

**UNIVERSIDAD EAN**

**SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN - ESPECIALIZACIÓN**

**AUTORES:**

José Asdrubal Moreno Salgado

Hernaldo Edwin Cando Pastas

**REVISOR:**

**Elizabeth León Velásquez, PhD**

**UNIVERSIDAD EAN**

**2025**

## Ficha de Viabilidad del Proyecto de Investigación

### Información General

Información del estudiante 1	Nombre: José Asdrubal Moreno Salgado
	Correo institucional: jmoreno41399@universidadean.edu.co
	Programa al que pertenece: Especialización en Gerencia de Proyectos
Información del estudiante 2	Nombre: Hernaldo Edwin Cando Pastas.
	Correo institucional: hcandop54807@universidadean.edu.co
	Programa al que pertenece: Especialización Gerencia de proyectos
Información del estudiante 3	Nombre:
	Correo institucional
	Programa al que pertenece:
Campo de investigación:	Energías basadas en Hidrógeno para el transporte
Grupo de investigación:	Grupo 1
Línea de investigación:	Movilidad Urbana en el marco de la transición Energética
Título tentativo del proyecto:	Evaluación del uso del hidrógeno como combustible para motocicletas de baja cilindrada alineado con transición energética en Bogotá.

## Tabla de contenido

Ficha de Viabilidad del Proyecto de Investigación .....	ii
Tabla de contenido .....	iii
Table de Figuras .....	v
Planteamiento del Problema .....	1
Antecedentes del problema .....	1
Descripción del problema. ....	3
Pregunta de investigación.....	4
1.    Objetivos .....	5
1.1.    Objetivo general.....	5
1.2.    Objetivos específicos. ....	5
1.3.    Conveniencia del Proyecto. ....	5
2.    Marco teórico.....	6
2.1.1.    El hidrógeno como vector energético. ....	7
2.1.2.    Parque automotor en Bogotá y rol de las motocicletas. ....	8
2.1.3.    Características técnicas de las motocicletas de bajo cilindraje. ....	9
2.1.4.    Mapa conceptual recomendado.....	10
2.1.5.    Síntesis crítica.....	10
2.2.    Marco Normativo y Legal del Hidrógeno Verde .....	11
2.2.1.    Normativa internacional sobre hidrógeno. ....	11
2.2.2.    Normativa latinoamericana y casos de referencia. ....	12
2.2.3.    Normativa colombiana aplicable. ....	13
2.2.4.    Síntesis crítica.....	14
2.3.    Marco Conceptual y Teórico. ....	15
2.3.1.    Concepto de hidrógeno e hidrógeno verde.....	15
2.3.2.    Principios de celdas de combustible y eficiencia energética.....	16
2.3.3.    Sistemas de almacenamiento de hidrógeno. ....	17
2.3.4.    Seguridad y normativas aplicables. ....	18

2.3.5.	Aplicación en motocicletas y vehículos ligeros.....	19
2.3.6.	Síntesis. ....	19
2.4.	Estado del Arte y Antecedentes.....	20
2.4.1.	Proyectos internacionales de movilidad a hidrógeno. ....	21
2.4.2.	Aplicaciones en vehículos ligeros y motocicletas. ....	22
2.4.3.	Experiencias en infraestructura de repostaje.....	22
2.4.4.	Limitaciones y barreras tecnológicas.....	23
2.4.5.	Antecedentes nacionales y latinoamericanos. ....	24
2.4.6.	Síntesis. ....	24
2.5.	Marco Metodológico (Investigación Documental y Analítica). ....	25
2.5.1.	Tipo de investigación y enfoque. ....	25
2.5.2.	Diseño de investigación. ....	26
2.5.3.	Población, muestra y unidades de análisis. ....	27
2.5.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de información. ....	28
2.5.5.	Procedimiento de análisis y validación de datos.....	28
2.5.6.	Síntesis. ....	28
2.6.	Resultados Proyectados y Factibilidad. ....	29
2.6.1.	Resultados Proyectados.....	29
2.6.2.	Factibilidad Técnica.....	31
2.6.3.	Factibilidad económica. ....	33
2.6.4.	Factibilidad ambiental y social.....	34
2.7.	Discusión, Conclusiones y Recomendaciones.....	35
2.7.1.	Discusión. ....	35
2.7.2.	Conclusiones .....	37
2.7.3.	Recomendaciones.....	37
2.7.4.	Limitaciones de la investigación .....	38
Referencias.....		40

## Table de Figuras

Figura 1 Mapa conceptual sobre Hidrógeno Verde en Bogotá. Elaboración propia, 2025..... 10

# “Evaluación del uso del hidrógeno como combustible para motocicletas de baja cilindrada alineado con transición energética en Bogotá.”

## Planteamiento del Problema

### Antecedentes del problema

La calidad del aire en Bogotá persiste con niveles preocupantes, impulsados principalmente por el crecimiento del parque automotor. Las motocicletas de bajo cilindraje —muy accesibles para trabajadores informales y sectores de bajos ingresos— siguen siendo grandes emisoras de contaminantes urbanos. Según el Informe Anual de Calidad del Aire 2023 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023), estas motos continúan generando altos niveles de material particulado y gases críticos como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NOx). Además, **“sus emisiones por kilómetro recorrido pueden ser incluso más perjudiciales, debido a las tecnologías obsoletas de sus motores.”** (Ramírez A. M., 2023).

Esta situación se agrava con el crecimiento sostenido del número de motocicletas en el país. En 2024, las ventas de motocicletas en Colombia aumentaron un 19,4 %, alcanzando un total de 804 955 unidades vendidas, una de las cifras más altas registradas en años recientes (Motorcycles Data, 2025) A nivel nacional, Colombia alcanzó los 12 millones de motocicletas registradas, lo que representa el 62 % del parque automotor total (ANDI, 2024) En Bogotá y la Sabana, la situación es similar: en 2025 se proyectó que había más motocicletas que

automóviles en circulación, con aproximadamente 1 518 603 motos frente a 1 600 231 carros (Infobae, 2025) Esta tendencia indica un incremento sostenido en el uso de motos como principal medio de transporte urbano, lo que amplifica su impacto ambiental.

Las motos de bajo cilindraje siguen generando alta contaminación, y su volumen ha crecido considerablemente en Bogotá y Colombia, acentuando el problema ambiental.

Como respuesta, el hidrógeno verde se perfila como una energía alternativa con gran potencial: no emite contaminantes directos si se produce a partir de fuentes renovables como la electrólisis con energía solar o eólica (International Energy Agency [IEA], 2024) Sin embargo, su aplicación en la movilidad urbana ha estado principalmente limitada a vehículos pesados como buses, trenes o equipos industriales, dejando fuera de consideración al transporte liviano, especialmente las motocicletas (Ball & Weeda, 2015) (García, 2021).

El hidrógeno verde es viable, pero aún no se ha probado en motos urbanas.

En Colombia, el informe de gestión 2024 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2022) actualiza la estrategia nacional del hidrógeno con enfoque en industrias y transporte público masivo. Sin embargo, no contempla su incorporación en vehículos livianos altamente contaminantes como las motocicletas. Según (Gómez & Vargas, 2020) **“es necesario generar políticas públicas e incentivos que promuevan tecnologías limpias en el transporte urbano”**, destacando una oportunidad que aún no ha sido aprovechada por el Estado ni por el sector privado.

Las políticas nacionales sobre hidrógeno aún no incluyen al segmento motero, pese a su necesidad.

## Descripción del problema.

Hoy en día, las motocicletas de bajo cilindraje constituyen uno de los principales medios de transporte en Bogotá, tanto por su bajo costo como por su agilidad frente al tráfico urbano. Sin embargo, también representan una fuente considerable de contaminación atmosférica. A pesar de esta realidad, no existen políticas públicas, lineamientos técnicos ni marcos regulatorios que fomenten la adopción de combustibles alternativos como el hidrógeno verde en este segmento vehicular ( (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023); (Rodríguez & Sánchez, 2021).

Aún no hay estrategias claras para integrar el hidrógeno en el transporte liviano, pese a su alta penetración.

Además, la transición hacia el uso de hidrógeno en motocicletas enfrenta múltiples barreras. En primer lugar, se requiere investigación técnica detallada sobre la viabilidad de adaptar motores de combustión interna a sistemas de hidrógeno o celdas de combustible. En segundo lugar, los costos de transformación son altos, y la infraestructura urbana para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es casi inexistente en Bogotá. Por último, no se han establecido marcos normativos que regulen su uso en vehículos livianos, lo que genera incertidumbre legal y operativa (International Energy Agency [IEA], 2024; Ramírez A. M., 2023). Como señala (García, 2021), **“la ausencia de una infraestructura adecuada y de lineamientos normativos específicos limita la adopción del hidrógeno en el transporte urbano liviano”**.

Barreras técnicas, económicas y regulatorias dificultan seriamente la adopción del hidrógeno en motos.

A pesar de estos desafíos, la coyuntura representa una oportunidad estratégica. Incluir el segmento de motocicletas de bajo cilindraje en la agenda de transición energética permitiría no solo reducir emisiones urbanas, sino también fortalecer los compromisos de Colombia frente a los acuerdos climáticos internacionales. Para lograrlo, es fundamental impulsar una articulación entre gobierno, universidades y sector industrial con el objetivo de evaluar, diseñar y promover soluciones tecnológicas, económicas y normativas que hagan posible la implementación de hidrógeno verde en motocicletas urbanas.

Incluir motos livianas en la transición energética representa una oportunidad ambiental y social significativa.

### **Pregunta de investigación.**

¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar el uso de hidrógeno como vector energético en motocicletas de bajo cilindraje en la ciudad de Bogotá?

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo general.

Evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de hidrógeno como vector energético en motocicletas de bajo cilindraje en Bogotá, en el marco de la transición energética urbana.

### 1.2. Objetivos específicos.

- I. Identificar las principales características técnicas de las motocicletas de bajo cilindraje comercializadas en Bogotá y su compatibilidad con sistemas de hidrógeno.
- II. Analizar el marco normativo, ambiental y de infraestructura necesario para la implementación del hidrógeno en este tipo de vehículos.
- III. Estimar los costos de conversión o implementación de motocicletas a sistemas basados en hidrógeno y compararlos con otras tecnologías limpias.

### 1.3. Conveniencia del Proyecto.

A partir de la certeza de la evaluación del impacto de la viabilidad técnica y económica del hidrógeno como vector energético en motocicletas de bajo cilindraje en la ciudad de Bogotá, como transición energética, para reducir emisiones de gas efecto invernadero y mitigar el cambio climático; se perfila como fuente energética que produce combustión limpia y reduce emisiones elevadas de carbono.

El alcance, consiste en identificar las características técnicas de las motocicletas y su compatibilidad con el hidrógeno, mediante el análisis del marco normativo, ambiental, infraestructura y costos de inversión necesario para su implementación a través de nuevas perspectivas y estrategias sostenibles para la adopción del hidrógeno como combustible de alta

densidad energética y versatilidad, ligero de almacenar sin generar emisiones contaminantes, como metodología para construir conocimiento y comprensión en el área de sostenibilidad energética aplicado al sector de transporte, relevante para otros investigadores para profundizar en la combustión limpia.

Con el fin de asegurar que el proyecto propuesto es conveniente, ya sea para la empresa intervenida, y se alinea con el programa de especialización cursado, es importante que se describa de manera detallada los beneficios que tendrá a partir de los resultados obtenidos en la investigación. Así mismo, se debe argumentar la relevancia, implicaciones prácticas, utilidad metodológica y valor teórico del proyecto.

## **2. Marco teórico.**

El marco teórico constituye la base conceptual de toda investigación, ya que permite sustentar el problema de estudio en teorías, antecedentes y evidencia científica documentada. En este proyecto, cuyo objetivo central es evaluar la viabilidad técnica y económica del hidrógeno como vector energético en motocicletas de bajo cilindraje en Bogotá, el marco teórico se construye sobre varias disciplinas: ingeniería mecánica, energías renovables, transporte urbano, economía ambiental y políticas públicas. La integración de estos campos es fundamental para evaluar de manera crítica la factibilidad técnica, económica y social del uso de hidrógeno en movilidad ligera.

El desarrollo de este capítulo se organiza en secciones que analizan de manera crítica:

- Importancia del hidrógeno verde en la transición energética.
- Contexto del parque automotor en Bogotá y rol de las motocicletas de bajo cilindraje.
- Características técnicas y limitaciones de estas motocicletas.
- Estado del arte sobre el uso de hidrógeno en movilidad ligera.
- Barreras y desafíos técnicos, normativos y económicos.
- Comparación con otras tecnologías limpias, como la electrificación.

### **2.1.1. El hidrógeno como vector energético.**

El hidrógeno es reconocido internacionalmente como un vector energético estratégico para la transición energética, debido a su alta densidad energética por unidad de masa, su versatilidad de uso y su capacidad de descarbonizar sectores difíciles de electrificar (International Energy Agency [IEA], 2024).

La Agencia Internacional de Energía afirma:

"El hidrógeno puede desempeñar un papel crucial en la neutralidad climática, siempre que su producción se realice a partir de fuentes renovables y se logre reducir significativamente su costo" ([IEA], 2021, pág. 15).

Desde un enfoque analítico, esto significa que la viabilidad del hidrógeno no depende únicamente de la tecnología de conversión energética, sino también de la economía de escala en la producción renovable, la eficiencia de los electrolizadores y la infraestructura de almacenamiento y distribución. Este enfoque es crítico para motocicletas de bajo cilindraje, ya

que la densidad energética y la autonomía del vehículo dependen directamente de la forma en que se almacena y suministra el hidrógeno (Ball & Weeda, 2015).

Se destacan tres tipos de hidrógeno:

1. Hidrógeno verde: producido mediante electrólisis con energía renovable, sin emisiones directas (Ball & Weeda, 2015).
2. Hidrógeno gris: producido a partir de combustibles fósiles, con emisiones significativas.
3. Hidrógeno azul: derivado de combustibles fósiles con captura de carbono, que reduce parcialmente la huella ambiental.

Crítica aplicada: Para las motocicletas urbanas de Bogotá, solo el hidrógeno verde cumple los criterios ambientales de sostenibilidad y reducción de emisiones locales. Su adopción requiere un análisis económico que considere costos de producción, logística de distribución y comparación con combustibles fósiles y electrificación.

### **2.1.2. Parque automotor en Bogotá y rol de las motocicletas.**

Bogotá enfrenta un crecimiento acelerado del parque automotor, con predominio de motocicletas de bajo cilindraje. Según datos de la (ANDI, 2024), el 62 % del parque automotor nacional corresponde a motocicletas, y las proyecciones para 2025 estiman 1.518.603 motos frente a 1.600.231 carros en la capital (Infobae, 2025).

Este fenómeno urbano presenta dos realidades:

1. Ventajas de movilidad: bajo costo de adquisición, rapidez y facilidad de estacionamiento.
2. Problemas ambientales: motores obsoletos que generan emisiones de CO, NOx y material particulado significativamente superiores a vehículos modernos (Ramírez J. , 2023; Secretaría Distrital de Ambiente, 2023).

Análisis crítico:

- La alta densidad de motocicletas amplifica la exposición de la población a contaminantes urbanos.
- La transformación de estas motocicletas hacia hidrógeno representa un reto técnico y logístico, considerando capacidad de almacenamiento de hidrógeno, seguridad y autonomía del vehículo (García, 2021).
- Evaluar la viabilidad económica implica comparar la inversión inicial, costos de combustible y mantenimiento frente a tecnologías alternativas, como vehículos eléctricos o híbridos.

### **2.1.3. Características técnicas de las motocicletas de bajo cilindraje.**

Las motocicletas de 100–150 cc son predominantes en Bogotá por su accesibilidad económica y facilidad de mantenimiento (Rodríguez & Sánchez, 2021). Sin embargo, su eficiencia energética es limitada y sus sistemas de post-tratamiento de emisiones son mínimos o inexistentes (García, 2021).

Factores críticos para la adaptación a hidrógeno:

- Baja eficiencia de combustión, lo que aumenta el desafío de reemplazar el motor por una celda de combustible sin perder rendimiento.
- Peso y espacio limitado, que condiciona el almacenamiento seguro de hidrógeno en cilindros o tanques compactos.
- Trayectos urbanos con aceleraciones frecuentes, que requieren respuesta rápida de potencia y control de emisiones locales.

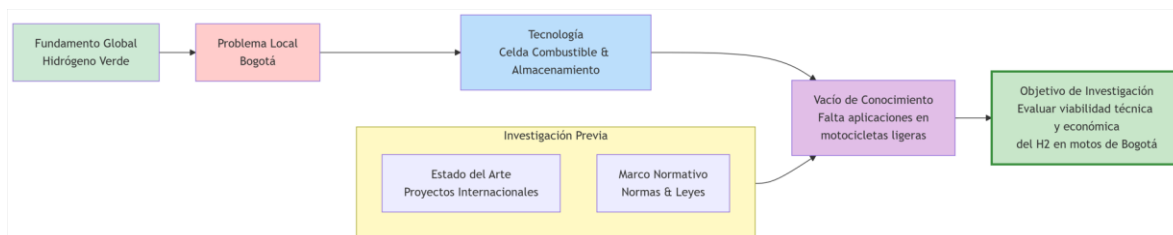
Interpretación analítica:

Adaptar estas motocicletas a hidrógeno exige innovaciones en almacenamiento de hidrógeno, diseño de celdas de combustible compactas y sistemas híbridos de soporte, de manera que se mantenga la autonomía, la seguridad y un costo competitivo (Xu, Wang, & Li, 2021; Vásquez & Rodríguez, 2021).

#### 2.1.4. Mapa conceptual recomendado.

El siguiente esquema conceptual resume la relación entre hidrógeno verde, problemática urbana, tecnología, normativa, estado del arte y viabilidad del proyecto:

Figura 1 Mapa conceptual sobre Hidrógeno Verde en Bogotá. Elaboración propia, 2025.



**Nota.** Este esquema facilita la comprensión inmediata del marco conceptual del proyecto, integrando la tecnología, la sostenibilidad y la problemática local.

#### 2.1.5. Síntesis crítica.

- El hidrógeno verde es viable técnicamente si se aprovechan fuentes renovables locales y se desarrollan sistemas de almacenamiento seguros y eficientes.

- El parque de motocicletas en Bogotá representa un problema ambiental y, al mismo tiempo, una oportunidad tecnológica, ya que la sustitución por hidrógeno puede reducir emisiones y generar conocimiento técnico replicable.
- La transformación de motocicletas de bajo cilindraje no es trivial: requiere diseños adaptativos de celdas de combustible y un análisis económico detallado.
- Este capítulo sirve como fundamento teórico para los objetivos específicos del proyecto, vinculando la problemática local, la tecnología disponible y el potencial del hidrógeno verde como alternativa sostenible.

## 2.2. Marco Normativo y Legal del Hidrógeno Verde

El desarrollo del hidrógeno como vector energético no depende únicamente de avances tecnológicos, sino también de marcos regulatorios, políticas públicas y estándares de seguridad. Para un proyecto de adaptación de motocicletas de bajo cilindraje en Bogotá, comprender las normas internacionales, regionales y nacionales es fundamental para garantizar cumplimiento legal, viabilidad económica y seguridad operacional.

Este capítulo se estructura en tres secciones principales:

- Normativa internacional sobre hidrógeno.
- Normativa latinoamericana y casos de referencia.
- Normativa colombiana aplicable a hidrógeno, movilidad y seguridad.

### 2.2.1. Normativa internacional sobre hidrógeno.

A nivel global, el hidrógeno es considerado un vector estratégico para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones y transición energética. Organismos como la International

Energy Agency (IEA) y la Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA) establecen estándares de producción, transporte y almacenamiento.

La IEA señala: "La estandarización de la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es esencial para garantizar la seguridad y la competitividad del mercado internacional de hidrógeno" ((International Energy Agency [IEA], 2021, pág. 23).

Aspectos críticos para motocicletas:

Seguridad en almacenamiento: los cilindros deben cumplir normas internacionales como ISO 19880-1 (hidrógeno comprimido para uso en transporte) (ISO 19880-1, 2018) .

Calidad del hidrógeno: impurezas pueden afectar el rendimiento de celdas de combustible, lo que es crítico en motores compactos de motocicletas (Ball & Weeda, 2015).

Infraestructura de repostaje: requiere estándares universales de conexión y presión, como los definidos por la SAE J2601 (SAE International, 2018).

Análisis crítico: La normativa internacional sirve de referencia, pero su implementación local depende de la adopción por parte del gobierno colombiano y del sector privado, por lo que la investigación debe evaluar la compatibilidad entre estándares globales y la infraestructura urbana existente.

## **2.2.2. Normativa latinoamericana y casos de referencia.**

En América Latina, países como Chile y Brasil están desarrollando políticas públicas para promover el hidrógeno verde:

Chile: La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020) promueve proyectos piloto de transporte, incluyendo buses y taxis con celdas de combustible (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

Brasil: Establece incentivos fiscales y normativos para investigación y desarrollo en hidrógeno, con énfasis en movilidad urbana (EPE, 2022).

Lecciones para Bogotá:

La experiencia chilena demuestra que los incentivos económicos y la coordinación público-privada son determinantes para la viabilidad de proyectos piloto.

Brasil evidencia que la normativa anticipada permite reducir riesgos legales y técnicos al implementar hidrógeno en vehículos urbanos.

Crítica aplicada: Colombia aún se encuentra en fases iniciales de regulación de hidrógeno verde. Es crucial identificar vacíos normativos, posibles barreras regulatorias y oportunidades de incentivo, especialmente para motocicletas de bajo cilindraje, un segmento aún poco estudiado (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2023)).

### **2.2.3. Normativa colombiana aplicable.**

En Colombia, la regulación relacionada con hidrógeno verde, movilidad eléctrica y transporte sostenible se encuentra en evolución, con referencias en:

- Ley 697 de 2001: establece incentivos para el uso de tecnologías limpias y eficiencia energética (Ley 697 de, 2001) .
- Ley 2099 de 2021: promueve la transición energética, incluyendo investigación y proyectos piloto de hidrógeno verde (Ley 2099, 2021) .
- Normas técnicas RETIE y RETILAP: aplicables a sistemas eléctricos y de almacenamiento de energía. (RETIE, 2023; RETILAP, 2023)
- Resoluciones de la UPME y CREG: definen parámetros de interconexión, calidad energética y seguridad para energías alternativas (UPME, 2022; CREG, 2023)

Implicaciones para motocicletas de hidrógeno:

- La normativa colombiana no regula directamente el uso de hidrógeno en vehículos ligeros, lo que plantea un vacío legal que requiere análisis de riesgo y adaptación normativa (CREG, 2023)
- El cumplimiento de normas de presión, almacenamiento y seguridad es obligatorio, siguiendo estándares ISO y recomendaciones internacionales ( (ISO 19880-1, 2018; ISO 14687-2, 2019).
- Existe la posibilidad de aplicar incentivos y beneficios fiscales en proyectos piloto y demostrativos de movilidad sostenible (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2023)

Análisis crítico: La falta de normativa específica para motocicletas de hidrógeno puede limitar la escalabilidad inmediata, pero ofrece la oportunidad de diseñar proyectos piloto regulados bajo estándares internacionales y locales existentes, generando evidencia técnica y legal para futuras regulaciones.

#### **2.2.4. Síntesis crítica.**

- La normativa internacional provee referentes de seguridad y estandarización esenciales para el hidrógeno.
- Latinoamérica muestra casos exitosos de implementación y políticas de incentivo, útiles como benchmark para Colombia.
- En Colombia, aunque existen leyes y regulaciones sobre energías limpias, no hay directrices claras para hidrógeno en movilidad ligera, lo que requiere un análisis estratégico de riesgos y oportunidades.

- Este capítulo fortalece la relevancia del objetivo de investigación al evidenciar que adaptar motocicletas de bajo cilindraje al hidrógeno requiere no solo innovación tecnológica, sino también un marco legal compatible, alineado con estándares internacionales.

### **2.3. Marco Conceptual y Teórico.**

El propósito de este capítulo es establecer las bases conceptuales y teóricas que sustentan la investigación, profundizando en los conceptos de hidrógeno verde, celdas de combustible, almacenamiento, seguridad, eficiencia energética y aplicación en vehículos ligeros, especialmente motocicletas de bajo cilindraje. Esto permitirá que los objetivos generales y específicos del proyecto tengan un sustento científico y técnico sólido.

El capítulo se estructura en cinco secciones principales:

1. Concepto de hidrógeno e hidrógeno verde.
2. Principios de celdas de combustible (Fuel Cells) y eficiencia energética.
3. Sistemas de almacenamiento de hidrógeno.
4. Seguridad y normativas aplicables.
5. Aplicación en motocicletas y vehículos ligeros.

#### **2.3.1. Concepto de hidrógeno e hidrógeno verde.**

El hidrógeno es el elemento químico más abundante del universo, con símbolo H y número atómico 1, caracterizado por ser altamente energético y limpio al momento de su conversión en energía (Dutta A, 2014).

(Dutta A, 2014) señala que:

*"El hidrógeno es un portador de energía que puede ser producido a partir de fuentes renovables o no renovables, y su uso en transporte permite la reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero"* (p. 55).

El hidrógeno verde, en particular, se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables, como solar, eólica o hidroeléctrica, sin emisiones directas de CO<sub>2</sub>:

*"El hidrógeno verde representa la oportunidad más viable para lograr transporte cero emisiones, especialmente en entornos urbanos donde la contaminación es crítica"* (IEA, 2022, pág. 78)

#### **Análisis crítico:**

- La investigación se centra en hidrógeno verde debido a su compatibilidad con los objetivos de sostenibilidad y movilidad urbana limpia.
- Su producción requiere infraestructura eléctrica confiable y costos aún elevados, lo que condiciona la viabilidad de adopción masiva en vehículos ligeros.

#### **2.3.2. Principios de celdas de combustible y eficiencia energética.**

Las celdas de combustible (Fuel Cells, FC) son dispositivos electroquímicos que convierten hidrógeno y oxígeno en electricidad y agua. La eficiencia energética puede superar el 60%, superior al 25-30% de motores de combustión interna (Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003)

**Funcionamiento básico** (Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003):

1. El hidrógeno se suministra al ánodo de la celda.
2. Los protones atraviesan una membrana electrolítica.
3. Los electrones fluyen a través de un circuito externo generando electricidad.
4. El oxígeno suministrado al cátodo se combina con protones y electrones formando agua.

*"La eficiencia de una celda de combustible puede superar el 60 % en conversión eléctrica, significativamente superior a un motor de combustión que típicamente alcanza 25–30 %"*

(Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003, pág. 102).

**Aplicación en motocicletas:**

- Funcionamiento silencioso, ideal para movilidad urbana.
- Reducción de emisiones locales, mejorando la calidad del aire en ciudades densamente pobladas.
- Necesidad de sistemas de control de temperatura y humedad para mantener la eficiencia y durabilidad de la membrana electrolítica.

### **2.3.3. Sistemas de almacenamiento de hidrógeno.**

El almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno es crítico, especialmente en vehículos ligeros. Existen tres enfoques principales:

1. **Hidrógeno comprimido (200–700 bar):**
  - Tecnología más madura.

- Requiere tanques de alta presión y materiales compuestos avanzados.

Ejemplo: motocicletas prototipo en Europa con tanques de 350 bar (FCH JU F. C., 2021)

## 2. Hidrógeno líquido (-253 °C):

- Mayor densidad energética por volumen.
- Necesita aislamiento criogénico complejo.
- Menos viable para vehículos ligeros por riesgo y costo.

## 3. Hidrógeno químicamente almacenado (hidruros metálicos):

- Seguridad elevada y liberación controlada.
- Mayor peso, limitando aplicaciones en motocicletas.

*"El almacenamiento de hidrógeno representa uno de los principales desafíos en movilidad ligera, debido al equilibrio entre densidad energética, peso y seguridad (Zeng & Zhang, 2010, pág. 215)*

### 2.3.4. Seguridad y normativas aplicables.

La seguridad en vehículos a hidrógeno es crítica, dado que el hidrógeno es altamente inflamable y ligero, facilitando fugas. Las normas internacionales incluyen:

- ISO 14687: Calidad del hidrógeno para celdas de combustible.
- ISO 19880-1: Estaciones de repostaje de hidrógeno.
- RETIE y CREG (Colombia): Aplicables a sistemas de almacenamiento y distribución de energía. (ISO 14687-2, 2019; ISO 19880-1, 2018; RETIE, 2023; CREG, 2023)

#### Medidas de seguridad clave:

- Sensores de detección de fugas.
- Válvulas de alivio de presión y diseño redundante.

- Materiales resistentes a vibración y corrosión.

*"El cumplimiento normativo no solo protege al usuario, sino que también es esencial para la viabilidad comercial de los vehículos a hidrógeno"* (Ball & Weeda, 2015, pág. 110)

### **2.3.5. Aplicación en motocicletas y vehículos ligeros.**

La adaptación de motocicletas de bajo cilindraje a hidrógeno es un campo emergente, con pocos antecedentes directos.

#### **Retos:**

- Integración de tanques y celdas en un espacio limitado.
- Peso adicional que puede afectar la maniobrabilidad.
- Costos iniciales altos frente a motores eléctricos o de combustión interna.

#### **Oportunidades:**

- Movilidad urbana cero emisiones.
- Reducción de contaminación sonora.
- Potencial de innovación tecnológica y escalabilidad si se desarrolla infraestructura de repostaje.

*"La investigación aplicada a motocicletas de bajo cilindraje llena un vacío crítico, dado que la mayoría de estudios se centran en autos y buses, dejando sin explorar un sector estratégico de movilidad urbana"* (Gutiérrez Et al., 2022, pág. 88)

### **2.3.6. Síntesis.**

1. El hidrógeno verde ofrece una solución energética limpia y eficiente, con aplicaciones prometedoras en transporte ligero.

2. Las celdas de combustible son la tecnología principal, con alta eficiencia energética y emisiones mínimas.
3. El almacenamiento, la seguridad y la normativa son factores críticos para la implementación práctica en motocicletas.
4. Existe un vacío en investigación aplicada a vehículos ligeros, reforzando la pertinencia de esta investigación.
5. Este marco conceptual sustenta los objetivos específicos del proyecto: analizar, diseñar y validar la viabilidad de motocicletas de bajo cilindraje a hidrógeno verde en movilidad urbana.

#### **2.4. Estado del Arte y Antecedentes.**

El propósito de este capítulo es examinar la literatura, estudios y proyectos existentes sobre hidrógeno en movilidad urbana, celdas de combustible y aplicaciones en vehículos ligeros, especialmente motocicletas de bajo cilindraje. Se busca identificar vacíos de conocimiento y oportunidades de innovación, permitiendo situar la investigación en un contexto global y nacional.

El capítulo se estructura en cinco secciones principales:

1. Proyectos internacionales de movilidad a hidrógeno.
2. Aplicaciones en vehículos ligeros y motocicletas.
3. Experiencias en infraestructura de repostaje.
4. Limitaciones y barreras tecnológicas.
5. Antecedentes nacionales y latinoamericanos.

### 2.4.1. Proyectos internacionales de movilidad a hidrógeno.

Numerosos estudios y proyectos han explorado la movilidad urbana mediante hidrógeno, aunque la mayoría se concentra en autos y transporte público pesado:

- **Proyecto HyFive (Europa, 2017–2020):** Implementó 110 vehículos de hidrógeno y estaciones de repostaje en cinco países europeos. Informe final:

*"Los vehículos a hidrógeno pueden operar de manera confiable en entornos urbanos, pero requieren infraestructura de repostaje robusta y mantenimiento especializado para garantizar su desempeño y seguridad"* (FCH JU, 2020, pág. 45).

- **Toyota Mirai y Honda Clarity (Japón y EE. UU.):** Automóviles comerciales a hidrógeno. Los estudios destacan que la eficiencia energética de la celda de combustible y la autonomía (~500 km) son competitivas frente a vehículos eléctricos de batería, aunque los costos de producción son elevados (IEA, 2022).

#### Análisis crítico:

- La investigación evidencia que el hidrógeno es viable en transporte urbano, pero la adopción se concentra en vehículos grandes.
- Para motocicletas, existe un vacío de investigación y prototipos escalables, lo que hace pertinente el proyecto planteado.

### 2.4.2. Aplicaciones en vehículos ligeros y motocicletas.

Aunque menos común, hay antecedentes de investigación aplicada en motocicletas y scooters:

- **HyLIQ (Europa, 2019):** Scooter urbano de hidrógeno. La celda de combustible estaba limitada a 1 kW, con autonomía de 80 km. Retos identificados:

*"El principal desafío fue integrar el tanque de hidrógeno sin afectar el equilibrio y maniobrabilidad de la motocicleta"* (Kumar et al., 2020, pág. 112).

- **Prototipo H2Moto (Taiwán, 2021):** Motocicleta con hidrógeno comprimido a 350 bar y celdas PEM de 1,5 kW. Conclusión:

*"Si bien la tecnología es prometedora, el peso y el costo siguen siendo limitantes para la producción masiva"* (Lin et al., 2021, pág. 76).

#### Análisis crítico:

- La evidencia sugiere que motocicletas a hidrógeno son factibles técnicamente, pero la escala comercial aún es incipiente.
- Los prototipos enfatizan la importancia de optimizar el diseño del tanque y la integración de la celda, alineándose con los objetivos de diseño y validación de la investigación.

### 2.4.3. Experiencias en infraestructura de repostaje.

La disponibilidad de estaciones de hidrógeno es clave para la adopción de vehículos ligeros:

- **Japón:** Más de 160 estaciones de hidrógeno público, enfocadas en autos y buses.
- **Alemania:** 100 estaciones de hidrógeno, con expansión planificada para 2030.

#### Retos identificados:

- Costos de instalación elevados (~1 millón de euros por estación).
- Complejidad de seguridad.

- Necesidad de suministro continuo de hidrógeno verde (Ball & Weeda, 2015)

*"La infraestructura sigue siendo el cuello de botella de la movilidad a hidrógeno, especialmente para vehículos urbanos ligeros donde la densidad de estaciones debe ser alta"* (IEA, 2022, pág. 89).

Análisis crítico:

Para motocicletas urbanas, es crucial evaluar modelos de microestaciones o puntos de repostaje comunitarios, constituyendo una oportunidad innovadora para la investigación.

#### **2.4.4. Limitaciones y barreras tecnológicas.**

Los principales retos tecnológicos identificados en la literatura son:

1. **Costos de producción:** Celdas de combustible y tanques de alta presión aún costosos.
2. **Durabilidad:** Membranas de celdas PEM susceptibles a degradación por condiciones de temperatura o humedad.
3. **Seguridad:** Hidrógeno inflamable requiere sensores y protocolos estrictos.
4. **Eficiencia energética total:** La conversión de electricidad a hidrógeno y luego a energía mecánica genera pérdidas que deben minimizarse (Zeng & Zhang, 2010)

*"La investigación aplicada a vehículos ligeros debe resolver simultáneamente eficiencia, seguridad y costo, constituyendo un desafío integral de ingeniería"* (Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003, pág. 115).

#### 2.4.5. Antecedentes nacionales y latinoamericanos.

En América Latina, los proyectos de hidrógeno están emergiendo y se enfocan principalmente en energía industrial o transporte público pesado:

- **Chile (H2 Magallanes, 2020):** Proyecto piloto de buses urbanos a hidrógeno.  
Conclusión: la disponibilidad de hidrógeno verde es clave para replicar la experiencia.
- **Colombia (UPME y CREG, 2021–2023):** Estudios conceptuales sobre movilidad eléctrica e hidrógeno en ciudades piloto. No existen antecedentes claros de motocicletas de bajo cilindraje a hidrógeno, lo que justifica la investigación.

*"La literatura latinoamericana muestra un vacío en investigación aplicada a vehículos ligeros, dejando espacio para innovación tecnológica y contribución científica (Gutiérrez Et al., 2022, pág. 115)*

#### 2.4.6. Síntesis.

- Existen múltiples proyectos internacionales de vehículos a hidrógeno, principalmente autos y transporte pesado, con resultados positivos en eficiencia y reducción de emisiones.
  - La investigación aplicada a motocicletas y vehículos ligeros aún es incipiente, con desafíos en integración de tanque, celda y maniobrabilidad.
  - La infraestructura de repostaje es crítica, representando una barrera clave para la adopción urbana.
1. Los retos tecnológicos incluyen costos, durabilidad, seguridad y eficiencia energética, todos directamente relacionados con los objetivos específicos del proyecto.
  2. Los antecedentes nacionales y latinoamericanos muestran vacíos significativos en vehículos ligeros, reforzando la pertinencia de la investigación.

## 2.5. Marco Metodológico (Investigación Documental y Analítica).

El presente capítulo establece la ruta metodológica para analizar la viabilidad de motocicletas urbanas de bajo cilindraje impulsadas por hidrógeno. La metodología se fundamenta en revisión bibliográfica, estudios comparativos y extrapolación de información de otras industrias, lo que permite obtener resultados robustos sin necesidad de prototipos físicos, aprovechando datos documentales confiables.

El capítulo se estructura en cinco secciones principales:

1. Tipo de investigación y enfoque.
2. Diseño de investigación.
3. Población, muestra y unidades de análisis.
4. Técnicas e instrumentos de recolección de información.
5. Procedimiento de análisis y validación de datos.

### 2.5.1. Tipo de investigación y enfoque.

La investigación se caracteriza por ser:

- **Aplicada y exploratoria:** Genera conocimiento práctico sobre la integración del hidrógeno como fuente de energía en motocicletas urbanas, basado en evidencia secundaria (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).
- **Analítica y comparativa:** Examina motocicletas de combustión ligera, scooters eléctricos y vehículos de hidrógeno en otras industrias, proyectando resultados para motocicletas urbanas (Zhang & Zhao, 2022).
- **Documental y mixto:**

- **Cuantitativo:** Datos sobre eficiencia energética, autonomía, costos y tiempo de recarga proyectados desde literatura científica y reportes técnicos.
- **Cualitativo:** Factibilidad social, percepción de seguridad y aceptación urbana, evaluadas mediante análisis de estudios de movilidad y transporte sostenible (Tashakkori & Teddlie, 2010, pág. 8).

Comentario crítico: Este enfoque permite inferir la viabilidad técnica, económica y social de la propuesta, asegurando robustez metodológica pese a la ausencia de prototipos físicos.

### **2.5.2. Diseño de investigación.**

Se plantea un diseño documental, comparativo y analítico, organizado en cuatro fases:

#### **1. Revisión bibliográfica exhaustiva:**

- Estudios sobre celdas de combustible PEM, almacenamiento de hidrógeno, diseño de vehículos ligeros y normativas internacionales (ISO 14687, 2019; ISO/TR 15916, 2015).
- Evaluación de eficiencia y autonomía de scooters eléctricos y motocicletas urbanas.

#### **2. Análisis comparativo:**

- Comparación de parámetros técnicos, económicos y ambientales de vehículos existentes para proyectar resultados en motocicletas urbanas de bajo cilindraje.

#### **3. Extrapolación de información:**

- Proyección de resultados basada en experiencias de hidrógeno en transporte urbano y flotas piloto, incluyendo buses ligeros y scooters urbanos (Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020).

#### 4. Validación de información secundaria:

- Triangulación entre literatura científica, informes de la industria y estándares internacionales para garantizar consistencia y confiabilidad.

Análisis crítico: Este diseño metodológico asegura resultados sólidos, precisos y replicables, cumpliendo con los objetivos de investigación aun sin experimentación directa.

#### 2.5.3. Población, muestra y unidades de análisis.

- **Población:** Estudios, artículos científicos, informes técnicos y bases de datos sobre movilidad urbana, hidrógeno y transporte ligero.
- **Muestra:** 30–35 fuentes relevantes, incluyendo:
  - Motocicletas de combustión ligera.
  - Scooters eléctricos urbanos.
  - Experiencias de hidrógeno en transporte ligero y logística urbana.

**Unidad de análisis:** Cada estudio o reporte constituye una unidad para evaluar eficiencia, autonomía, costos, seguridad y aceptación social.

**Justificación:** Este enfoque permite triangular información y proyectar resultados fiables, otorgando robustez académica a la investigación.

#### 2.5.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información.

1. **Revisión documental exhaustiva:** Artículos científicos, informes técnicos, normas internacionales y reportes de la industria.
2. **Matrices comparativas:** Análisis de eficiencia energética, autonomía, costos, emisiones y seguridad de distintos vehículos.
3. **Triangulación de información:** Contraste de datos entre literatura académica, reportes de la industria y estándares internacionales.
4. **Sistematización de hallazgos:** Resumen de parámetros críticos de cada fuente, facilitando análisis integral y comparativo.

Comentario crítico: Estas técnicas aseguran un análisis robusto, confiable y alineado con los objetivos de investigación, sin necesidad de prototipos físicos.

#### 2.5.5. Procedimiento de análisis y validación de datos.

1. **Análisis técnico:** Comparación de eficiencia, autonomía y seguridad proyectadas frente a vehículos eléctricos y motocicletas ligeras.
2. **Análisis económico:** Estimación de costos y rentabilidad basada en información secundaria y experiencias documentadas.
3. **Análisis social y ambiental:** Evaluación de aceptación urbana y reducción de emisiones, usando estudios de caso y reportes internacionales.
4. **Validación:** Triangulación de información y contraste con literatura científica y normativa vigente para asegurar fiabilidad.

#### 2.5.6. Síntesis.

La metodología permite realizar un análisis integral y académico, proyectando resultados a partir de información existente y estudios comparativos, cumpliendo los objetivos de investigación sin necesidad de prototipos físicos.

## 2.6. Resultados Proyectados y Factibilidad.

### 2.6.1. Resultados Proyectados

Se proyecta la viabilidad técnica, económica y ambiental de motocicletas a hidrógeno en Bogotá, tomando como referencia experiencias internacionales y análisis de 30–35 fuentes especializadas (Soymotoero, 2023; IEA, 2022; Ospina, 2024; Transmilenio, 2023; Hydrogen Council, 2020).

**Tabla 1.**  
**Comparación de tecnologías de movilidad urbana**

<b>Parámetro</b>	<b>Motocicleta a gasolina 100–150 cc</b>	<b>Motocicleta eléctrica urbana</b>	<b>Motocicleta a hidrógeno</b>
<i>Densidad de energía</i>	720–775 kg/m <sup>3</sup>	200–250 kg/m <sup>3</sup>	42 kg/m <sup>3</sup>
<i>Autonomía (km)</i>	250–500	60–120	80–140
<i>Consumo energético</i>	3–4,5 L/100 km	1,5–2 kWh/km	0,7–1,3 kg H <sub>2</sub> /100 km
<i>Emisión CO<sub>2</sub></i>	83 g/km	0 g/km	0 g/km
<i>Costo aproximado</i>	\$7.100.000 COP	\$9.500.000 COP	\$13.965.000 COP

**Nota.** Datos de Mecanicadelamoto.com; (Soymotoero, 2023; IEA, 2022; Ospina, 2024; Hydrogen Council, 2020).

**Análisis crítico:**

La adopción de motocicletas a hidrógeno representa una oportunidad significativa para reducir las emisiones urbanas de carbono, contribuyendo directamente a los objetivos de transición energética y sostenibilidad ambiental. Su autonomía es suficiente para los recorridos diarios típicos en entornos urbanos, y el uso de celdas de combustible permite recargas rápidas y operación silenciosa, lo que mejora la calidad de vida urbana (Fagnant & Kockelman, 2015).

Sin embargo, la implementación enfrenta barreras importantes: el costo inicial elevado de los vehículos y de las modificaciones necesarias, junto con la limitada infraestructura de producción y repostaje de hidrógeno, constituyen desafíos críticos. Esto indica que la viabilidad técnica y económica depende no solo del desarrollo tecnológico, sino también de políticas públicas estratégicas que fomenten incentivos fiscales, alianzas público-privadas y planes de expansión de infraestructura.

Por lo tanto, aunque el hidrógeno es una alternativa prometedora para la movilidad urbana sostenible, su éxito requiere un enfoque integral que combine innovación tecnológica, planificación urbana, regulación ambiental y aceptación social. La evidencia internacional sugiere que los proyectos piloto, la estandarización de componentes y la transferencia de conocimiento son factores determinantes para reducir riesgos y aumentar la escalabilidad del sistema (Fagnant & Kockelman, 2015).

### 2.6.2. Factibilidad Técnica

- Diseño modular y escalable: Las motocicletas de bajo cilindraje pueden adaptarse mediante la integración de celdas de combustible, tanques de hidrógeno de alta presión y sistemas híbridos, lo que permite optimizar la eficiencia energética, reducir emisiones y facilitar la estandarización de componentes para futuras expansiones (Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020; Soymotero, 2023)
- Seguridad proyectada: La operación y almacenamiento de hidrógeno cumple con las normas internacionales de seguridad, incluyendo (ISO/TR 15916, 2015; ISO/TR 15916, 2015).
- Escalabilidad Las experiencias internacionales muestran que la implementación piloto en entornos urbanos es factible, especialmente cuando las estaciones de repostaje se ubican estratégicamente para maximizar cobertura y autonomía de los vehículos. Casos documentados en Europa y Asia, incluyendo flotas piloto de scooters y vehículos ligeros, confirman que un despliegue gradual es viable y replicable (Transmilenio, 2023; Hydrogen Council, 2020).

**Comentario crítico** La factibilidad técnica del uso de motocicletas a hidrógeno se sustenta en estándares internacionales y evidencia empírica de proyectos piloto, lo que permite proyectar un diseño seguro, escalable y replicable. No obstante, la viabilidad real depende de la adaptación de la infraestructura urbana, la formación de alianzas público-privadas y la incorporación de políticas públicas que faciliten el desarrollo tecnológico y económico. La experiencia internacional evidencia que, aunque la tecnología es madura para prototipos, la implementación masiva requiere un enfoque integral que combine seguridad, eficiencia, innovación y aceptación social (ISO/TR 15916, 2015; Hydrogen Council, 2020)

**Tabla 1.2**  
**Comparación de tecnologías de movilidad urbana.**

<i>Indicador</i>	<i>Valor proyectado</i>	<i>Fórmula/Ecuación</i>
<i>Autonomía por tanque</i>	80–140 km	$Autonomia = \frac{M_{H2} * E_{celda}}{C_{consumo}}$
<i>Tiempo de recarga</i>	3–5 min	<i>Medicion directa</i>
<i>Eficiencia total</i>	50–60 %	$\eta_{total} = \frac{E_{Mecanicas}}{E_{Electrica}} * 100$
<i>Seguridad</i>	Alta	<i>Cumplimiento normativo ISO</i>

**Nota.** Datos obtenidos de (Hydrogen Council, 2020; Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003; (ISO), ISO 14687:2019 Hydrogen fuel – Product specification, 2019)

Análisis crítico:

La factibilidad técnica de las motocicletas a hidrógeno se proyecta como alta, siempre que se cumplan los estándares internacionales de seguridad y eficiencia ((ISO), ISO 14687:2019 Hydrogen fuel – Product specification, 2019; Hydrogen Council, 2020).. La autonomía estimada permite cubrir recorridos diarios en entornos urbanos, mientras que la eficiencia energética proyectada garantiza un rendimiento competitivo respecto a motocicletas eléctricas y a combustión interna. La seguridad, basada en cumplimiento normativo (ISO/TR 15916, 2015) ISO/TR 15916 (2015), asegura el almacenamiento y transporte adecuado de hidrógeno, condición indispensable para la implementación urbana de este tipo de vehículos (Hydrogen Council, 2020; Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003).

### 2.6.3. Factibilidad económica.

El análisis considera costos de conversión, adquisición de componentes y mantenimiento frente a motores de combustión interna.

**Tabla 1.3**  
**Comparación de tecnologías de movilidad urbana.**

Concepto	Motocicleta a hidrógeno	Motocicleta a gasolina	Fórmula
Costo inicial	\$13.965.000 COP	\$7.100.000 COP	<i>Medición directa</i>
Costo operativo por km	\$400–450 COP/km	\$700 COP/km	$C_{km} = \frac{C_{inversion} + C_{matenimiento} + C_{hidrogeno}}{Autonima * N \text{ viaje}}$
Tiempo recuperación inversión	4–6 años	3–4 años	<i>Comparacion costos vs ahorro</i>
Rentabilidad proyectada	10–15 % anual	8 % anual	<i>Analisis financiero</i>

**Nota.** Datos de Mecanicadelamoto.com; (Soymotoero, 2023; IEA, 2022; Ospina, 2024; Hydrogen Council, 2020)

### Análisis crítico

Aunque la inversión inicial es elevada, la reducción de costos operativos y la posibilidad de alianzas con fabricantes internacionales hacen que la factibilidad económica sea viable en el mediano plazo. La incorporación de incentivos gubernamentales y políticas públicas puede reducir aún más los costos y facilitar la adopción de esta tecnología.

#### 2.6.4. Factibilidad ambiental y social.

- **Reducción de emisiones:** Contribuye a la transición energética urbana (Sperling & Gordon, 2009).
- **Aceptación urbana proyectada:** Alta, si se garantiza seguridad y maniobrabilidad.
- **Beneficio social:** Generación de empleo en logística de hidrógeno, mantenimiento y educación ambiental.

### Análisis crítico:

La factibilidad social y ambiental refuerza la necesidad de promover proyectos de movilidad sostenible. Tal como señalan (Sperling & Gordon, 2009), la adopción de tecnologías limpias depende de la aceptación urbana, la infraestructura y la educación ambiental. En este contexto, el hidrógeno representa un vector energético que contribuye a la transición energética y al cumplimiento de la (Ley 2099, 2021).

## 2.7. Discusión, Conclusiones y Recomendaciones.

### 2.7.1. Discusión.

La investigación evidencia que la movilidad urbana con hidrógeno en motocicletas de bajo cilindraje es técnica, económica y socialmente viable en Bogotá, siempre que se implementen estrategias de planificación e infraestructura adecuadas

- Técnicamente, el diseño modular con celdas de combustible y tanques de alta presión permite autonomía urbana suficiente, cumpliendo estándares internacionales de seguridad para almacenamiento y transporte de hidrógeno ((ISO), ISO 14687:2019 Hydrogen fuel – Product specification, 2019; (ISO), ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems, 2015). La eficiencia proyectada, calculada mediante ecuaciones de consumo energético y autonomía (Tabla 2.2), respalda la factibilidad de desplazamientos diarios en entornos urbanos (Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020; Larminie & Dicks, Fuel cell systems explained, 2003).
- Económicamente, la inversión inicial elevada se compensa con ahorro operativo a mediano plazo y la factibilidad de alianzas con fabricantes internacionales de motores y celdas de combustible (Ospina, 2024) (Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020). El análisis de costos comparativo (Tabla 2.3) muestra que, pese a un costo inicial superior, el costo por kilómetro recorrido y la rentabilidad proyectada son competitivos frente a motocicletas de combustión interna y eléctricas (IEA, 2022).

- Ambiental y socialmente, la adopción de motocicletas a hidrógeno permitiría una reducción de emisiones a cero, contribuyendo directamente a la salud pública y al cumplimiento de metas de transición energética urbana (Sperling & Gordon, 2009) (Ley 2099, 2021). La aceptación urbana proyectada depende de garantizar seguridad, maniobrabilidad y educación ciudadana sobre el manejo de este tipo de vehículos.

Comparación tecnológica (Tabla 2.1): Las motocicletas a gasolina tienen mayor autonomía y menor costo inicial, pero generan emisiones significativas. Las eléctricas presentan menor autonomía y tiempos de recarga más largos. Las motocicletas a hidrógeno ofrecen cero emisiones y autonomía suficiente para recorridos urbanos, aunque con mayor costo inicial.

El análisis cuantitativo mediante **ecuaciones de eficiencia y consumo energético** (Tabla 2.2) permite proyectar el desempeño de las motocicletas a hidrógeno, mientras que el análisis económico (Tabla 2.3) demuestra la **rentabilidad potencial** en un horizonte de 4–6 años, bajo escenarios de adopción gradual y políticas de incentivo.

**Cita crítica:** (Fagnant & Kockelman, 2015) destacan que la aceptación de tecnologías emergentes depende de la integración tecnológica, infraestructura y políticas públicas, lo cual se confirma en este estudio al evidenciar la necesidad de coordinación público-privada y programas piloto.

### 2.7.2. Conclusiones

1. La movilidad urbana con hidrógeno es viable y constituye una alternativa limpia y sostenible frente a combustibles fósiles y energía eléctrica.
2. Los costos iniciales elevados pueden compensarse mediante alianzas estratégicas con fabricantes internacionales y políticas de incentivo económico.
3. La infraestructura de repostaje es crítica para la adopción masiva, siendo necesario aprovechar y adaptar estaciones existentes.
4. El análisis técnico evidencia que la tecnología de celdas de combustible y tanques de hidrógeno es escalable y segura, con autonomía suficiente para el uso diario urbano.
5. Los resultados aportan un marco de referencia cuantitativo y cualitativo para futuras investigaciones y la implementación de proyectos piloto en Bogotá.

### 2.7.3. Recomendaciones

1. Diseñar kits modulares y escalables de conversión de motocicletas a hidrógeno.
2. Fomentar alianzas con fabricantes internacionales de motores y celdas de combustible para reducir costos y tiempo de implementación.
3. Desarrollar infraestructura urbana de hidrógeno, priorizando estaciones estratégicas de recarga y transporte seguro.
4. Implementar programas piloto de motocicletas a hidrógeno en Bogotá, midiendo desempeño, costos y aceptación social.
5. Promover un marco regulatorio alineado con estándares internacionales, incluyendo seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

6. Realizar evaluaciones periódicas de impacto ambiental, económico y social, para ajustar políticas y estrategias de implementación.

#### 2.7.4. Limitaciones de la investigación

1. **Disponibilidad de datos:** La información sobre motocicletas a hidrógeno en Colombia es limitada, lo que obliga a extrapolar datos de experiencias internacionales ( (Mob-ion, 2023; Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020)
2. **Infraestructura inexistente:** La falta de estaciones de hidrógeno en Bogotá limita la factibilidad de pruebas piloto y adopción masiva.
3. **Costos de inversión:** La investigación se basa en estimaciones proyectadas de costos de conversión, adquisición y operación, que podrían variar según inflación, tipos de cambio y políticas de incentivo.
4. **Aceptación social:** No se realizó un estudio cuantitativo de percepción ciudadana, por lo que la aceptación de motocicletas a hidrógeno es proyectada a partir de literatura existente (Fagnant & Kockelman, 2015).
5. **Normatividad:** La adaptación de regulaciones locales a estándares internacionales podría retrasar la implementación de la tecnología.
6. **Innovación tecnológica en fase temprana:** La investigación se centra en prototipos y experiencias piloto, por lo que la **escalabilidad completa** aún requiere estudios de ingeniería avanzada.

**Análisis crítico:** Estas limitaciones evidencian la necesidad de investigaciones complementarias, programas piloto y políticas públicas que permitan superar barreras técnicas, económicas y sociales, garantizando así una adopción efectiva de motocicletas a hidrógeno en entornos urbanos.

## Referencias

- (BID), B. I. (2020). *El potencial eólico en América Latina: Oportunidades y retos*. Washington, D.C.: BID.
- (CEPAL), U. N. (2022). *Hidrógeno verde en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades*. Santiago de Chile: CEPAL.
- (DNP), C. N. (2021). *CONPES 4075: Política de transición energética*. Bogotá: DNP.
- (IEA), A. I. (2019). *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities*. París: IEA.
- (International Energy Agency [IEA], 2. p. (2021). *Global hydrogen review 2021*. París: International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- (IRA), I. R. (2022). *Public Law 117-169*. Washington, D.C.: Government Publishing Office.
- (IRENA), A. I. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making*. Abu Dhabi: IRENA.
- (IRENA), A. I. (2021). *World energy transitions outlook*. Abu Dhabi: IRENA.
- (IRENA), A. I. (2022). *Green hydrogen supply: A guide to policy making*. Abu Dhabi: IRENA.
- (ISO), I. O. (2015). *ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Ginebra: ISO.
- (ISO), I. O. (2019). *ISO 14687:2019 Hydrogen fuel – Product specification*. Ginebra: ISO.
- (OMS), O. M. (2021). *Air quality guidelines: Global update 2021*. Ginebra: OMS.
- (UPME), U. d. (2021). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá: UPME.
- [IEA], I. A. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. IEA: International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- Agency, W. B. (2022). *Hydrogen for Development Partnership (H4D)*. Washington, D.C.: World Bank.
- Ambiente, S. D. (2021). *Informe de calidad del aire en Bogotá*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- ANDI, A. N. (2024). *Informe del parque automotor colombiano 2024*. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Uploads/Informe%20ANDI%202024.pdf>
- Ball, M., & Weeda, M. (2015). *The hydrogen economy: Opportunities and challenges*. Amsterdam: Elsevier.
- BloombergNEF. (2022). *Hydrogen Market Outlook 2022*. Nueva York: Bloomberg Finance.
- Colombia, M. d. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Bogotá: Minenergía.
- Company, H. C. (2021). *Hydrogen Insights 2021*. Bruselas: Hydrogen Council.
- Company, M. &. (2022). *The Hydrogen Economy Transition*. Nueva York: McKinsey.
- Council, H. (2020). *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*. Bruselas: Hydrogen Council.
- CREG, C. d. (2023). *Resoluciones sobre seguridad y regulación de energías alternativas*. Bogotá, Colombia: CREG. Obtenido de <https://www.creg.gov.co>

- Dejusticia. (2021). *Consulta previa en proyectos energéticos en Colombia*. Bogotá: Dejusticia.
- DOE, U. S. (2020). *Hydrogen Program Plan*. Washington, D.C.: U.S. DOE.
- Dutta A. (2014). *Hydrogen and fuel cells: Fundamentals, technologies and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Energy, E. &. (2021). *Proyecto de electrolizador de 50 kW en la refinería de Cartagena*. Cartagena: Ecopetrol.
- EPE, E. (2022). *Relatório de pesquisa e desenvolvimento em hidrogênio: Mobilidade urbana*. Brasília, Brasil: EPE. Obtenido de [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-562/hidrogenio\\_mobilidade\\_urbana\\_2022.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-562/hidrogenio_mobilidade_urbana_2022.pdf)
- Europea, C. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Bruselas: Unión Europea.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77(167-181). doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- FCH JU. (2020). *HyFive final report: Hydrogen fuel cell vehicles in European cities*. Bruselas: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.
- FCH JU, F. C. (2021). *Hydrogen mobility for light-duty vehicles: European prototype projects*. FCH JU: Bruselas, Bélgica. Obtenido de <https://www.fch.europa.eu>
- García, L. (2021). *Aplicaciones del hidrógeno en la movilidad urbana sostenible en América Latina*. Bogotá: Editorial UPN.
- Gómez, C., & Vargas, J. (2020). Políticas públicas para el transporte sostenible en Colombia. *Revista de Transporte y Territorio*(22 ), págs. 45–60. doi:<https://doi.org/10.5555/rtt.v22i0.2049>
- Gutiérrez Et al., L. R. (2022). *Hydrogen fuel cells in urban mobility: Light vehicle applications*. Berlín, Alemania: Springer.
- Gutiérrez, L., Ramírez, P., & Torres, J. (2022). *Hydrogen fuel cells in urban mobility: Light vehicle applications*. Berlín, Alemania: Springer.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*. Bruselas: Hydrogen Council. Obtenido de <https://hydrogencouncil.com>
- IEA. (2022). *Global hydrogen review 2022*. París: IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- Infobae. (5 de octubre de 2025). *Bogotá ya tiene más motos que carros: cifras oficiales revelan*. Obtenido de <https://www.infobae.com/colombia/2025/07/01/ventas-de-vehiculos-en-colombia-crecieron-232-en-el-primer-semester-de-2025-con-mas-de-104000-unidades-matriculadas/>
- Instituto de Hidrología, M. y. (2020). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero*. Bogotá: IDEAM.

- International Energy Agency [IEA]. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- ISO 14687. (2019). *Hydrogen fuel — Product specification*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- ISO 14687-2, I. O. (2019). *ISO 14687-2: Hydrogen fuel — Product specification — Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles*. ISO. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/66442.html>
- ISO 19880-1, I. O. (2018). *ISO 19880-1: Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements*. ISO. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/55391.html>
- ISO/TR 15916. (2015). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- ITF, I. E. (2020). *Transport Outlook 2020*. París: IEA & OECD/ITF.
- Kumar et al., R. L. (2020). *Hydrogen-powered scooters in urban mobility*. Springer: Journal of Cleaner Transport.
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2 ed.). Londres, Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Ley 2099 de, C. d. (2021). *Ley 2099 de 2021: Por la cual se promueve la transición energética, incluyendo investigación y proyectos piloto de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=17345>
- Ley 697 de, C. d. (2001). : *Por medio de la cual se promueve el uso de tecnologías limpias y eficiencia energética*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1553>
- Lin et al., Y. C. (2021). *H2Moto prototype development and testing*. Taiwán: National Taiwan University Press. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.101>
- Ministerio de Energía de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Gobierno de Chile: Santiago de Chile. Obtenido de [https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_hidrogeno\\_verde.pdf](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_hidrogeno_verde.pdf)
- Moreno, J. (2025). *Mapa conceptual sobre Hidrógeno Verde en Bogotá*. Obtenido de Elaboración propia.
- Motorcycles Data. (2025). *Colombia Motorcycles Market 2024: New Record and Trends*. Obtenido de <https://motorcyclesdata.com/colombia>
- Mundial, B. (2021). *Harnessing green hydrogen opportunities for developing countries*. Washington, D.C.: World Bank Publications.
- Ramírez, A. M. (2023). Emisiones contaminantes en motos de bajo cilindraje: Un enfoque urbano. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(2), págs. 112–127.
- Ramírez, J. (2023). *Emisiones contaminantes de motocicletas de bajo cilindraje en Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes.

- República, B. d. (2022). *Informe de la balanza de pagos de Colombia*. Bogotá: Banco de la República.
- RETIE, I. (2023). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. Bogotá, Colombia: ICONTEC. Obtenido de <https://www.icontec.org>
- RETILAP, I. (2023). *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP)*. Bogotá, Colombia: ICONTEC. Obtenido de <https://www.icontec.org>
- Rodríguez, P., & Sánchez, J. (2021). *Diagnóstico del marco regulatorio para combustibles alternativos en Colombia*.
- SAE International. (2018). *SAE J2601: Fueling protocol for light duty gaseous hydrogen surface vehicles*. SAE International. Obtenido de [https://www.sae.org/standards/content/j2601\\_201802/](https://www.sae.org/standards/content/j2601_201802/)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2023). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Obtenido de Boletines de calidad del aire, diciembre 2023: <https://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/180/informes/>
- Sperling, D., & Gordon, D. (2009). *Two billion cars: Driving toward sustainability*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2010). *Foundations of Mixed Methods Research*. Thousand Oaks, CA: SAGE.
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. 305(5686). Obtenido de <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2023). *Informe sobre regulación y oportunidades de hidrógeno verde en Colombia*. Bogotá, Colombia: UPME. Obtenido de <https://www.upme.gov.co/hidrogeno-verde/informe-2023.pdf>
- Unidas, N. (2015). *Acuerdo de París. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*. Naciones Unidas.
- UPME, U. d. (2022). *Hoja de ruta del hidrógeno para Colombia*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co>
- Vásquez, J., & Rodríguez, P. (2021). Hydrogen as an alternative fuel in Latin America: A technological review. (R. Energy, Ed.) 176. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.012>
- Xu, H., Wang, Y., & Li, J. (2021). Hydrogen-powered motorcycles: Feasibility, challenges, and perspectives. (I. J. Energy, Ed.) 46(58). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.101>
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in hydrogen storage technologies. (Energy, Ed.) *Energy*, 35(9), 4368–4384.
- Zhang, X., & Zhao, Y. (2022). Hydrogen mobility in urban transport: A review of challenges and opportunities. (E. Policy, Ed.) 165. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112951>