las reservas de crudo y su inminente desabastecimiento, la preocupación por los impactos ambientales ha impulsado el desarrollo en investigaciones relacionados con las fuentes de energía renovables como la energía eólica, solar y biomasa. Para el siglo XXI la tendencia energética se enfoca en la eficiencia y sostenibilidad las cuales avanzaban gracias al desarrollo de la automatización industrial. (Hassan, Algburi, Jaszczur, Al-Jiboory, & Al Musawi, 2024)

En relación con lo mencionado anteriormente, dentro de la agenda política de los principales países del mundo los esfuerzos se han concentrado en la descarbonización como medida de choque ante el cambio climático y la migración hacia una sostenibilidad ambiental (Sánchez Del Rey, 2022). Uno de los principales focos de atención ha sido la reducción y eliminación de emisión de dióxido de carbono (CO₂). La estrategia ha sido la inclusión de energías renovables, el seguimiento a la eficiencia energética, la reforestación, economía circular, políticas medio ambientales entre otros. (UT-Battelle, 2024)

Es de esta tendencia que surge el creciente interés por el hidrogeno, siendo una de las energías renovables de mayor impacto en los últimos años, promovida por la comunidad científica, las políticas gubernamentales internacionales el sector privado. (UT-Battelle, 2024)

El hidrogeno ha destacado como una fuente energética versátil y con un potencial revolucionario para el escenario energético del mundo. Su principal característica es la

variedad de fuentes mediante las cuales puede ser obtenidas, tanto renovables como tradicionales. El segundo dato relevante es el hecho que el hidrógeno tiene un alto contenido energético (141,86 MJ/kg) (UT-Battelle, 2024) lo que lo posiciona como una fuente de energía eficiente. Lo anterior, es ventajoso para aplicaciones en las que el espacio o peso son críticas del combustible son variables críticas para su utilización como lo son el transporte o en instalaciones remotas de almacenamiento de energía. (Hassan, Algburi, Jaszczur, Al-Jiboory, & Al Musawi, 2024) Adicionalmente, es una fuente versátil la cual puede ser almacenada ya sea en estado líquido o Gaseoso y puede ser transformado en electricidad mediante varios métodos como celdas de carga que brindan flexibilidad para el almacenamiento de energía. Además, a diferencia de las celdas fotovoltaicas que tienen un costo elevado de almacenamiento de energía y baja eficiencia, el hidrógeno cuenta con alto potencial de almacenamiento de energía de larga duración lo que lo hace adecuado para soportar las fluctuaciones de la generación de energía renovable, tanto diaria como estacional. (Renovables, 2022)

En (Weidner, Dolci, & Arrigoni, 2022) evalúan el transporte del hidrogeno como factor fundamental en determinar la viabilidad de alcanzar los objetivos de la unión europea frente a la implementación de hidrógeno como energía renovable. En la investigación resulta clave comprender la rentabilidad de producción de hidrogeno y transportarlo al lugar de consumo, o si en su lugar resulta más beneficioso producirlo cerca del punto de consumo. De acuerdo con lo anterior, se realizaron estudios en relación con el costo y demanda de hidrogeno mediante dos escenarios de caso de estudio. En el escenario A se definió una demanda de un millón de toneladas de hidrogeno por año entregadas a un único consumidor a través de vías de transporte convencionales con una distancia de 2500km. El escenario B por su parte contempla una estrategia más compleja de suministro de 100.000 toneladas de

hidrógeno al año, entregadas mediante una red de 270 estaciones de servicio de hidrógeno a una distancia primaria similar que en el escenario A de 2500km y luego distribuido en un radio de 500 km a través de una combinación de ferrocarril y transporte por carretera. Para este escenario la particularidad es que en este caso, el hidrógeno entregado en la estación de servicio debe cumplir con los niveles de pureza y presión de hidrógeno requeridos para las aplicaciones de movilidad.

De la evaluación se determinó que si bien no existe una única solución óptima frente a los diversos escenarios del transporte de hidrogeno, estos dependen de la distancia entre el punto de generación, la cantidad requerida y el uso final del consumidor. Como resultado, se tiene que cuando se tienen distancias compatibles con el territorio europeo, el transporte de hidrógeno comprimido y licuado ofrecen costos más bajos. Por su parte, el transporte químico resulta más competitivo cuanto más larga es la distancia de entrega (está asociado a menores costos de transporte) (Han, Woo, Kim, & Yu, 2023)

En el contexto de energía en Colombia, el Hidrógeno emerge como una opción hacia la sostenibilidad energética, la cual al ser producida a través de proceso de electrolisis de agua se caracteriza por ser un combustible con un nivel bajo de emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera. Actualmente, el consumo de combustible fósiles alcanza el 96% en el mundo y en Colombia el 76% con el Diesel como el principal combustible seguido de la gasolina a una proporción del 19%.Según (UPME,202) los combustible fósiles representan el 21% de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo. (Betina Cortés Rojas, 2023)

Evolución del Hidrogeno en el mundo

El hidrogeno desde el 2005 ha empezado a ser parte del objetivo como una de las fuentes de energía renovable definitiva y está dentro del centro de atención de los países del primer mundo como actor definitivo para reducir el impacto ambiental en el transporte tanto privado como público. Estableciendo la legislación, normatividad y estándares, el proceso de investigación y desarrollo a nivel internacional se llevó a cabo gracias a la industria automotriz estableciendo tecnologías claves para su generación, distribución y almacenamiento. Luego de más de 15 años de avance en esta tecnología, ha permitido que no solo los países desarrollados tengan como fuente para su transporte el hidrogeno, sino que países en vía de desarrollo como Colombia empiecen a generar las bases para desarrollar la tecnología localmente e implementarla en los diferentes medios de transporte actuales. (Lynn K. Mytelka, 2008)

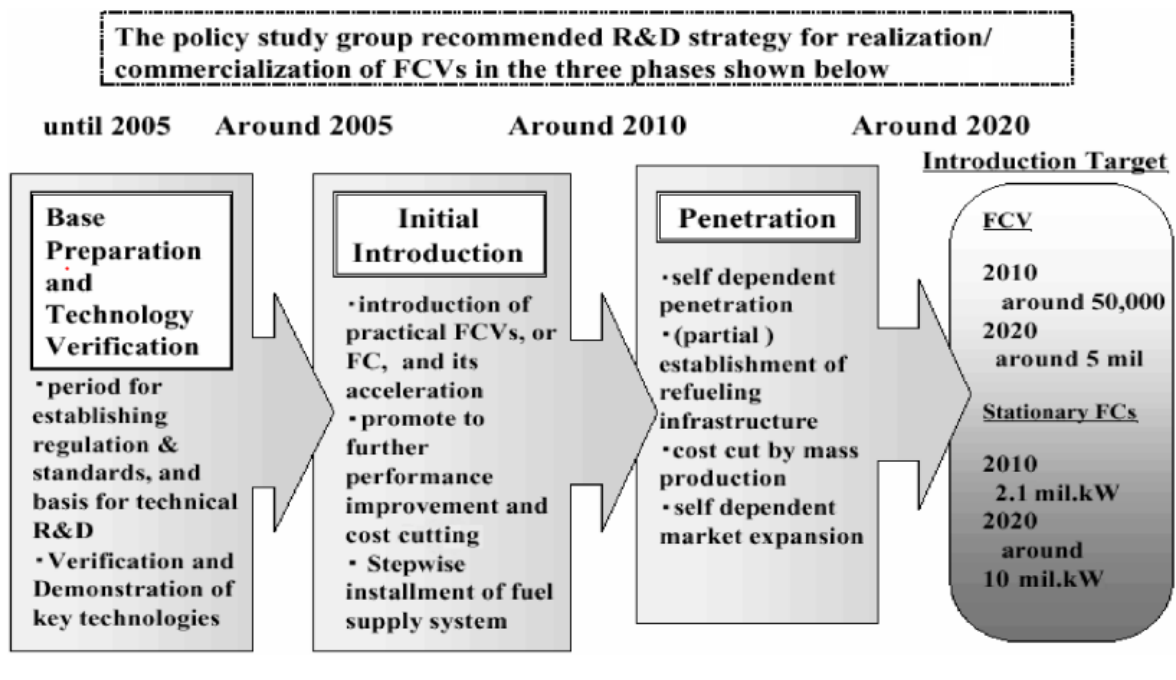


Imagen 1. Fases de evolución de hidrogeno verde. FC: Fuel Cel. FCVS: Fuel Cell Vehicules. R&D: Research and Development.

Economía del Hidrogeno

Múltiples fuentes para obtener el hidrogeno, diferentes métodos de producción y almacenamiento para llegar a diferentes usos que beneficiaran el ámbito ambiental, social y tecnológico de los países que generen un balance en los tipos de fuentes de energía renovable que van a implementar como plan de desarrollo a nivel local. (WSP Brochure H2)

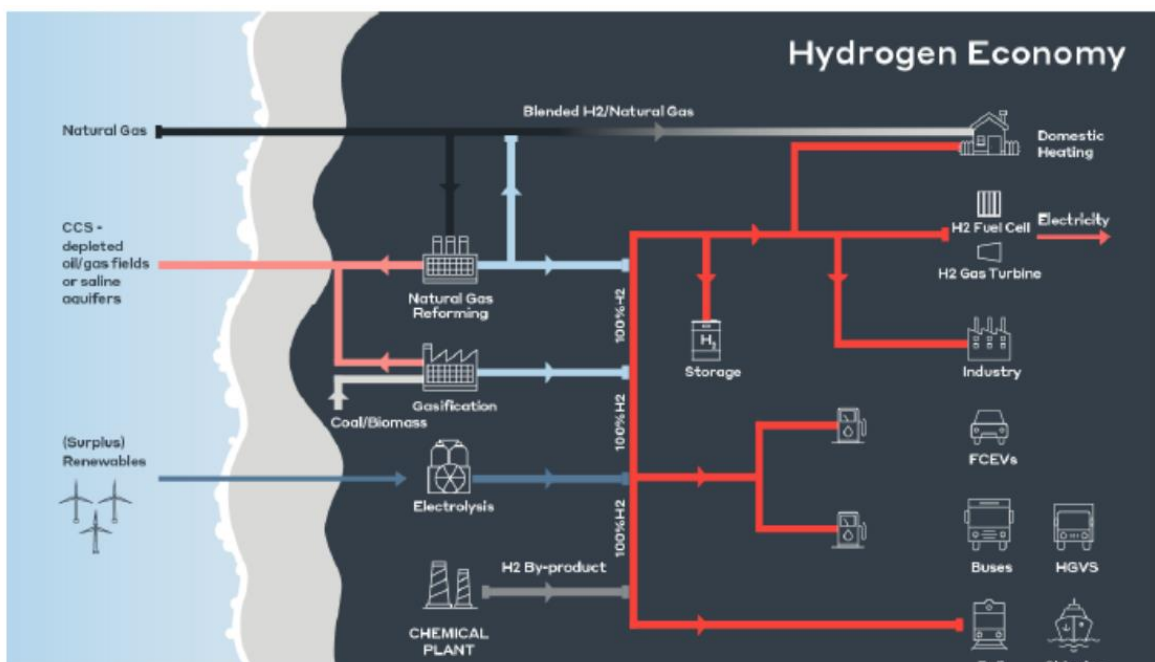


Imagen 2. Esquema Economía del hidrogeno. (WSP Brochure H2)

Hidrogeno verde en Colombia

En Colombia, se estableció la hoja de ruta del Hidrogeno, que contribuirá al desarrollo e implementación de tecnologías que permitan reducir la dependencia de combustibles y materias de origen fósil a través del uso de hidrogeno. (Ministerio de Minas y Energía, 2021) Esto teniendo en cuenta, que el país posee un gran potencial para la producción en energías renovables no convencionales como solar fotovoltaica y eólica y adicionalmente

la ventaja respecto a su posición geográfica para exportarlo por su acceso a los dos océanos y los avances en la infraestructura portuaria. (Bolsa Mercantil de Colombia, 2021)

La imagen 1, muestra el potencial de recurso solar y velocidad media de viento en el territorio colombiano, mostrando la relevancia que tienen estas fuentes de energía en las proyecciones de producción de hidrogeno verde.

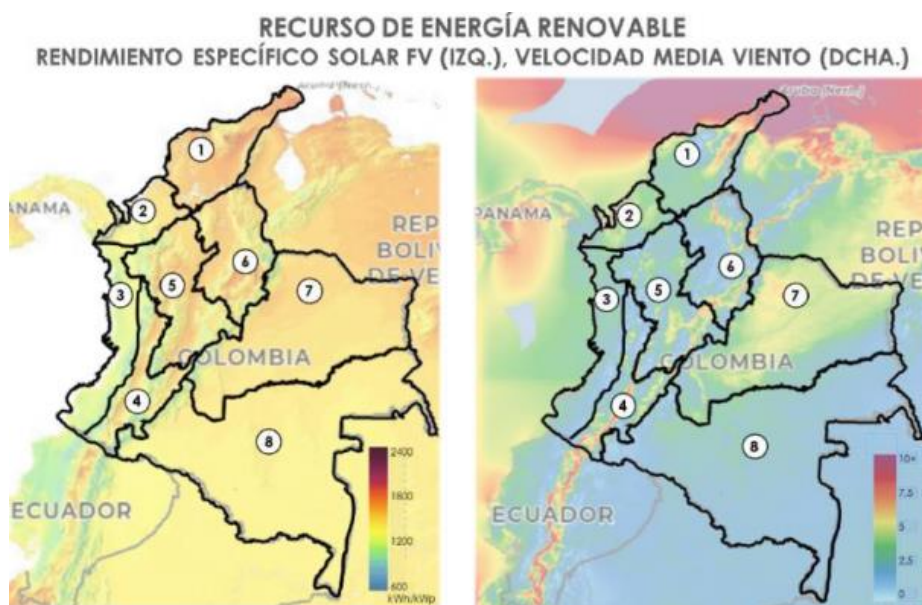


Imagen 3. Separación de Colombia por zonas de recurso renovable (Pvout, 2024)

El gobierno nacional está implicado con la descarbonización de la matriz energética de Colombia. Por un lado, se anunció por parte del ministerio de ambiente la meta de reducción del 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 (Ministerio de Ambiente , 2022). Adicionalmente, la ley 1715 promueve el desarrollo de proyectos de generación renovable. Este tipo de iniciativas se benefician de los incentivos y facilidades contempladas en esta ley debido a que fomentan la inversión en energías renovables no convencionales. Los beneficios incluyen alivios fiscales, acceso a financiamiento preferencial y apoyo gubernamental para la investigación y desarrollo de tecnologías que resultan relacionadas con la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde

(Republica de Colombia, 2014). Lo anterior, sin contar con que la ley 2099 de Transición energética, extiende los beneficios de la ley anteriormente mencionada a cualquier eslabón de la cadena de producción de hidrogeno de bajas emisiones (Republica de Colombia, 2021).

Proyectos en curso

A partir del contexto normativo antes mencionado, ya se encuentran 28 proyectos relacionados con hidrogeno verde en Colombia, de los cuales 7 proyectos ya se encuentran en fase de pruebas, poniendo en el foco proyectos relacionados con movilidad (La Republica, 2023). Con esto, el país espera tener una capacidad instalada para producir hidrogeno verde de entre 1 GW Y 3 GW, entre los proyectos más destacados se encuentran:

- Promigas planea realizar su primer proyecto de producción de hidrógeno verde, a través electrolizador de membrana protónica, que utiliza energía eléctrica para separar los átomos de hidrógeno y oxígeno de las moléculas de agua (H₂O). (Promigas, 2022)
- Ecopetrol se encuentra realizando un piloto en la refinería de Cartagena de un electrolizador de tecnología PEM (Proton Exchange Membrane, por sus siglas en inglés) de 50 kilovatios y 270 paneles solares, con el que espera establecer la viabilidad técnica y poder continuar con la inversión en proyectos de hidrogeno de bajo contenido de emisiones de carbono. (Ecopetrol, 2022)
- Por su parte, EPM se encuentra produciendo 5 kg/día a través por medio del proceso de electrólisis o descomposición del agua (H₂O) en sus componentes básicos: hidrógeno y oxígeno, utilizando la energía eléctrica generada en sitio. (EPM, 2024)

Metodología

Primer nivel

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

De acuerdo con la problemática medio ambiental asociada al consumo de combustibles fósiles, altamente contaminantes y de carácter no renovable, y el objetivo de establecer la viabilidad del proceso de implementación de hidrógeno verde como sustituto, se plantea el diseño de investigación que permita establecer criterios claros para desarrollar los objetivos planteados.

Según las características de la problemática, el alcance y los objetivos planteados, el diseño metodológico que más se ajusta, y a través del cual es posible responder los cuestionamientos se basa en modelos no experimentales. El cual por la naturaleza del proyecto no hacen parte de lo planteado dentro de la investigación y por lo que el desarrollo de experimentos o la manipulación de variables se encuentran excluidas. Adicionalmente, abordar temas de viabilidad implica indicar mediante parámetros cuantitativos que permitan emitir conclusiones de tipo correlacional de variables tales como costos, autonomía, eficiencia, rendimiento entre otros.

La metodología de investigación plantea una etapa de recolección de datos y revisión de bibliografía de tipo descriptivo, que permita la recolección de datos bibliográficos de la o las variables concluyentes con el estudio investigativo.

Definición de Variables

En la siguiente tabla, se enuncian las variables que serán objeto de análisis para la obtención de resultados respecto a la capacidad que puede tener la ciudad de Bogotá para implementar las tecnologías de hidrogeno verde en el transporte público masivo.

ID	Variable	Definición conceptual	Definición operativa
1	Disponibilidad de Infraestructura de Recarga de Hidrógeno	Medir el número y distribución geográfica de estaciones de recarga de hidrógeno disponibles en la ciudad de Bogotá.	Revisión documental de las pruebas piloto que ha realizado el SITP para su primer vehículo impulsado por hidrogeno verde.
2	Costos de Implementación y Operación	Incluir tanto los costos iniciales de establecimiento de infraestructura de hidrógeno como los costos operativos comparados con los sistemas de combustibles tradicionales.	Revisión documental de los costos asociados a la inversión requerida para una estación de hidrogeno verde.
3	Autonomía de Vehículos de Hidrógeno	Distancia que pueden recorrer los vehículos de hidrógeno con una sola carga en comparación con vehículos de combustibles fósiles y eléctricos.	Se observará la distancia máxima que un vehículo de hidrógeno puede recorrer sin necesidad de reabastecimiento en los pilotos realizados en diferentes partes del mundo.
4	Tiempo de Recarga/ Reabastecimiento	Comparar el tiempo requerido para recargar o reabastecer vehículos de hidrógeno frente a los vehículos de combustibles tradicionales y eléctricos.	A través de los estudios de ingeniería existentes, se registrará el tiempo promedio necesario para completar una recarga o reabastecimiento de hidrógeno en vehículos específicos.
5	Capacidad de Producción de Hidrógeno Verde	Evaluar la capacidad actual y proyectada para producir hidrógeno verde en el país, considerando la disponibilidad de recursos renovables.	Se evaluará la capacidad total de producción de hidrógeno verde en el país, expresada en toneladas por año, teniendo en cuenta las instalaciones existentes y las proyecciones de crecimiento emitidas en la Hoja de ruta del hidrogeno.
6	Grado de penetración de Normatividad y Regulaciones Existentes	Identificar la legislación y normativas vigentes que afectan la implementación y operación de vehículos de hidrógeno y estaciones de recarga comparándolos con otros países de Latinoamérica.	Determinar el grado de avance o retraso legislativo del país de las leyes, regulaciones, y políticas que impactan directamente la adopción del hidrógeno como combustible vehicular.
7	Riesgos de Seguridad y Medidas de Mitigación	Evaluar los riesgos asociados con el almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno en vehículos, incluyendo medidas de mitigación y protocolos de seguridad.	Se identificarán los riesgos específicos asociados con el almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno en vehículos y estaciones de recarga.
8	Comparación de Rendimiento con Combustibles Tradicionales	Analizar el rendimiento energético del hidrógeno en comparación con la gasolina y el diésel, incluyendo la eficiencia en la conversión de energía y el impacto en el rendimiento del vehículo.	A través de los estudios realizados en otros países se observará el rendimiento energético del hidrógeno, calculando la eficiencia de conversión de energía y comparándola con la eficiencia de vehículos que utilizan gasolina y diésel.

Tabla 1. Descripción de variables de análisis. Fuente: elaboración propia

Población y Muestra

Dentro de los proyectos de desarrollo de hidrogeno verde implementados en el transporte masivo su enfoque está dirigido a solucionar problemáticas en ciudades con conflictos en temas de movilidad, población usuaria de transporte público masivo y como punto primordial, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para el caso del presente análisis investigativo, se tiene que a nivel Latinoamérica, ciudades tales como Chile están iniciando con la implementación de pruebas piloto en operación real con vehículos de transporte masivo impulsados por la tecnología de hidrogeno verde, a su vez en tiempo real se hace la comparativa con las otras tecnologías tanto convencionales (Gas, Diesel, gasolina) como no convencionales (eléctricos e híbridos). Para el caso de la población en la que se hará la presente investigación, se tomará a la ciudad de Bogotá, en la cual se está impulsando la mayor parte de desarrollos de nuevas tecnologías para el transporte masivo, buses híbridos, buses eléctricos y metro.

Poblacionalmente Bogotá cuenta con un número de habitantes de más de 9 millones, de los cuales casi 3 millones de usuarios usan el transporte público. Según un informe técnico de la Secretaría Distrital de Movilidad se estableció que “-15 de los 18 millones de viajes diarios, incluyendo todos los peatonales, que se realizan en Bogotá y los 18 municipios del estudio se llevan a cabo en la ciudad. De estos, 5,5 millones se hacen en transporte público, y 2,5 millones utilizan Transmilenio al menos en una etapa de su viaje”-. (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019). Para realizar y cubrir la demanda y para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, Bogotá hasta la fecha ha implementado buses de nuevas tecnologías de los cuales 1485 son eléctricos, permitiendo avanzar en este tipo de implementación y aumentado la oferta de servicio público masivo en la ciudad. La

tecnología de hidrogeno verde pretende tomar parte del marketshare de los viajes realizados por los capitalinos reduciendo así aún más los efectos contaminantes de las tecnologías convencionales de propulsión de buses.

Actualmente la estatal Petrolera Ecopetrol, está impulsando el hidrogeno verde en vehículos, tanto livianos como de carga y transporte público, la iniciativa ya empezó en la capital y la ciudad ya cuenta con un bus de esta tecnología el cual empezará a rodar en sus pruebas próximamente, dando como resultado la toma de datos que serán el punto de partida para que la tecnología se evalúe y se de viabilidad como proyecto paralelo a los buses eléctricos y determinar si las variables que se plantaron dan la viabilidad para que los buses con tecnología de hidrogeno verde puedan circular en la ciudad de Bogotá como sistema de transporte masivo opcional y en conjunto con las otra opciones que actualmente están en el mercado.

Segundo nivel

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Los métodos para recolección de información para obtener medición de las variables, alcanzar los objetivos propuestos y responder a la pregunta de investigación, será principalmente a través del Método de datos secundarios, aquellos recolectados por otros investigadores que permitan identificar y extraer información relevante en entornos similares que se haya implementado hidrogeno verde en el trasporte público, además da orientación que nos permitirán en llegar a otras fuentes de información. Método de la observación, colección de datos en números y valores se obtienen utilizando métodos de análisis estadísticos y numéricos, la principal ventaja de este método es la precisión.

Método análisis de contenido cuantitativo, este cuantifica el contenido en categorías y subcategorías, se lleva a un análisis estadístico e interpretación de resultados. (Sampieri, 2014)

Técnicas de análisis de datos

Con los instrumentos de recolección de datos seleccionados, se utilizarán las siguientes técnicas para analizar los datos:

Método / Instrumento	Técnicas de Análisis
Datos secundarios (recolectado por otros investigadores)	<p>1. Análisis de correlación de variables: técnica estadística para medir la relación entre dos variables cuantitativas. Para realizar el análisis correlacional es necesario: definir las variables, recopilar datos, verificar la confiabilidad de los datos, organizar y calcular correlación (tipo Pearson, más común), interpretar resultados y considerar la significación de la correlación.</p> <p>2. Análisis Costo-beneficio (ACB): determinar si los beneficios de obtener y analizar algunos datos superan los costos involucrados en el proceso.</p> <p>3. Análisis de Riesgos: identificar, clasificar, evaluar y mitigar los riesgos potenciales asociado a la recopilación de información garantizando la confiabilidad de la información consultada.</p> <p>4. Análisis inferencial: El análisis inferencial se utiliza para hacer predicciones sobre una población basándonos en una muestra de datos.</p> <p>5. Análisis de cluster: El análisis de cluster agrupa los datos en diferentes categorías según la similitud entre ellos.</p> <p>6. Análisis de redes: Esta técnica se utiliza para analizar la estructura y las relaciones entre elementos en una red.</p> <p>7. Análisis longitudinal: Se utiliza para analizar datos recopilados a lo largo del tiempo para examinar tendencias, cambios y desarrollo a lo largo de un período específico.</p>
Observación cuantitativa	<p>8. Matriz DOFA: puede ser útil para identificar los factores internos y externos que pueden afectar el proceso de recopilación de datos y la calidad de la información obtenida.</p>
Análisis de contenido cuantitativo	<p>9. Análisis descriptivo: Este tipo de análisis implica la descripción y resumen de los datos recolectados utilizando medidas estadísticas para describir y resumir lo que hemos encontrado.</p>

Tabla 2. Descripción de técnicas de análisis. Fuente: elaboración propia.

Análisis y discusión de los resultados

Infraestructura de Distribución de Combustibles Tradicionales en Colombia

La infraestructura de distribución de combustibles tradicionales es crucial para el desarrollo económico y la estabilidad energética de Colombia. Esta investigación se centra en evaluar dicha infraestructura, identificando fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora en un contexto de creciente demanda energética y desafíos ambientales. A través de un análisis detallado de estaciones de servicio, redes de oleoductos y poliductos, terminales de almacenamiento, transporte terrestre, refinerías y el marco regulatorio, se busca proporcionar un panorama integral y proponer recomendaciones para el futuro.

Estaciones de Servicio

En Colombia, existen aproximadamente 5,000 estaciones de servicio, distribuidas principalmente en áreas urbanas y a lo largo de las principales carreteras. Las áreas rurales tienen menor densidad de estaciones, lo que representa un desafío para el suministro eficiente en estas regiones. Empresas como Terpel, Esso, Primax y Petrobras dominan el mercado, siendo Terpel el principal operador con alrededor del 45% del mercado de distribución de combustibles. Además del suministro de combustibles, muchas estaciones ofrecen productos y servicios adicionales como tiendas de conveniencia, lubricantes y servicios de lavado y mantenimiento vehicular, lo que mejora la experiencia del cliente y diversifica las fuentes de ingresos. (TERPEL, 2023)

Red de Oleoductos y Poliductos

Colombia cuenta con una extensa red de oleoductos que transporta crudo desde los campos de producción hasta las refinерías y puertos de exportación. Los principales oleoductos, como el Oleoducto Transandino (OTA) y el Oleoducto de los Llanos Orientales (ODL), contribuyen a una red que se extiende por más de 8,900 kilómetros. Los poliductos, que transportan productos refinados como gasolina y diésel, también son esenciales, cubriendo aproximadamente 4,600 kilómetros del territorio nacional. La seguridad y el mantenimiento de estas redes son críticos, con tecnologías de monitoreo avanzado y sistemas de respuesta rápida implementados para mitigar riesgos como fugas, robos y sabotajes, ya que en 2020 se registraron 53 incidentes. (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2021)

Terminales de Almacenamiento

Las terminales de almacenamiento en Colombia están ubicadas estratégicamente cerca de puertos, refinерías y grandes centros de consumo, como Cartagena, Buenaventura y Barranquilla. Estas instalaciones tienen capacidades que varían desde unos pocos miles hasta cientos de miles de barriles, con una capacidad total nacional que supera los 20 millones de barriles. Las terminales gestionan inventarios, mantienen reservas estratégicas y aseguran el suministro continuo, utilizando tecnologías avanzadas como los sistemas SCADA para el monitoreo y control de calidad. Además, operan bajo estrictas regulaciones ambientales y de seguridad emitidas por el Ministerio de Minas y Energía y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), garantizando operaciones seguras y sostenibles. (Ministerio de Minas y Energía, 2023)
(Rey, 2022)

Transporte Terrestre

El transporte terrestre mediante camiones cisterna es esencial para el abastecimiento en áreas no cubiertas por poliductos. En 2022, el transporte terrestre representó aproximadamente el 35% del total de combustibles distribuidos en el país. Este método de transporte está sujeto a normativas estrictas para garantizar la seguridad, incluyendo el mantenimiento de vehículos y la capacitación de conductores según la normativa NTC 1692. Optimizar la logística de transporte terrestre es crucial para reducir costos y mejorar la eficiencia del suministro. Las empresas utilizan sistemas de gestión de flotas y tecnologías GPS para mejorar la eficiencia y reducir el tiempo de entrega, asegurando un suministro constante y seguro a todas las regiones del país. (DANE, 2022)

Refinerías

Operada por Ecopetrol, la Refinería de Barrancabermeja es la mayor del país, con una capacidad de procesamiento de aproximadamente 250,000 barriles por día. Por otro lado, la Refinería de Cartagena (Reficar), también operada por Ecopetrol, tiene una capacidad de 165,000 barriles por día y, gracias a su modernización, es una de las más avanzadas de la región. (Ecopetrol, 2022)

Las refinerías son cruciales para la economía nacional, representando una parte significativa del PIB y las exportaciones del país. Sin embargo, enfrentan desafíos ambientales significativos debido a las emisiones y residuos generados. En 2021, las refinerías colombianas emitieron aproximadamente 8 millones de toneladas de CO₂, lo que resalta la necesidad de implementar prácticas más sostenibles. (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2021)

Regulación y Normativa

El Ministerio de Minas y Energía regula la producción, distribución y comercialización de combustibles en Colombia, estableciendo normativas para garantizar la calidad y seguridad de los productos y operaciones. La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) supervisa la exploración y producción de hidrocarburos, asegurando que las operaciones cumplan con los estándares técnicos y ambientales establecidos. Además, el gobierno maneja políticas de subsidios y controles de precios para estabilizar el mercado y garantizar el acceso a combustibles, especialmente en regiones vulnerables. En 2022, los subsidios a los combustibles ascendieron a más de 4 billones de pesos colombianos, lo que demuestra la importancia del apoyo gubernamental en el sector energético. (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2021)

En conclusión, la infraestructura de distribución de combustibles tradicionales en Colombia enfrenta varios desafíos y oportunidades. El mantenimiento y modernización son cruciales para evitar interrupciones en el suministro y mejorar la eficiencia operativa, con inversiones significativas realizadas en los últimos años. La seguridad y protección contra actos de sabotaje, robos y accidentes requieren medidas avanzadas, dado que se estima que el robo de combustibles genera pérdidas de más de 100 millones de dólares anuales para las empresas del sector. Además, la adaptación a normativas ambientales más estrictas es imperativa, ya que las nuevas regulaciones para 2023-2025 exigirán reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero y la implementación de tecnologías más limpias.

Autonomía y rendimiento del hidrógeno verde como combustible vehicular

Los transportes masivos a nivel mundial tienen variables críticas que son determinantes para la viabilidad de los proyectos de esta índole, dentro de esas variables están las autonomías de los vehículos, según su definición, es la cantidad de kilómetros que puede recorrer un vehículo con una carga de combustible o carga de batería, varía dependiendo de la tipología de rendimiento según diseño del motor, baterías, celdas, eficiencia y características adicionales como peso del vehículo y diseño.

Los nuevos retos que el mundo tiene en la actualidad están encaminados a que el transporte de personas sea más eficiente teniendo en cuenta diferentes factores tales como menores consumos de energía o redirigir la energía para es esta sea aprovechada al máximo, menores tiempos de desplazamiento, o evitando desplazamientos innecesarios.

Actualmente los fabricantes de vehículos están en la carrera de proveer mejores tecnologías, más eficientes y que contribuyan positivamente a mejorar las condiciones sociales y ambientales de las ciudades. Por esto tecnologías como las del hidrogeno verde son relevantes en este ámbito puesto que ofrecen autonomías que satisfacen las demandas operacionales de las empresas y de las ciudades. Un ejemplo claro es el de las operaciones dentro de la ciudad de Bogotá en la que los buses de transporte masivo asignados a las empresas del Sistema integrado de Transporte SITP hacen recorridos diarios de aproximadamente en promedio de 81 kilómetros en las rutas más representativas de la capital Colombia (Cortés, 2014). Con esto si un vehículo tipo bus tiene una capacidad de recorrido o autonomía de entre 300 y 400 kilómetros por carga de celda de combustible a hidrogeno, nos permite satisfacer la demanda diaria dentro de la operación de cada una de las zonas en las que opera el sistema de transporte.

Ahora bien, haciendo al comparativa de que tecnologías tales como motores de combustión interna, tecnología de vehículos híbridos (combustión interna + motor eléctrico), eléctricos y a hi es la más eficiente en cuanto a su autonomía vale generar el siguiente cuadro comparativo de diferentes tipologías de buses y su rango de autonomía expresado en kilómetros y otros factores.

CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN EN BUSES DE TRANSPORTE MASIVO			
TIPOLOGIA DE PROPULSION	AUTONOMÍA EN KM	CONSUMO PROMEDIO DE COMBUSTIBLE (L/100 km)	EMISIONES gCo2/km (Prom)
EV (VEHICULO ELECTRICO)	300 - 400	NO APLICA	NO APLICA
H2 (HIDROGENO)	300 - 400	NO APLICA	NO APLICA
HIBRIDO (COMBUSTIÓN INTERNA + ELECTRIFICACIÓN)	500 - 700	31,5	845
COMBUSTIÓN INTERNA	400 - 500	41.5	1130

Tabla 3. Cuadro comparativo de tecnologías de propulsión en buses de transporte masivo. Fuente: www.energia.gob.cl

Las demandas y exigencias por un mejor transporte masivo para pasajeros en las ciudades del mundo están en aumento, las ciudades más representativas y en las que actualmente se está robusteciendo el sistema de transporte con tecnologías alternativas y amigables con el medio ambiente son ciudades tales como Bogotá (Colombia), Shenzhen y Zhengzhou (China), están liderando este cambio introduciendo más vehículos tipo bus cero emisiones y generando pruebas con tecnologías diferentes a las tradicionales. (Grütter Consulting, 2014)

Con esto las ventajas de las tecnologías de cero emisiones como la de hidrogeno con relación a la emisión de gases en la operación y su autonomía es evidente debido a que los desarrollos tecnológicos han permitido que el hidrogeno pueda propulsar buses y vehículos alcanzando autonomías y rendimientos superiores a los vehículos con tecnologías convencionales, satisfaciendo las exigencias operacionales y de ciudad.

Los planes de implementación de estaciones de recarga de hidrógeno verde para el transporte público en Bogotá, refuerza las intenciones del gobierno por liderar la transición hacia una sociedad más sostenible y una movilidad con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, los proyectos piloto realizados demuestran que existen ciertas ventajas en la utilización de este tipo de tecnologías.

Según los estudios analizados, la producción y distribución de hidrógeno verde requieren inversiones sustanciales en infraestructura, incluyendo estaciones de recarga y tecnologías de electrólisis para la producción del hidrógeno a partir de fuentes renovables. (Rey, 2022) Además, los costos operativos y de mantenimiento de estas nuevas tecnologías son actualmente más elevados en comparación con los combustibles fósiles, los cuales tienen una infraestructura establecida y costos de producción más bajos debido a economías de escala. (Suarez, 2023)

En este sentido, aunque en este momento se resalten los desafíos económicos, existen bastantes ventajas en el aspecto ambientales y el potencial para reducir las emisiones de carbono a largo plazo haciendo que el hidrógeno verde sea una opción atractiva desde una perspectiva de sostenibilidad. Con el tiempo, y a medida que las tecnologías de hidrógeno verde se desarrollen más ampliamente, es probable que los costos disminuyan. Las políticas gubernamentales, los incentivos financieros y la investigación continua en esta área jugarán un papel crucial para hacer que el hidrógeno verde sea más competitivo frente a los combustibles tradicionales. (Hernandez, 2023)

Adicionalmente, la implementación de estaciones de recarga de hidrógeno verde en Bogotá enfrenta varios retos técnicos; uno de los principales desafíos técnicos es la infraestructura

de abastecimiento. La producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde requieren la construcción de estaciones de recarga específicas que puedan manejar este combustible de manera segura y eficiente. Este proceso incluye la necesidad de tecnologías avanzadas para la electrólisis del agua utilizando energía renovable, así como sistemas de almacenamiento que puedan mantener el hidrógeno en condiciones óptimas (Nunes, 2023). La producción de hidrógeno verde depende de la disponibilidad de fuentes de energía renovable, lo cual requiere una expansión significativa de la capacidad de generación de energías renovables como la solar y la eólica (Sánchez, 2023).

Riesgos asociados con la migración del hidrógeno verde como combustible vehicular

Mediante la revisión de bibliografía se logra identificar aspectos que pueden impactar de manera negativa la viabilidad del hidrógeno verde como combustible vehicular en Colombia y que se convierten en fuentes de riesgo para la implementación de hidrógeno en el sistema vehicular. Dentro de los factores más relevantes se encuentran: los costos de producción, falta de desarrollo infraestructura para la distribución y la seguridad y costos en el almacenamiento del combustible entre otros.

Para iniciar, uno de los aspectos más significativos es el costo de producción de combustible. Dentro de los modelos para la evaluación de costo de fabricación de electricidad en función de determinar su viabilidad y competitividad como se encuentra el planteado por (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023) en este se indica que la determinación del costo tiene como variables el costo de la inversión, los costos de operación y mantenimiento, la vida útil de la planta y la tasa de interés adquirida. Dentro del modelo desarrollado por Lizarazo, Zambrano y Ramos se evalúan la cantidad de km promedio a

recorrer, la cantidad de hidrogeno requerida para abastecer una celda de carga, el tamaño de la planta de producción, el tamaño de la planta solar requerida para la fabricación del combustible.

En cuanto al consumo y rendimiento de combustibles a continuación se indica el rendimiento promedio de combustibles tradicionales en Colombia

Tabla Rendimiento promedio de los buses en Colombia.

		kg/gal	Fuente
Bogotá	Diesel	12	MDL - Transmilenio
	Gas	5	Terpel Uninorte

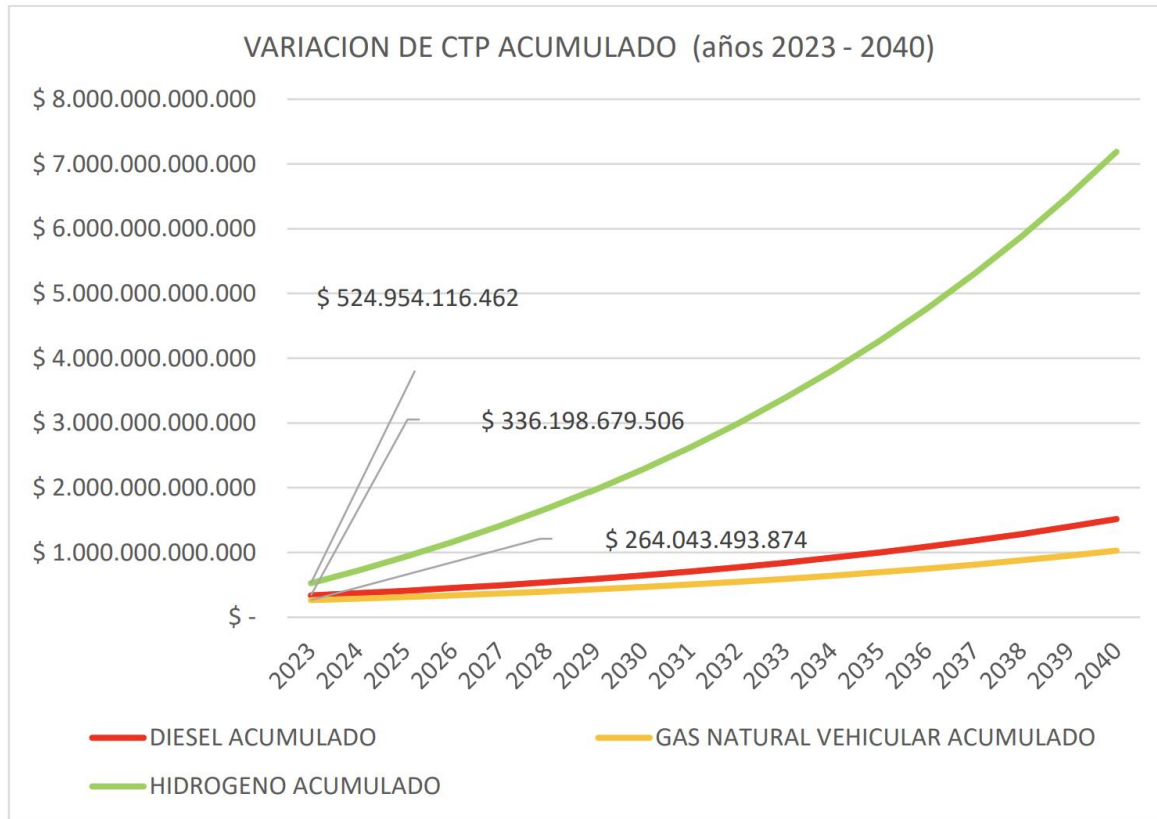
Tomado de : (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023)

Rendimiento (gal/km)	Consumo de combustible (gal)	Rendimiento (gal/km)	Consumo de combustible (gal)	Rendimiento (gal/km)	Consumo de combustible (gal)
12	192,477	5	527,936	0,0956	473,163

Tomado de : (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023)

A partir del consumo de combustibles fósiles y relaciones establecidas de emisiones de gases de efecto invernadero para cada uno de ellos se logra determinar la reducción de gases de efecto invernadero resultando ser igual a 3,187 toneladas anuales (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023), sin embargo, el rendimiento actual del combustible es el mas bajo en comparación con las demás fuentes, y en relación a ello el que mas consumo representa. (Climate Trade, 2023)

En cuanto al costo total de desarrollo de la tecnología para la implementación, en (Referencia) se desarrolla la comparación del costo total acumulado desde el año 2023 hasta el 2024 para combustibles como el Diesel, el gas natural y el hidrogeno.



Tomado de: (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023)

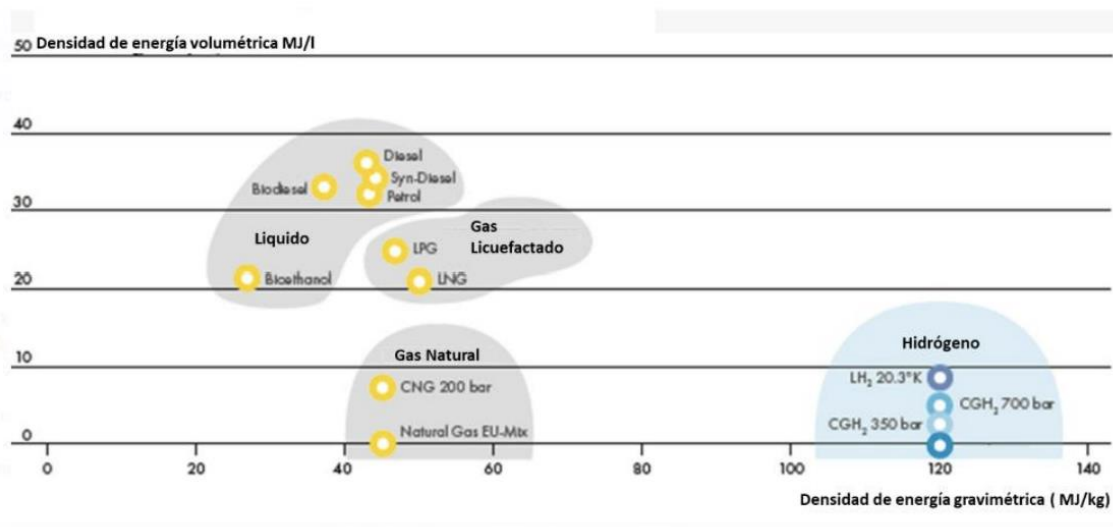
De igual manera que el análisis anterior, el costo total de sistemas que implementen hidrogeno resulta significativamente mayores y se asocia al alto costo de los vehículos aptos para trabajo con pilas de hidrógeno.

En cuanto a la viabilidad económica de la implementación de este combustible es de resaltar la voluntad política del gobierno que busca impulsar el uso de energías limpias a través de beneficios tributarios los cuales involucran exención del IVA, descuentos en obligaciones como SOAT, Revisión tecnicomecánica y arancel cero a vehículos que utilizan este tipo de combustibles. Todo lo anterior repercute en los costos directos de proyectos de implementación de vehículos de tipo eléctricos. (secretaria de Ambiente de bogotá, 2021)

Otro de los mayores riesgos para la implementación de hidrogeno verde es el desarrollo en infraestructura actual del país y las garantías que permitan la correcta distribución, almacenamiento y transporte de este.

El hidrogeno se caracteriza por su alto contenido de energía, siendo mayor que los combustibles fósiles como el gas licuado, bioetanol, gas natural entre otros, sin embargo, ocupa un gran volumen en condiciones atmosféricas y los costos de almacenamiento obligan a realizar procesos de licuado de gases o de compresión que permitan contener cantidades de energía en volúmenes razonables.

Densidad energética de combustibles



Tomado de: (Shell Deutschland Oil GmbH, 2017)

Por lo anteriormente mencionado, la compresión del gas de hidrogeno es necesaria y por lo general alcanza presiones que van desde los 50bar hasta los 1000 bar (IRENA, 2022) y cuanto mayor sea la relación de compresión del gas mayor será la resistencia que requerirán los tanques de almacenamiento y en este sentido su costo. Las alternativas de almacenamiento del gas aún se encuentran en fases de estudio y desarrollo que sigue siendo muy costosa.

Ahora, en cuanto a las estaciones de recarga de combustible, la literatura reporta tanques con capacidad de almacenamiento de 30 ó 40 kilos, medida en la cual se vende el hidrógeno en las estaciones de recarga que existen en el mercado internacional. Y las cuales permiten una autonomía de 450 Km con un consumo alrededor de 40kg de combustible y las cuales tardarías según lo descrito en (Gimena Raijosa Gil; pablo flores Ortiz, 2019) de 10 a 15min.

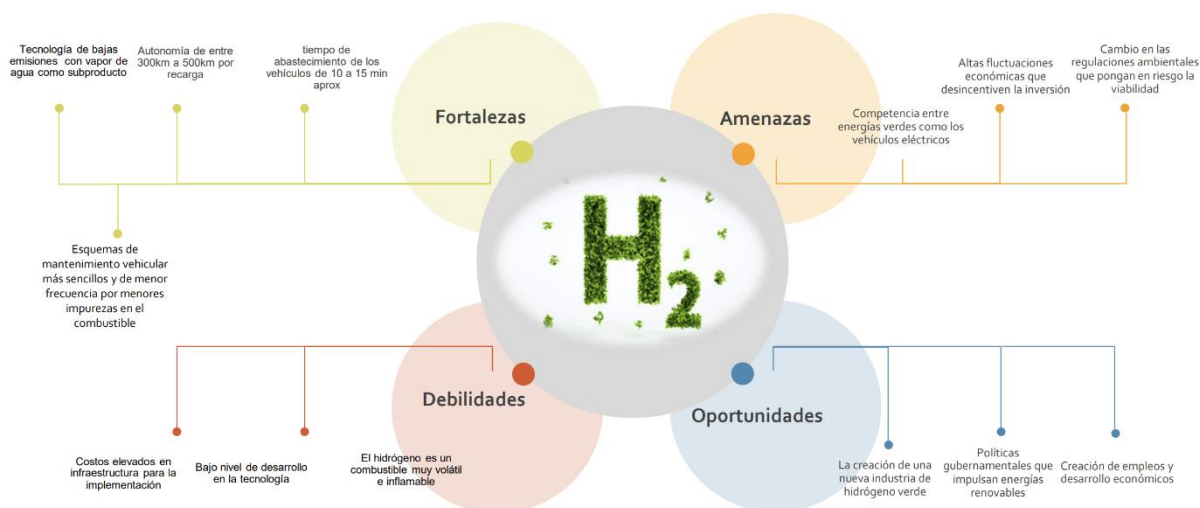
En cuanto al transporte de hidrógeno, según lo reportado por (Shell Deutschland Oil GmbH, 2017) actualmente los medios en los que se realiza son principalmente por camiones y tuberías. La alternativa de tuberías es preferida cuando se requiere recorrer distancias de medias a largas y en grandes cantidades que justifica o permite amortizar la inversión. Por su parte, utilizar camiones para transportarlo resulta ser una alternativa para recorrer cortas distancias y volúmenes bajos. El planteamiento de una gran red de distribución interna resulta ser la mejor alternativa, no obstante, la realidad es que en nuestro país no se cuenta con redes con las condiciones técnicas para la distribución de hidrogeno y la implementación de un sistema de esas características requeriría de inversiones significativas que podrían no realizarse en el corto o mediano plazo, así como lo describe (Lizarazo, Zambrano, & Ramos, 2023)

Finalmente, dentro de lo que compete a las estaciones de distribución de hidrogeno otro de los riesgos apreciables aborda a la seguridad requerida para las instalaciones, las cuales si bien comparten características con las actuales estaciones de suministro de Diesel implica mayores medidas de monitoreo y control a razón de impedir fugas por el carácter altamente volátil del combustible que adicionalmente debe almacenarse a altas presiones.

Matriz DOFA

A continuación, se presenta una matriz DOFA que recoge los elementos clave acerca de la implementación de estaciones de Hidrogeno Verde en Bogotá

DOFA



Conclusiones

- La infraestructura de distribución de combustibles tradicionales en Colombia es robusta, pero enfrenta desafíos significativos en términos de mantenimiento, seguridad y sostenibilidad. Se recomienda una inversión continua en modernización y la implementación de tecnologías avanzadas de seguridad para proteger la infraestructura. Además, es crucial adoptar prácticas más sostenibles para cumplir con las nuevas regulaciones ambientales. Las políticas energéticas deben alinearse con estas necesidades para asegurar un suministro energético estable y limpio, garantizando así el desarrollo económico y la estabilidad energética del país a largo plazo.
- La implementación de estaciones de hidrógeno verde para el transporte público en Bogotá presenta una oportunidad significativa para avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible y con bajas emisiones de carbono. Sin embargo, esta transición enfrenta importantes desafíos técnicos y económicos. A pesar de estos retos, el compromiso del gobierno y la posición estratégica de Bogotá, junto con el potencial de fuentes de energía renovable en Colombia, proporcionan una base sólida para superar estos obstáculos y liderar la innovación en tecnologías sostenibles.
- Se estima que hacia el año 2030 la electricidad proveniente de energías renovables sea competitivo por la mejora y desarrollo de tecnologías.

Lista de referencias

- Lynn K. Mytelka_ Grant Boyle - Making Choices about Hydrogen_ Transport Issues for Developing Countries- United Nations University Press (2008)
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2021). *Reporte de Seguridad y Medio Ambiente*.
- Betina Cortés Rojas, N. F. (2023). *Hidrógeno verde como combustible para el transporte terrestre de carga pesada en Colombia: evaluación económica y financiera para un estudio de caso en el cColombia: evaluación económica y financiera para un estudio de caso en el* . Bogotá.
- Bolsa Mercantil de Colombia. (2021, Septiembre 30). *Gestor del mercado de gas natural en Colombia*. Retrieved from <https://www.bmcbec.com.co/publicaciones/posts/noticias/noticias/cual-es-el-potencial-de-colombia-para-producir-hidrogeno>
- Climate Trade. (2023, Mayo). *Climate Trade*. Retrieved from <https://climatetrade.com/es/las-industrias-mas-contaminantes-del-mundo/#:~:text=El%20sector%20m%C3%A1s%20contaminante%3A%20los%20combustibles%20f%C3%B3siles&text=Es%20necesario%20cambiar%20nuestras%20fuentes,e%C3%B3lica%2C%20para%20estabilizar%20nuestro%2>
- Cortés, J. (2014, Mayo 25). *bogota.gov*. Retrieved from <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/un-recorrido-por-las-rutas-mas-destacadas-del-sitp>
- DANE. (2022). *Reporte Económico Nacional*.
- Ecopetrol. (2022, Marzo 18). *El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia*. Retrieved from <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-incip-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia>
- Ecopetrol. (2022). *Informe Anual*.
- EPM. (2024, Febrero 28). *El Grupo EPM cumple con su hito de producir hidrógeno verde*. Retrieved from <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/el-grupo-epm-cumple-con-su-hito-de-producir-hidrogeno-verde/#:~:text=En%20esta%20primera%20etapa%20se,de%205%20a%2010%20unidades.>)
- Gimena Rajosa Gil; pablo flores Ortiz. (2019). analisis de factibilidad economica para implementación de energias renovables. *CIDET*, 09.
- Grütter Consulting. (2014). Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos. 41.
- Han, J., Woo, J., Kim, Y., & Yu, S. (2023). Fuel cell/battery power supply system operational strategy to secure the durability of commercial hydrogen vehicles. *Elsevier Ltd*, 17.
- Hassan, Q., Algburi, S., Jaszczur, M., Al-Jiboory, A. K., & Al Musawi, T. J. (2024). Hydrogen role in energy transition: A comparative review. *Institution of Chemical Engineers*, 1069 - 1093.
- Hernandez, J. B. (2023). *Incentivos para la adopción de tecnologías de cero emisiones alrededor del mundo*. Bogotá: Giro Zero .
- IRENA. (2022). Renewable Power Generation Costs in 2021.
- La Republica. (2023, Octubre 13). *Energía*. Retrieved from Colombia tiene 28 proyectos de hidrógeno, siete de ellos están en etapa de pruebas: <https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-la-transicion/colombia-tiene-28-proyectos-de-hidrogeno-siete-de-ellos-estan-en-etapa-de-pruebas-3727438>
- Lizarazo, C. L., Zambrano, C. J., & Ramos, R. H. (2023). ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA ELECTRIFICACIÓN DE UNA FLOTA DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE. *E-docUR*, 71. Retrieved from <https://repository.urosario.edu.co/items/54ed7cd0-81d3-43f5-a47b-220dbb6569b7>.
- Ministerio de Ambiente . (2022, Junio 24). *Aprobado un plan que ayudará a obtener las metas climáticas de Colombia*. Retrieved from Minambiente: <https://www.minambiente.gov.co/aprobado-un-plan-que-ayudara-a-obtener-las-metas-climaticas-de->

- colombia/#:~:text=Dos%20de%20los%20prop%C3%B3sitos%20del,la%20aprobaci%C3%B3n%20de%20este%20instrumento
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrogeno*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Estadísticas de Hidrocarburos*.
- Nunes, B. (2023). *Hidrogeno Verde*.
- Promigas. (2022, Marzo 18). Retrieved from Promigas Pone en Marcha Piloto de Producción de Hidrógeno Verde e Inyección en Redes de Gas Natural en Colombia:
<https://www.promigas.com/Paginas/noticiasesp/piloto-hidrogeno.aspx>
- Pvout. (2024). *Global Solar Atlas* . Retrieved from Open Street Map:
<https://globalsolaratlas.info/map?c=20.96144,-31.113281,2>
- Renovables, E. (2022, Diciembre). *Renewable Energy Magazine* . Retrieved from <https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/el-hub-de-europa-en-hidrogeno-verde-20221202>
- Republica de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014*. Funcion publica.
- Republica de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021*. Función pública.
- Rey. (2022). *Estudio de seguimiento de la Evoluciín de los pilotos de camiones de Bajas Emisiones en Colombia*. Giro Zero.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Sánchez Del Rey, A. (2022). GREEN HYDROGEN APPLICATIONS FOR ECO INDUSTRIAL PARK DESING. *Asociacion Espanola de Direccion e Ingenieria de Proyectos (AEIPRO)*, (pp. 1528 - 1540).
- Sánchez, D. L. (2023). *Bases regulatorias para la integración del hidrogeno verde en Perú*. Lima: Revista Peruana de Energía.
- secretaria de Ambiente de bogotá. (2021, 04 22). <https://bogota.gov.co>. Retrieved from <https://bogota.gov.co: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/distrito-presenta-plan-para-reducir-emisiones-y-ser-carbono-neutral>
- Shell Deutschland Oil GmbH. (2017). <https://epub.wupperinst.org/>. Retrieved from <https://epub.wupperinst.org/>:
https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6786/file/6786_Hydrogen_Study.pdf
- Suarez, D. (2023). *Impactos del hidrógeno verde como fuente de energía alternativa en el SITP de Bogotá*. Bogotá: Universidad EAN.
- TERPEL. (2023). *Informe de Gestión CGM Terpel Energía*.
- UT-Battelle, L. (2024). Hydrogen and the Global Energy Transition - Path to Sustainability and Adoption across All Economic Sectors. *Energies*, 21.
- Weidner, E., Dolci, F. C., & Arrigoni, A. (2022). ASSESSMENT OF HYDROGEN DELIVERY OPTIONS. *International Association for Hydrogen Energy, IAHE*, 1415-1427.