

Impactos del hidrógeno verde como fuente de energía alternativa en el SITP de  
Bogotá

Daniela Suarez Hernández

Especialización en Gerencia de Proyectos, Universidad EAN

Seminario de Investigación

Lina María Chacón Rivera

Bogotá D.C.

06 de junio de 2023

## Tabla de contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Capítulo 1. Planteamiento del problema y marco teórico .....</b>	<b>5</b>
1.1. <i>Problema de investigación</i> .....	5
1.1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.1.2. Antecedentes .....	5
1.1.3. Descripción del problema.....	7
1.1.4. Pregunta de investigación .....	8
1.2. <i>Objetivos</i> .....	8
1.2.1. Objetivo general .....	8
1.2.2. Objetivos específicos .....	8
1.3. <i>Justificación</i> .....	9
1.4. <i>Marco teórico</i> .....	10
1.4.1. El sistema BRT.....	10
1.4.2. Sistema Integrado de Transporte de Bogotá .....	11
1.4.3. Flota del SITP de Bogotá .....	12
1.4.4. El estado del hidrógeno.....	17
<b>2. Capítulo 2. Metodología de la investigación .....</b>	<b>23</b>
2.1. <i>Enfoque, alcance y diseño de la investigación</i> .....	23
2.2. <i>Definición de variables</i> .....	24
2.3. <i>Población y muestra</i> .....	25
2.4. <i>Métodos e instrumentos para recolección de datos</i> .....	26
2.5. <i>Técnicas de análisis de datos</i> .....	27
<b>3. Análisis y discusión de los resultados .....</b>	<b>28</b>
3.1. <i>Análisis de resultados</i> .....	28
3.1.1. Regulación de los vehículos de tecnología de hidrógeno.....	30
3.1.2. Capacidad del SITP de Bogotá para implementar de vehículos de hidrógeno .	32
3.1.3. Buses articulados de tecnología de hidrógeno verde .....	34
3.2. <i>Discusión de resultados</i> .....	37
<b>4. Conclusiones .....</b>	<b>39</b>

<b>5. Referencias .....</b>	<b>40</b>
-----------------------------	-----------

### Lista de ilustraciones

<b><i>Ilustración 1</i></b> Consumo de energía por energético en el sector transporte .....	6
<b><i>Ilustración 2</i></b> Distribución de consumo energético por medio de transporte .....	7
<b><i>Ilustración 3</i></b> Mapa del sistema TransMilenio .....	11
<b><i>Ilustración 4</i></b> Tipos de vehículos del SITP de Bogotá.....	12
<b><i>Ilustración 5</i></b> Análisis de vehículos del SITP por tipo de motor .....	14
<b><i>Ilustración 6</i></b> Tipos de hidrógeno a partir de su proceso de obtención del recurso.....	18
<b><i>Ilustración 7</i></b> Proyectos de hidrógeno en el mundo .....	19
<b><i>Ilustración 8</i></b> Sistemas BRT en el mundo .....	26
<b><i>Ilustración 9</i></b> Proceso para análisis de datos.....	27
<b><i>Ilustración 10</i></b> Síntesis y puntos claves de la revisión documental .....	29
<b><i>Ilustración 11</i></b> Matriz FODA de la regulación sobre vehículos de H2.....	30
<b><i>Ilustración 12</i></b> Diagrama de Pareto sobre las prioridades de las ciudades con buses de H2 .....	33
<b><i>Ilustración 13</i></b> Mapa de calor de eventos positivos.....	36
<b><i>Ilustración 14</i></b> Mapa de calor de eventos con oportunidad de mejora.....	36

### Lista de tablas

<b><i>Tabla 1</i></b> Clasificación de vehículos del SITP de Bogotá .....	13
<b><i>Tabla 2</i></b> Resumen de la normatividad EURO.....	15
<b><i>Tabla 3</i></b> Normatividad colombiana sobre el H2 .....	22
<b><i>Tabla 4</i></b> Definición de variables de la investigación .....	24
<b><i>Tabla 5</i></b> Listado de las estrategias del hidrógeno .....	28
<b><i>Tabla 6</i></b> Costos promedio de autobuses de H2 verde .....	34
<b><i>Tabla 7</i></b> Matriz de probabilidad / impacto del H2 como fuente de energía en el SITP .....	35

## Resumen

El transporte, tanto a nivel global como a nivel local, es el sector con el mayor consumo de energía, siendo su principal fuente los combustibles fósiles que impactan negativamente al medio ambiente. A razón de ello, se requiere empezar a investigar nuevas alternativas energéticas que permitan mitigar los efectos negativos del sector, como el hidrógeno verde.

El presente trabajo de investigación busca identificar los impactos que tendría el uso del hidrógeno verde en el Sistema Integral de Transporte Público de Bogotá, para lo cual contiene el planteamiento de problema, enfocado mayormente en la representación del transporte público en la matriz energética, el marco teórico, donde se presenta un estudio del sistema BRT, el estado de SITP y la situación actual del hidrógeno, y la metodología de la investigación, la cual se desarrolló a partir de un estudio descriptivo de enfoque mixto que, mediante la recolección de datos a partir de la revisión bibliográfica, pretende obtener los resultados pertinentes a los objetivos planteados, los cuales ayudarán a conocer los efectos del nuevo recurso energético en el SITP de Bogotá, en pro del desarrollo sostenible.

*Palabras claves: Energía, Impactos, Hidrógeno, SITP y Transporte público.*

## **1. Capítulo 1. Planteamiento del problema y marco teórico**

Este capítulo presenta el problema de investigación, conformado por el planteamiento de problema, antecedentes, la descripción del problema, la pregunta de investigación, los objetivos y la justificación, junto con el marco teórico, que brindan una perspectiva del asunto a investigar y los resultados que se esperan obtener con ella.

### **1.1. Problema de investigación**

#### ***1.1.1. Planteamiento del problema***

El transporte es el sector que más crecimiento y desarrollo ha presentado en los últimos años, tanto a nivel global como a nivel local, por lo que se ha convertido en el mayor consumidor de energía en la mayoría de los países. En Colombia, según el Plan Energético Nacional el sector de transporte ocupa cerca del 40% del consumo energético nacional, obteniendo su fuente de poder principalmente de derivados del petróleo, como lo son la gasolina y el diésel (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2020, p.26).

Para contrarrestar el uso de estos combustibles de alto impacto al medio ambiente, las entidades gubernamentales han impulsado la transición energética dentro del sector, mediante el uso de vehículos eléctricos y de gas natural (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2017, p. 48). Sin embargo, estas nuevas tecnologías no han podido reemplazar a las anteriores de combustibles convencionales, por lo cual es requerido el desarrollo de nuevas tecnologías que brinden un mejor apoyo a esta transición, como lo puede ser el hidrógeno verde.

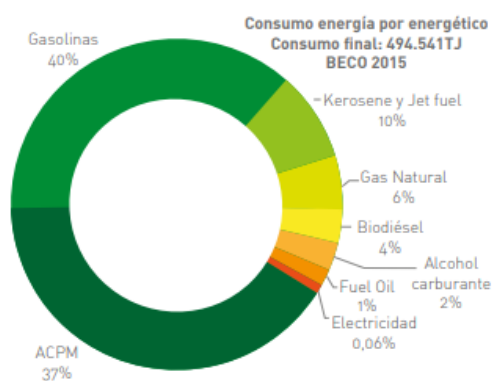
#### ***1.1.2. Antecedentes***

Desde el Acuerdo de París en 2015, todos los países se comprometieron a realizar acciones para mitigar la crisis climática y mejorar la calidad de vida de los seres humanos, mediante el desarrollo sostenible, que se define como “el desarrollo capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (“La Agenda para el Desarrollo Sostenible”, s.f.). Para ello se aprobaron 17 objetivos a cumplir para el 2030, los cuales varían entre educación, calidad de vida, gestión ambiental, entre otros, que están relacionados entre sí para enfrentar los desafíos globales actuales. Entre ellos se encuentra el Objetivo 7 que busca “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” (“Objetivo 7”, s.f.), con el fin de que todas las comunidades y sectores puedan acceder a la energía, primordialmente a aquella producida por energías alternativas.

A pesar de demostrarse avances de las energías alternativas en el sector de producción de energía eléctrica, los sectores de la calefacción y el transporte, que representan en conjunto el 80% del uso final de energía a nivel mundial, presentan un escenario desalentador debido a que aún no han utilizado todo su potencial para desligarse de las fuentes convencionales y transitar hacia las fuentes renovables. En cifras, entre el 2010 y el 2017, el uso de fuentes renovables solo presentó un incremento de 0,8 puntos en términos de transporte. Por ello, se espera que el alto avance tecnológico permita implementar este tipo de fuentes sin afectar la funcionalidad de los dos sectores, especialmente el de transporte. (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2020, p.39).

Semejante a los demás países, en Colombia, el sector de transporte es el mayor consumidor de energía final, puesto que acorde con el Ministerio de Minas y Energías [MinMinas] (2016), este sector ocupa un 40,2%, equivalente a 495.512 TJ, del total de la matriz de consumo de energía nacional (p. 16). El sector se clasifica por subsectores, del cual, el más amplio es el de vehículos privados interurbanos y urbanos equivalentes a un 41%, y los vehículos públicos interurbanos y urbanos con un 22%. Entre los medios de transporte que ocupan el sector, se destaca negativamente, el alto consumo de los energéticos convencionales como lo son la gasolina con el 40%, el ACPM con el 37%, seguidos por queroseno, gas natural, biodiésel, alcohol carburante, Fuel Oil, y por últimos la electricidad, con un leve 0,06% (pp.17-18), como se puede evidenciar en la ilustración 1.

**Ilustración 1** Consumo de energía por energético en el sector transporte



*Nota.* Tomado de MinMinas, 2016, p. 18. [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf). Dominio público.

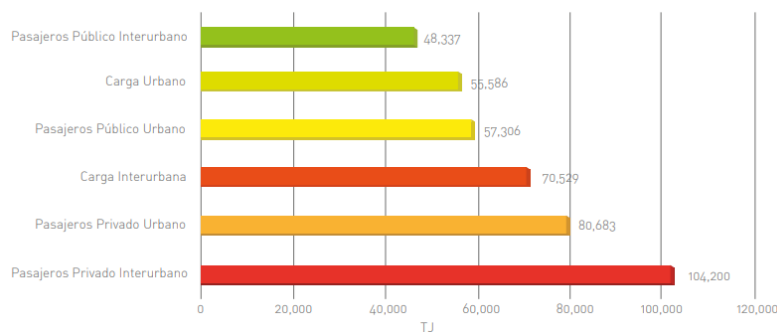
Cabe resaltar que el alto consumo de la gasolina y el diésel para la operación del transporte en Colombia, especialmente por el transporte público en las ciudades como

Bogotá, han producido un impacto negativo en la calidad del aire por la emisión de contaminantes como polvo, hollín, y especialmente 1.4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, que han afectado gravemente la salud de los ciudadanos en términos respiratorios. Para ello, las entidades gubernamentales de cada ciudad han desarrollado proyectos de I+D que promueven la disminución de contaminantes por medio de filtros de partículas y el uso de vehículos de gas natural, eléctricos e híbridos, como el Sistema Integrado de Transporte de Bogotá, en adelante SITP, que se encuentra en proyectos de exploración e implementación de nuevas tecnologías, mitigar los impactos a la salud y el ambiente, y al mismo tiempo, mejorar la calidad de su servicio. (Observatorio ambiental de Bogotá, 2014).

### 1.1.3. Descripción del problema

En Colombia, el alto consumo de energía final de parte del sector transporte es alarmante. Para el 2015, el modo de transporte de carretera se convirtió en el mayor consumidor de energía, ocupando un 88% de la matriz de distribución de consumos con 434.459 TJ. De este porcentaje, el mayor consumidor es el transporte de pasajeros privado, mientras que el público urbano se encuentra en una posición que demuestra su esfuerzo para operar con alta eficiencia energética, mediante la sustitución de forma moderada del uso de tecnologías convencionales por modernas como las de gas natural, que emite menor cantidad de emisiones que las fuentes del petróleo (MinMinas, 2016, pp. 18-19), como se evidencia en la ilustración 2.

**Ilustración 2** Distribución de consumo energético por medio de transporte



*Nota.* Tomado de MinMinas, 2016, p.19. [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf). Dominio público.

En un escenario negativo, de no haber entrado en este proceso de descarbonización y modernización, el sistema público de transporte presentaría una baja calidad del servicio en términos de organización y seguridad, además de que sus altas emisiones afectarían la salud de los ciudadanos de la zona, e impactaría gravemente la atmósfera por ejemplo, las

alzas de emisiones a nivel global sin un control, pueden causar el incremento de la temperatura de la tierra un 2°C, incumpliendo el Acuerdo de París (Foster y Elzinga, s.f.).

Por ello, se celebran los esfuerzos del sector transporte para cambiar su forma de energizarse, debido a que presenta buenos resultados en un escenario óptimo. Por otro lado, para mantener este escenario, se busca incentivar el uso de las fuentes energéticas ya desarrolladas, y buscar un mayor avance y medidas de mejora en ellas para limitar las desventajas que poseen. A su vez, se promueve la investigación y desarrollo para la descarbonización del sector mediante otras fuentes de energía, como el hidrógeno, el cual puede actuar como sustituto de las fuentes de energía convencional, sin afectar la operatividad de la tecnología a un bajo costo. (Hinicio, 2021, p. 7)

A razón de esta problemática se realizará la presente investigación, que corresponde a un estudio descriptivo, en el cual se referirán las características y propiedades específicas de la situación del SITP de Bogotá, soportada principalmente por métodos subjetivos como revisión documental y observación, y servirá como base para investigaciones futuras con el fin de promover el desarrollo de prototipos (Bernal, 2010, p.113). Este tipo de investigación busca obtener y recolectar información sobre las variables a describir, mostrando con alta precisión las dimensiones del contexto en el que se encuentra la problemática (Hernández y Mendoza, 2018, p.108).

#### **1.1.4. Pregunta de investigación**

¿Cuáles son los impactos que tendría el uso del hidrógeno verde como fuente alternativa de energía en el Sistema Integrado de Transporte de Bogotá?

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo general**

Identificar los impactos que generaría el uso del hidrógeno verde como fuente alternativa de energía en el Sistema Integrado de Transporte de Bogotá.

#### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Detallar la información recolectada sobre el estado del sector de transporte y las fuentes energéticas utilizadas en el transporte público SITP de Bogotá D.C.
- Analizar el término del hidrógeno verde respecto a las ventajas y desventajas de su implementación en el sector del transporte público, a nivel global y local.
- Categorizar los efectos que tendría el hidrógeno verde como fuente de energía en el SITP de Bogotá D.C. por niveles de impacto.

### 1.3. Justificación

A partir de la situación actual frente al cambio climático y las acciones para mitigar su impacto en las generaciones presentes y futuras, se promueve la investigación y el desarrollo de la sostenibilidad, en aquellos sectores que tienen un menor avance a pesar de la tecnología actual, como el sector de transporte, que tiene altos consumos de energía que no se han podido suplir con las energías alternativas conocidas, por lo cual se hace necesario la exploración de otras fuentes, como el hidrógeno verde, que contribuyan a la transición del sector.

Por ello la presente investigación se justifica en cinco aspectos. Primero, que según su conveniencia, este estudio busca identificar los impactos, positivos y negativos, que tendría la implementación del hidrógeno verde en el sector de transporte público, especialmente en el SITP de Bogotá, en pro del desarrollo sostenible obteniendo, como segundo aspecto, una relevancia social en aquellos que sean participantes en procesos I+D del hidrógeno verde y aquellos que busquen un transporte público más sostenible, que mediante los resultados obtenidos, se favorecerán con nuevos conocimientos que les permitirá tener en cuenta diferentes atributos para desarrollar sus respectivos objetivos en la materia.

Por otro lado, la investigación cuenta con un valor teórico, el tercer aspecto, justificado al realizar un análisis más profundo del concepto y su uso en el transporte público, generando una visión crítica mediante la revisión de la literatura, que se espera funcione como base de futuras investigaciones que tengan por objetivo realizar prototipos y experimentos, e incentiven el uso de esta fuente alternativa en el transporte público, sea de Bogotá, o ampliándolo a otros sistemas públicos de transporte empleados en otros territorios de Colombia o el mundo.

De igual manera, cuenta con un cuarto aspecto que hace referencia a la utilidad metodológica al hacer uso de instrumentos para la recolección de datos que serán analizados a través de un proceso de validez con el fin de obtener resultados más confiables, los cuales le permitirán a la investigación tener una implicación práctica, el quinto aspecto, al proporcionar información útil y certera que sirva como guía en futuras investigaciones para conocer los efectos del hidrógeno verde en el sector y la probabilidad que tienen de ocurrir, e impactar de forma negativa o positiva, y como abordarlos.

Por último, este análisis hace parte del campo de investigación de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad EAN. Dentro del campo hacer parte del grupo de Gestión ambiental, debido a que una de las razones para investigar el estado del hidrógeno y los impactos de su implementación es el objetivo global de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen del sector transporte. La línea de investigación que sigue el estudio es de Gestión de recursos naturales y energía, considerando que el hidrógeno es un recurso que se puede obtener por diversos procesos para transformarlo en combustibles que energizan una tecnología.

#### **1.4. Marco teórico**

##### **1.4.1. El sistema BRT**

El transporte tiene por objetivo movilizar a las personas y objetos de un lugar a otro, satisfaciendo la necesidad humana de la interacción y el intercambio de información (Banco Mundial, s.f.). Para realizar esta actividad de la manera más óptima posible se desarrollaron distintos tipos de medios de transporte como el tranvía, el metro y los autobuses.

Los autobuses presentaron una gran ventaja frente a los demás medios debido a su flexibilidad y adaptabilidad acorde a la necesidad que se tiene en cada comunidad, además de facilitar la integración con otros medios como los taxis o el mismo metro (Unión Internacional de Transporte Público [UITP] et al., 2019, p.3). Para agilizar el proceso de los autobuses, se diseñó el sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) en el cual se les otorga una vía única para moverse, mediante un autobús articulado, con ruta extendidas a lo largo de las ciudades, como Seúl, capital de Corea del Sur, Amán, capital de Jordania y las ciudades principales de Colombia (Vanek et al., 2014).

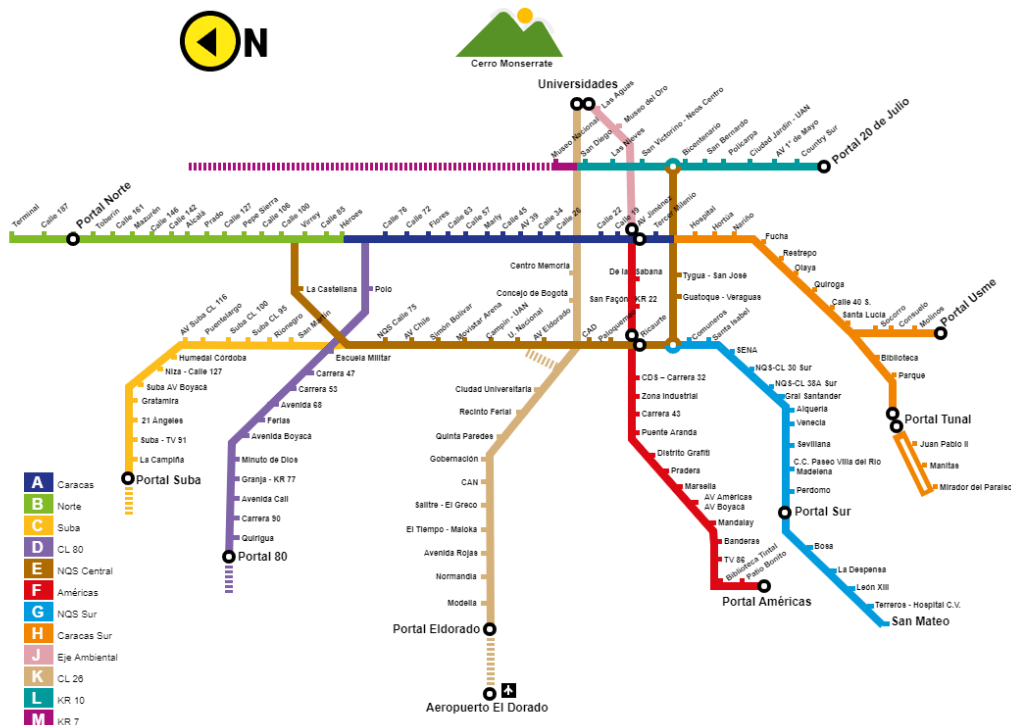
En Colombia, acorde con el Ministerio de Transporte (2021), el sistema BRT fue el sistema escogido para desarrollar los modos de transporte público en las ciudades, sin embargo, su implementación ha sido un proceso largo debido a situaciones políticas en cada ciudad. Actualmente existen siete (7) sistemas que se integran con otros medios de transporte, como el metro en Medellín, el TransMiCable en Bogotá, y las líneas de taxis, y que se encargan del transporte de una gran cantidad de usuarios en las ciudades principales. Estos son TransMilenio en Bogotá D.C., Transmetro en Barranquilla, Atlántico, Metrolínea en Bucaramanga, Santander, Megabús en Pereira y periferias, Risaralda, Metroplús en Medellín y alrededores, Antioquia, MIO en Cali, Valle del Cauca, y Transcribe en Cartagena, Bolívar

### 1.4.2. Sistema Integrado de Transporte de Bogotá

El sistema de transporte público de Bogotá, antes de la implementación del sistema BRT, era arcaico y deficiente, lo que hacía que la movilización por las vías fuera caótica, y afectará la salud de los pasajeros por hacinamiento. Estos factores, junto a la alta cantidad de vehículos informales hizo necesario desarrollar un mejor sistema de transporte para responder ante las necesidades del nuevo siglo. En un principio la solución fue un metro, sin embargo, la situación política de la ciudad no contribuyó al avance, y en cambio permitió el desarrollo del sistema BRT, denominado TransMilenio (Sanín, 2008, p. 508).

TransMilenio, fue inaugurado el 18 de diciembre del año 2000, durante la primera alcaldía de Enrique Peñalosa, a partir de inversión privada. Este sistema inició operación con 14 buses que se movilizaban por la Avenida Caracas, y posteriormente se fue ampliando con troncales como Autopista Norte, Calle 80, Avenida Suba, NQS y Avenida el Dorado. Actualmente, TransMilenio se conforma de 115,1 km, con 12 troncales en operación y 9 plataformas principales (Torres, 2020), como se evidencia en la ilustración 3.

**Ilustración 3** Mapa del sistema TransMilenio



*Nota.* Mapa del sistema de transporte BRT TransMilenio de Bogotá D.C. Tomado de Quintero, 2022.

<https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150402/publicacionesmapa-interactivo-de-transmilenio/>. Dominio público.

Posteriormente, debido a deficiencias en el sistema, como la limitación de cobertura, los tiempos largos de transporte y el aumento de la población, TransMilenio fue complementado con buses urbanos tradicionales en las vías generales, como alimentadores que transportan personas de los portales a puntos específicos, y la ampliación de las troncales, conformando así, el Sistema Integral de Transporte Público de Bogotá, más conocido como SITP (“¿Qué es SITP?”, 2016). En la ilustración 4 se puede visualizar los tipos de vehículo que conforman el SITP de Bogotá.

#### Ilustración 4 Tipos de vehículos del SITP de Bogotá



*Nota.* Vehículos que utiliza el SITP de Bogotá D.C. para el transporte de pasajeros Tomado de “El SITP organiza a Bogotá en zonas”, 2019. <https://www.sitp.gov.co/publicaciones/40076/mapas-del-sitp/> Dominio público.



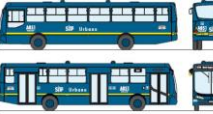





#### 1.4.3. Flota del SITP de Bogotá

La flota de vehículos fue clasificada a partir de sus características, que cumplen con la Resolución 7126 de 1995, en la cual se definen las características técnicas y de seguridad que debe cumplir los sistemas de transporte público, según las emisiones de gases de efecto invernadero que generan, el tamaño del vehículo y su operación; sea especial, es decir, aquellos vehículos que transportan pasajeros únicamente sentados, o colectivo, que permite pasajeros tanto sentados como de pie (AutoCrash, 2016). Por otro lado, la Norma Técnica Colombiana [NTC] 5206 (2009, p.13) también clasifica este tipo de vehículos de servicio público respecto a las áreas de operación, en las siguientes clases:

- i. Clase I. Vehículos Tipo A para prestar el servicio público colectivo dentro del área urbana (distrital y municipal)
- ii. Clase II. Vehículos para prestar el servicio público colectivo dentro del territorio nacional
- iii. Clase III. Vehículos para prestar el servicio público especial (interurbano y/o turístico) dentro del territorio nacional

A razón de esta investigación, la flota de SITP se clasificó según el tipo de medio, que son urbanos, complementario, alimentadores y el sistema BRT, que se distinguen a través de una serie de colores, y a su vez presentan características como su tipo de operación, tipo de vehículo, función y capacidad de pasajeros. Esto se puede visualizar en la tabla 1 presentada a continuación.

**Tabla 1** Clasificación de vehículos del SITP de Bogotá

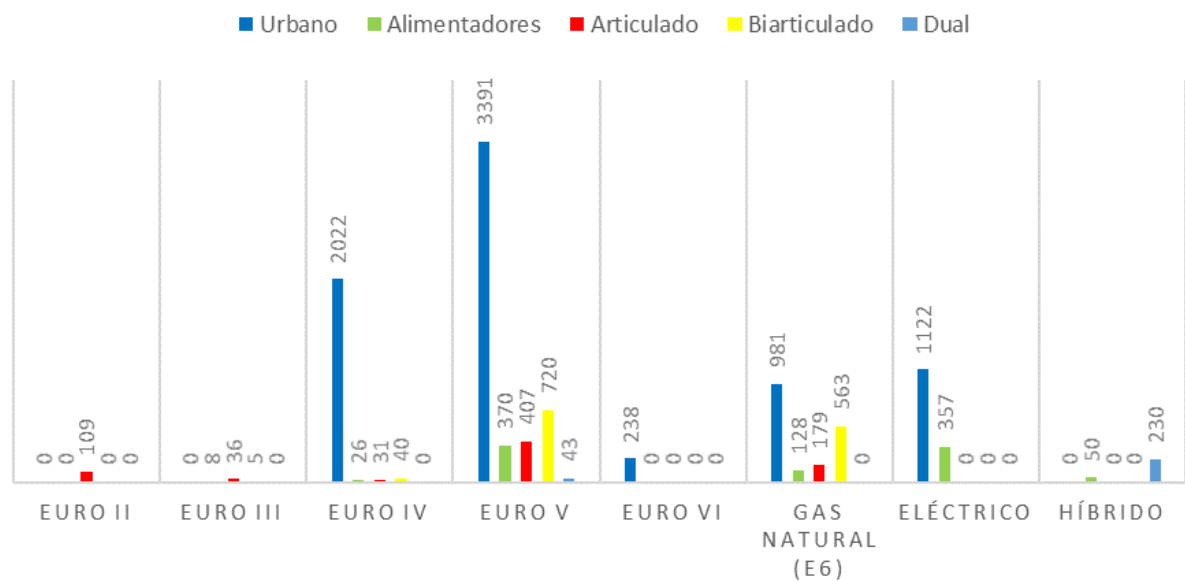
Clasificación	Distintivo	Tipo de vehículo	Referencia	Función	Capacidad
Urbano	Color azul Amarillos (Gas natural) Verde (Eléctrico)	Microbuses		Transporte urbano a corta distancia	10 a 19 pasajeros
		Busetas		Transporte urbano e interurbano	20 a 40 pasajeros
		Bus		Transporte urbano de alta capacidad	80 pasajeros
Complementario	Naranja	Bus		Transporte urbano que transita solo por una zona específica	Entre 50 a 80 pasajeros
Alimentador	Azul (Anteriormente verde)	Alimentador		Transporte de pasajeros de subrutas (Alimentadores)	Más de 80 pasajeros
BTR	Rojo	Articulado		Transporte masivo de larga distancia	160 pasajeros
	Rojo con amarillo	Biarticulado		Transporte masivo de larga distancia	250 a 270 pasajeros
	Rojo con gris	Dual		Transporte masivo de larga distancia (Carrera Septima)	Más de 80 pasajeros

*Nota.* Elaboración propia acerca de los tipos de vehículos que tiene el SITP de Bogotá. Información obtenida de TransMilenio, 2019. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151051/buses-de-transmilenio/>

### Vehículos de combustibles fósiles

A razón de la presente investigación, la flota del SITP de Bogotá también se clasificó a partir de la tecnología que le da la energía para poder operar. La flota, mayormente, se compone de vehículos con motores diésel y de gasolina EURO II, III, IV, V y VI, motores de gas natural EURO VI, motores eléctricos y vehículos híbridos que cuenta con motores eléctrico y diésel EURO V (Transmilenio S.A., 2023), como se muestra en la ilustración 5.

**Ilustración 5** Análisis de vehículos del SITP por tipo de motor



*Nota.* Elaboración propia a partir de información de TransMilenio S.A. acerca de los tipos de tecnologías que tiene el SITP de Bogotá en 2023. Información obtenida de TransMilenio S.A., 2023. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/organization/transmilenio>. Dominio público.

El término EURO, se refiere a la normativa de la Unión Europea, que fue adoptada por varios países y fabricantes de vehículos, que tiene por objetivo regular los valores límites de las emisiones de gases contaminantes que salen por el tubo de escape de los vehículos con motores de gasolina o diésel. (“¿Qué es la normativa EURO 6?”, 2020). Las emisiones de gases producto de la combustión interna de los motores que busca mitigar la regulación son: óxidos de nitrógeno (NOx), monóxidos de carbono (CO), hidrocarburos y materia particulada conocida como PM, con el fin de mejorar la calidad del aire del espacio donde se movilizan los vehículos. (Sánchez – Hernández, s.f., pp.48-49)

Actualmente, la última norma publicada es la EURO VI (6), la cual rige por el momento el sector automotriz. A continuación, se presenta un resumen de las normativas EURO discriminadas por motores diésel y de gasolina, como se puede ver en la tabla 2.

**Tabla 2** Resumen de la normatividad EURO

Norma	Entrada en vigor	CO (g/km)	HCT (g/km)	HCT + NOx(g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
<b>Motor diésel</b>						
Euro I (1)	1/07/1992	2,72		0,97		0,14
Euro II (2)	1/01/1996	1,0		0,7		0,08
Euro III (3)	1/01/2000	1,0		0,56	0,5	0,05
Euro IV (4)	1/01/2005	0,64		0,3	0,25	0,025
Euro V (5)	1/09/2009	0,50		0,23	0,18	0,005
Euro VI (6)*	1/01/2013	1,50	0,13		0,4	0,01
<b>Motor gasolina</b>						
Euro I (1)	1/07/1992	2,72		0,97		
Euro II (2)	1/01/1996	2,20		0,5		
Euro III (3)	1/01/2000	2,30	0,20		0,15	
Euro IV (4)	1/01/2005	1,00	0,10		0,08	
Euro V (5)	1/09/2009	1,00	0,10		0,06	0,005
Euro VI (6)*	1/01/2013	1,50	0,13		0,4	0,01

*Nota.* Resumen de la normativa EURO de la UE y acerca de los límites de emisiones de contaminantes según los motores de cada vehículo. Adaptada de Sánchez-Hernández, s.f., p.51.

Las normas EURO dan a entender que tanto ha avanzado la tecnología para mitigar los impactos al ambiente de la emisión de contaminantes provenientes del proceso de combustión del vehículo, al igual que indica que los motores de diésel son más amigables con el ambiente frente a los motores de gasolina que son plenamente contaminantes.

Por su parte, el SITP ha realizado un proceso de inversiones para sustituir la tecnología más antigua (EURO II) por una más moderna (EURO VI). En 2023, aún SITP cuenta con 109 articulados de EURO II que están en proceso de ser sustituidos por vehículos de gas natural. Adicionalmente, cuenta con 49 vehículos EURO III, mayormente articulados, y 2.119 de EURO IV, principalmente urbanos, que entrarán en proceso de reciclaje para dar ingreso a los vehículos de última tecnología (TransMilenio, 2023).

Para el 2018, TransMilenio adquirió 1.441 buses de los cuales 700 son de motores diésel EURO V con filtro, de ellos 298 eran articulados y 402 biarticulados, el resto de gas natural. Con estas inversiones se buscó reducir en un 95% las emisiones de gases de combustión (“Nueva flota de TransMilenio es en su mayoría de gas”, 2018). Además, esta nueva flota se unió a los nuevos vehículos EURO VI, de último avance en temas de mitigación de emisiones, compuesta por 238 buses urbanos (TransMilenio, 2023)

### **Vehículos de gas natural**

En los últimos años, el gas natural se ha convertido en el energético con mejor desempeño para sustituir a los derivados del petróleo, por ello la mayoría de las inversiones que ha hecho SITP para adquirir nuevos vehículos ha sido para la tecnología de motores de gas natural. En el 2018, SITP empezó a contar con 741 buses de gas natural con emisiones EURO VI, de los cuales 179 son articulados y 562 biarticulados, con los objetivos de mitigar los impactos al medio ambiente y mejorar el servicio prestado (“Nueva flota de TransMilenio es en su mayoría de gas”, 2018). La idea de esta inversión es que, al completar la flota de 1.441 buses de nueva tecnología, que se estima sea para el 2023, el sistema de TransMilenio pase de generar 1,8% de material particulado (PM) a 0,4% acorde, a la EURO VI (Oficina de prensa de TransMilenio, 2020).

Por otro lado, la flota de buses urbanos y alimentadores se componen de 518 vehículos con motores de gas natural con el fin de contribuir a la causa de la mitigación de emisiones. Para suplir la necesidad energética de estos nuevos vehículos, se han realizado proyectos de construcción de mega estaciones de servicio (EDS) en diferentes zonas de la ciudad. Estas EDS son administradas por Vanti, la empresa proveedora de gas natural en Bogotá, quien recibió el Premio de la Eficiencia Energética en Colombia, de parte de Andesco y MinMinas, por su proyecto en temas de Movilidad Sostenible que permite potencializar la tecnología EURO VI (Andesco, 2021) y se espera que a razón del crecimiento de la flota tanto del SITP se desarrollen más proyectos de abastecimiento de gas natural.

### **Vehículos eléctricos**

A partir de 2020, se empezó a promover el uso de buses eléctricos en la flota de SITP, especialmente en los vehículos urbanos, mediante la entrada de operación de 13 buses de motor eléctrico en el sur de Bogotá. La ciudad planea contar con la flota de vehículos de transporte público más grande, tanto de Colombia como del mundo, después de China (“¡Bienvenida! La primera flota de buses eléctricos en Bogotá”, 2020). La idea de implementar este tipo de tecnología es que se presenten mejoras en la calidad del aire, evitando la emisión de 2,6 toneladas (ton) al año de PM y de 13.100 ton de CO<sub>2</sub>, al ser un vehículo cero emisiones durante su operación. En este caso, para el sistema de recarga, son las empresas TERPEL y Enel X, línea de Enel-Codensa para movilidad eléctrica, quienes ha realizado las inversiones para las subestaciones eléctricas con cargadores de 180 kW (Ramírez, 2021)

Al evidenciar el éxito de la tecnología eléctrica, el SITP busca tener una flota de 1.485 vehículos de este tipo, de los cuales en el inicio de 2022 entraron en marcha 172 buses a lo largo de la ciudad que, según Claudia López, alcaldesa de Bogotá, equivalen a la siembra de 148.000 árboles para capturar CO<sub>2</sub>. En febrero de 2022, entraron en operación otros 655 buses eléctricos en las localidades de Chapinero, Suba y Rafael Uribe (“Para finales de este año, Bogotá tendrá la flota eléctrica más grande del mundo, superada solo por China”, 2022). Finalmente, en marzo de 2022, entraron en operación 406 buses de esta tecnología en las localidades del sur de Bogotá, que llegan a operar en rutas nuevas y a reemplazar los buses más antiguos de la flota, que son EURO II (Sánchez, 2022).

Para la meta de 1.485 vehículos eléctricos, solo quedan faltando la entrada en operación de seis buses puesto que, para febrero de 2023, se completó la puesta en marcha de 1.479 buses, especialmente urbanos y alimentadores (TransMilenio S.A., 2023). El éxito en estos buses es notable y denota la falencia en el sistema BTR, el cual no ha podido implementar este tipo de vehículos porque su diseño, con baterías, supera el peso exigido por la norma NTC 4901, que regula las dimensiones y pesos de este tipo de buses. La empresa BYD que fabricó el biarticulado eléctrico en 2022 está a la espera de una solución en la normatividad para poner en marcha este transporte, sin embargo, aún no se han presentado avances (Guglielmetti, 2022).

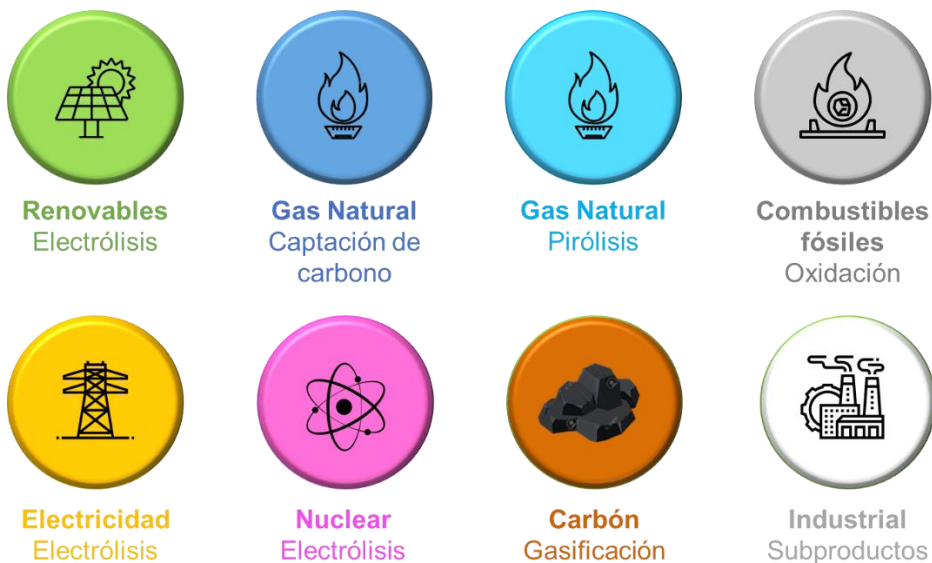
#### **1.4.4. El estado del hidrógeno**

Debido al cambio climático se ha impulsado la investigación de nuevas fuentes de energía alternativas que permitan suplir las necesidades energéticas de la humanidad sin afectar a las generaciones futuras. Por ello, la identificación del hidrógeno como fuente de energía en los últimos años ha presentado un estatus de certeza de poder contar con una fuente limpia debido a que, al reaccionar con el oxígeno en un proceso de combustión a 1.500 °C, su residuo sea agua. (Torres y García, 2022)

Según TÜV SÜD (s.f.) existen distintos tipos de extracción del hidrógeno, los cuales han sido clasificados por colores a partir de su método de producción, como el hidrógeno verde, que se produce mediante electrólisis a partir de fuentes renovables, o el hidrógeno azul que se genera a través de un proceso de captación de carbono a partir del gas natural. Los tipos de hidrógeno y su origen se detallan en la ilustración 6.

**Ilustración 6** Tipos de hidrógeno a partir de su proceso de obtención del recurso

### Tipos de hidrógeno a partir de su origen



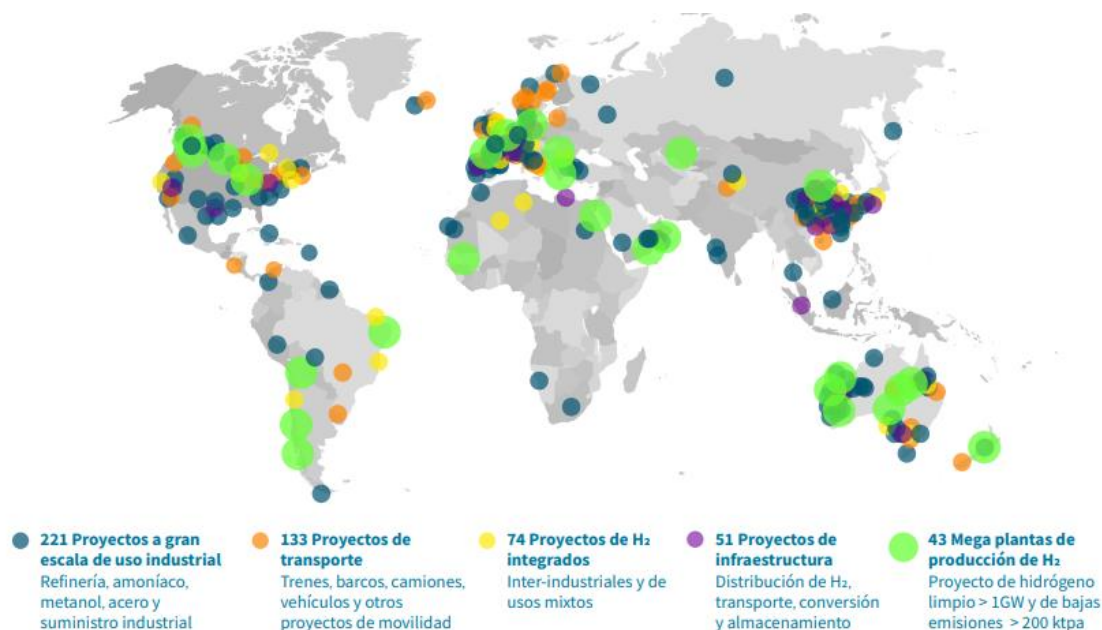
*Nota.* Elaboración propia adaptada de H2Lac sobre los tipos de hidrógeno que se pueden generar a partir de la serie de procesos definidos en la Ilustración. Terzaghi, 2022, <https://h2lac.org/noticias/como-es-el-negocio-del-hidrogeno-y-por-que-argentina-es-una-plaza-clave/> Dominio público.

El hidrógeno verde, al ser el que menos afectaciones tiene al ambiente, lo convierte en el más relevante de investigar y desarrollar para su implementación en distintos sectores, entre ellos el de transporte. Su cadena de valor, se compone de la generación del energético a partir de fuentes no convencionales de energía, el almacenamiento, el transporte y su uso final como combustible para vehículos, camiones, buses, trenes, barcos y aviones (Diazgranados et al., 2022, p. 8). A su vez, promoverá el desarrollo e implementación de este recurso, e incrementará la creación de empleo en la zona y la recuperación del medio ambiente. Acorde a los avances que ha tenido el uso del hidrógeno se ha podido determinar que un kilo de hidrógeno verde tiene un costo de 5 a 10 dólares, según la escala y la ubicación del desarrollo (Terzaghi, 2022).

Por estas razones, los proyectos de producción de hidrógeno se han incrementado a gran escala, especialmente para el sector industrial como refinerías e industrias de acero y amoniacos, y de transporte como barcos, camiones y vehículos. Adicionalmente, se recalca la gran participación de Asia oriental y Europa, además de la presencia de países

de Latinoamérica con un importante desarrollo de proyectos con este energético, donde se destacan principalmente Chile, Colombia, Brasil y Costa Rica (Diazgranados et al., 2022, p. 13). La ilustración 7 muestra los proyectos en desarrollo en el mundo del hidrógeno.

### Ilustración 7 Proyectos de hidrógeno en el mundo



*Nota.* Proyectos en proceso de desarrollo a nivel global con información obtenida de IRENA (2022). Tomada de Hinicio, 2022. [https://hinicio.com/wp-content/uploads/2022/09/Infografia\\_Estado-H2-Verde-LAC\\_2022\\_GIZ\\_Hinicio\\_vf.pdf](https://hinicio.com/wp-content/uploads/2022/09/Infografia_Estado-H2-Verde-LAC_2022_GIZ_Hinicio_vf.pdf). Dominio público.

Acorde a la Agencia Internacional de Energías Renovables [IRENA] (2022), varios países han realizado avances para liderar la tecnología del hidrógeno verde, para lo cual han creado políticas nacionales y/o estrategias, con el fin de realzar el interés en promover y desarrollar este energético dentro de los sectores de sus sectores de mercado de cada uno de ellos (p.39). Entre ellos se encuentra Japón que fue el primer país en adoptar una estrategia nacional del hidrógeno, publicada en 2017, presentando las inversiones que el gobierno hará para el avance de tecnología e infraestructura del hidrógeno como en 2020 que invirtieron 670 millones de dólares para la fabricación y comercialización de celdas de hidrógeno para vehículos (FCEV – Full Cell Electric Vehicle) (p.41).

China, por su parte, se ha convertido en el más grande productor y consumidor de hidrógeno en el mundo con más de 24 millones de toneladas de hidrógeno generado. Desde su estrategia del hidrógeno, publicada en 2019, cuenta con 30 proyectos de H<sub>2</sub> verde en operación y ocupa el energético principalmente para transporte. Como consumidor y

productor de hidrógeno en el mundo le sigue Estados Unidos, que hasta 2020 tenía el mercado más grande de FCEV. Esta nación ha invertido 9.5 billones de dólares para el desarrollo de esta tecnología a gran escala, que a su vez le apoya con la meta de reducir el costo del hidrógeno a un dólar por kilogramo en una década. (IRENA, 2022, pp. 40-41).

Por otra parte, la Unión Europea lanzó su estrategia en julio de 2020, priorizando al hidrógeno como una meta para el Acuerdo Verde Europeo. Al igual que el de los demás países, se enfoca mayormente en el hidrógeno verde, con proyectos como la instalación de 40 gigavatios (GW) de energías renovables para los electrolizadores que serán utilizados en la producción del hidrógeno, aspirando en ser el líder del hidrógeno en el sector industrial. Por último, se encuentra India, con su Misión Nacional de Hidrógeno publicada en agosto de 2021, que tiene por objetivo ser el centro logístico global de la producción y exportación del hidrógeno verde, promueve en el sector de las refinerías y de fertilizantes la implementación de este tipo de hidrógeno (IRENA, 2022, p.40)

En Latinoamérica, son 13 los países que han impulsado la investigación e implementación del hidrógeno. A nivel LATAM, hay 12 proyectos operacionales y más de 50 en desarrollo. La mayoría de ellos cuentan con estrategia nacional u hojas de ruta del hidrógeno, especialmente el verde, con el fin de utilizarlo en el sector industrial y minero, priorizando a las refinerías, en el de transporte, especialmente el terrestre y el marítimo, y como fuente para la generación de electricidad y producto de exportación (Diazgranados et al., 2022, pp. 15-16).

Chile, fue el primer país en pensar en el hidrógeno como sustituto de los combustibles convencionales, y a su vez lidera la producción de hidrógeno en Latinoamérica, implementó este recurso energético principalmente en el sector transporte para movilizar pasajeros y cargas pesadas, esto mediante vehículos con tecnología de celdas de combustibles. La flota vehicular de hidrógeno que plantean desarrollar se conforma principalmente de vehículos ligeros, camiones, buses, ferroviarios y transporte marítimo de carga. Adicionalmente también busca implementarlo para la re-electrificación como almacenamiento energético y cogeneración, y materia prima para la industria química y la generación de calor (Ziehe, et al. 2021, p.12)

Por su parte, Colombia no se queda atrás. MinMinas en 2021, apoyado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el gobierno del Reino Unido, presentó la Hoja de ruta del hidrógeno, que tiene por objetivo “contribuir al desarrollo e implementación del

hidrógeno de bajas emisiones en Colombia reforzando así el compromiso del Gobierno con la reducción de emisiones estipulada en los objetivos del Acuerdo de París del 2015.” (MinMinas, 2021, p.13). El país busca implementar este energético para reemplazar el uso de materias primas y combustibles de orígenes fósiles, principalmente en la industria del sector industrial, en el sector transporte y en el sector energético para la generación de electricidad (p.13).

En el sector del transporte, se espera que el hidrógeno sea la alternativa para sustituir los combustibles derivados del petróleo, obteniendo beneficios en cuanto a la casi nula emisión de gases de efecto invernadero de los vehículos y ventajas técnicas como la autonomía y los tiempos de recarga, que presentan mejores resultados que los comparados con los vehículos eléctricos que cuentan con baterías. Para ello se espera que a partir del 2026 se presente una demanda pequeña en el transporte por carretera pesado que incluya los autobuses y camiones de carga, que a su vez impulsen los proyectos piloto e implementación final en el sector, especialmente en busca de la descarbonización del transporte público (MinMinas, 2021, p.7-p.21).

Por otro lado, también se espera la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, proveniente de las tres industrias, en pro de moderar los impactos al ambiente y mejorar la calidad de vida de los colombianos. A 2050, en el sector de transporte, esta hoja de ruta supone que se abatirán el 70%, especialmente mediante el transporte área, con el control de 5.050 kt de CO<sub>2</sub> y en el transporte terrestre de vehículos pesados, con la mitigación de 4.100 kt de CO<sub>2</sub>. En el sector industrial del proceso de refinación se espera alcanzar a abatir 1.700 kt de CO<sub>2</sub> y en el de generación eléctrica se espera mitigar 13.200 kt por año (MinMinas, 2021, p. 22)

Dentro de las metas, también se encuentra el desarrollo de 1 a 3 GW de energías renovables, en áreas como La Guajira, para el proceso de electrólisis, que servirá para lograr un precio competitivo para el ingreso al mercado de la exportación de hidrógeno verde con costos de 1,7 dólares por kilogramo. En términos de transporte, busca contar con una flota de 1.500 a 2.000 vehículos ligeros y 1.000 a 1.500 vehículos pesados para transporte de pasajeros y carga, de pila de combustible de hidrógeno (MinMinas, 2021, p. 26).

Acorde a la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (Rodríguez et al., 2019, pp.20-21), entre los vehículos pesados de transporte de pasajeros, se tienen metas para la

implementación de proyectos pilotos que permita incentivar la renovación de la flota a vehículos de FCVE, además de la creación de una política nacional para vehículos eléctricos del transporte público y el reciclaje de aquellos que saldrán de operación, con el fin de que entre el 2031 y el 2050, este tipos de vehículos tengan el mayor porcentaje de participación en la flota nacional (pp. 20-21). Para lo cual también es importante regular la normatividad del sector, invertir en infraestructura y promover el ascenso tecnológico en el transporte público de las ciudades (pp. 62-63).

Por el momento, Colombia cuenta con una serie de regulaciones, que evidencian el trabajo de las entidades gubernamentales para impulsar el hidrógeno, por medio de incentivos tributarios como la deducción del impuesto sobre la renta hasta un 50% del valor total de la inversión realizada, exclusión de IVA de bienes y servicios de la gestión energética, depreciación acelerada no mayor a 33,33% y la exención de aranceles (Resolución 2099, 2021). A continuación, se puede visualizar la normativa vigente que soporta el uso del hidrógeno en Colombia en la tabla 3.

**Tabla 3** Normatividad colombiana sobre el H2

Ley	¿Qué define?
<b>Ley 1964 de 2019</b>	Los vehículos de H2 serán clasificados como vehículos eléctricos
<b>Ley 2099 de 2021</b>	Determinar al H2 verde como fuente no convencional de energía renovables (FNCER)
	Definición de los incentivos tributarios a los que pueden aplicar los proyectos H2
<b>Decreto 895 de 2022</b>	Acceso a beneficios tributarios para proyectos de H2
<b>Decreto 1476 de 2022</b>	Promoción de la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del H2

*Nota.* Resumen de la legislación colombiana sobre el hidrógeno verde. Adaptado de Diazgranados et al., 2022, p.17. <https://n9.cl/8doah>

Cabe recalcar que los vehículos de hidrógeno funcionan a partir de una pila de combustibles (FCEV), en la cual el hidrógeno pasará por un proceso de oxidación para producir la electricidad que mueve los motores. El residuo del proceso de oxidación es vapor de agua, que a través de un proceso adicional puede pasar a agua en estado líquido. La energía producida por el hidrógeno se dirige primero a la batería que almacena la energía necesaria para el vehículo con el fin de que nunca proceda a apagarse (Naturgas, 2021)

A nivel mundial ya se han desarrollado prototipos de vehículos con FCEV que validan la eficiencia del hidrógeno como fuente de energía. Se ha implementado en transporte ferrero, vehículos livianos, vehículos pesados, barcos e incluso en naves espaciales. Sin embargo, el hidrógeno que más ha mostrado ventajas en tema de movilidad

es el azul, que proviene del gas natural, el verde aún se encuentra en procesos de prototipado (Naturgas, 2021), sin embargo, esto no es razón para detenerse.

En Colombia, Hyundai tiene a Hevolución, un vehículo liviano de hidrógeno verde, en pruebas de testeo, presentando resultados positivos en temas de autonomía y recarga, puesto que logra una autonomía de hasta 700 km, pero con limitaciones respectivas en la falencia de regulaciones, la falla comercial por falta de conocimiento de la tecnología, y el alto coste de las cadenas de suministro (H2LAC, 2022a).

Para el sistema público, en marzo de 2023 se presentó el primer bus impulsado con hidrógeno, que iniciará un proceso de pruebas en las afueras de la ciudad. El proyecto contó con tres (3) años de desarrollo y la inversión de 22 mil millones de pesos, que resultó en el autobús de clase urbana 3RH2FC con 500 km de funcionamiento, para la movilización de 50 pasajeros. Este vehículo presenta un gran futuro, que aún cuenta con obstáculos a resolver, como el financiero debido a que no es operable con las tarifas actuales, además del costo de la infraestructura y como tal el H2 para su carga. Sin embargo, se espera que sea el primero que dé paso a la siguiente generación de vehículos de transporte público (Clopatofsky, 2023).

A continuación, se presenta la descripción de la metodología de investigación desarrollada y los resultados obtenidos en pro del cumplimiento de los objetivos.

## **2. Capítulo 2. Metodología de la investigación**

Este capítulo presenta la metodología a utilizar para el desarrollo de la investigación que busca el cumplimiento de los objetivos y la solución la pregunta de investigación, mediante el diseño de la metodología y la descripción de los instrumentos que permitirán las mediciones de las variables definidas.

### **2.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación**

Este documento tiene por objetivo identificar los impactos que generaría el uso del hidrógeno verde como fuente alternativa de energía en el Sistema Integrado de Transporte de Bogotá. Para ello se desarrolló una investigación mediante un enfoque mixto, el cual integra la perspectiva cualitativa, que implica la exploración de los factores claves que rodean a las variables de investigación reconociendo sus contextos y significados, con la perspectiva cuantitativa, que permite medir las variables para obtener resultados más confiable, con el fin de hacer una inmersión en los conceptos para lograr un análisis más

certero de los resultados y lograr un mayor entendimiento de la investigación (Hernández y Mendoza, 2018, pp.612-613).

En relación con el enfoque, se encuentra el alcance que se define de tipo descriptivo debido a que busca especificar y conceptualizar los atributos importantes que rodean al hidrógeno verde y la implementación como combustible en los vehículos de servicio público, específicamente en el SITP de Bogotá (Universidad EAN, 2023a). Esto contribuye finalmente, al diseño de la investigación, la cual está planteado de tipo no experimental, donde no hay manipulación de variables y se basa en conceptos ocurridos, y está clasificado como transversal, es decir que se recolectarán datos en un solo momento. (Universidad EAN, 2023b)

## 2.2. Definición de variables

En el presente apartado se definen los atributos que serán medidos dentro de la investigación para la obtención de resultados. Las respectivas variables son presentadas en la tabla 4 junto con sus definiciones conceptuales y operacionales, y la dimensión a la que corresponde.

**Tabla 4** Definición de variables de la investigación

ID	Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión
1	Regulación de los vehículos de tecnología de hidrógeno	Estudio del estado, a nivel global y local, para la promoción gubernamental del uso de los vehículos públicos de hidrógeno.	Revisión documental y desarrollo de matriz FODA de la normatividad acerca de la tecnología de vehículos de hidrógeno, para conocer las oportunidades y las amenazas presentes.	*Regulación gubernamental
2	Capacidad del SITP de Bogotá para implementar este tipo de vehículos	Caracterización de la proyección que tiene el SITP de Bogotá para que sus recursos permitan la implementación de vehículos de hidrógeno.	Desarrollo de un diagrama Pareto para conocer los atributos por desarrollar, para la implementación de vehículos de hidrógeno en el SITP	*Capacidad para implementación de nueva tecnología
3	Buses articulados de tecnología de hidrógeno verde	Estudio de diferentes impactos que tendrían el sistema BRT articulado del SITP por el uso de hidrógeno verde	Revisión documental y desarrollo de matriz de probabilidad / impacto que permitirá evaluar la probabilidad de que el evento suceda y el impacto que provocaría en caso de que sucediese	*Impactos de la implementación de nueva tecnología

Nota. Elaboración propia

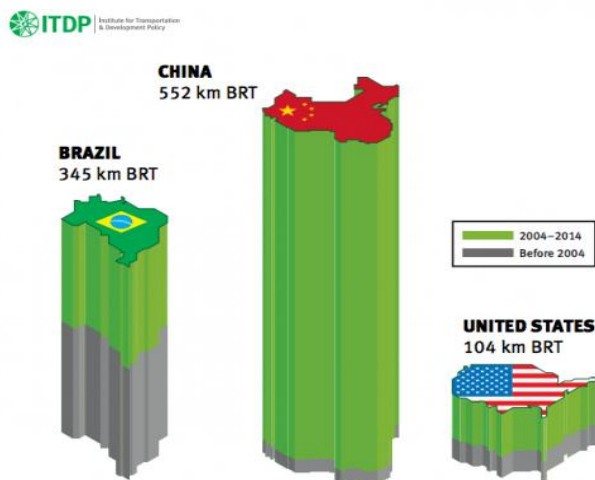
### 2.3. Población y muestra

El conjunto de población de la presente investigación se trata de los sistemas BRT utilizados en el mundo. Actualmente existen 180 sistemas de *Bus Rapid Transit*, que facilitan el transporte de los pasajeros a través de la infraestructura de las respectivas ciudades. El sistema ha sido implementado en todos los continentes, pero se recalca la implementación de América Latina al ser pionera y tener, prácticamente, un sistema por cada país y con un 64% del número de pasajeros totales a nivel mundial (Crotte et al., 2020).

Estos sistemas, como se indicó en el marco teórico, minimizan los tiempos de movilización de un punto a otro mediante carriles exclusivos. Actualmente, se han hecho desarrollos que han permitido el pago electrónico del pasaje, autobuses de tamaños que se pueden acoplar a las ciudades, y la mejora de la experiencia del usuario para conocer la ubicación del bus. Por otro lado, se destaca la adquisición de tecnologías más amigables con el ambiente, como que la mayoría de los vehículos implementados sean de gas natural, EURO VI y EURO V con filtro para limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, además de promover el uso vehículos eléctricos o de hidrógeno (Crotte et al., 2020).

Debido a la amplitud de la población, la investigación se limitará en una muestra de los vehículos en prueba de tecnología de hidrógeno verde que han sido resultado de los esfuerzos y avances de siete principales ciudades con sistema BRT. Estas ciudades hacen parte de los siguientes países que son: Chile, Brasil, Estados Unidos, Francia, China y España, además de Colombia, en el cual, TransMilenio de Bogotá se encuentra actualmente realizando pruebas para un bus que funcionara a partir de esta energía. Con esta muestra se podrá evidenciar cuales son los efectos que esta tecnología ha presentado en los sistemas BRT correspondiente a cada ciudad y que pueden evidenciarse en Bogotá D.C. mediante el sistema propio. En la ilustración 8, se muestra un ejemplo, por km, de los sistemas BRT de tres de los países escogidos.

## Ilustración 8 Sistemas BRT en el mundo



*Nota.* Sistemas BRT en China, Brasil y Estados Unidos. Tomada de ITDP, 2014. <https://www.itdp.org/2014/11/17/bus-rapid-transit-nearly-quadruples-ten-years/>. Dominio público.

### 2.4. Métodos e instrumentos para recolección de datos

Para el desarrollo de la investigación es importante conocer el método y los instrumentos con los cuales se realizará la recolección de información que permitirán analizar datos cualitativos y cuantitativos acerca del contexto del uso de hidrógeno verde para el sector del transporte público. Con ello, se podrá hacer una inmersión en el contexto del uso del hidrógeno verde en los sistemas de transporte público a nivel global y su futura implementación en el SITP de Bogotá.

Los instrumentos utilizados para obtener los datos, con el fin de cumplir los objetivos, serán fuentes abiertas al público y de forma gratuita publicada por páginas gubernamentales, universidades, instituciones independientes, compañías del sector de transporte, plataformas de análisis de datos, revistas especializadas, entre otros, que brindan información de confiabilidad útil para la investigación acerca de los vehículos de transporte público con tecnología de hidrógeno que se utilizan en Chile, Brasil, Estados Unidos, Francia, China y España, además de evaluar el estado de avance en Colombia, específicamente en la capital. Por otro lado, el método seleccionado es el analítico, con el cual se hará una inmersión a profundidad de la información obtenida de forma ordenada, de lo general a lo particular, para obtener los resultados esperados (Santos, 2023).

## 2.5. Técnicas de análisis de datos

La investigación se realizó con un enfoque mixto, es decir, teniendo en cuenta datos tanto cuantitativos como cualitativos, que mediante el instrumento de revisión de literatura y recursos bibliográficos se tendrá la posibilidad de codificar la información tanto numéricamente como textualmente. Para el análisis de los datos se llevará a cabo el proceso que iniciará con la recolección de información y finalizará con la documentación de los resultados, como se muestra en la ilustración 9.

### Ilustración 9 Proceso para análisis de datos



*Nota.* Elaboración propia adaptado del proceso de análisis de datos de Hernández y Mendoza en su libro Metodología de la Investigación (2018, p. 441). <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/stage.aspx?il=&pg=&ed=>. Dominio público.

Por otro lado, para la evaluación de los datos obtenidos a partir de la revisión bibliográfica se utilizarán las siguientes herramientas que permitirán la transferencia y la credibilidad de la información obtenida según la variable definida en el punto 2.2:

- a) *Matriz FODA*: Esta matriz será utilizada para identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de las regulaciones diseñadas para permitir el uso de vehículos de hidrógeno en el sector de transporte público.
- b) *Diagrama de Pareto*: Será desarrollado para ordenar los datos correspondientes a la capacidad de Bogotá para utilizar los vehículos de hidrógeno verde para el transporte público donde se observará cuales requieren mayor atención para resolverse primero.
- c) *Matriz de probabilidad / impacto*: Se realizará una matriz de probabilidad / impacto, que permitirá conocer los diferentes impactos que el uso de hidrógeno verde puede tener en el SITP de Bogotá y las probabilidades de que esto suceda.

Estas herramientas permitirán el análisis de las variables tanto cualitativas destacando la teoría, como cuantitativas mediante la escala de los niveles de impacto, que llevarán a la obtención de los resultados buscados por la investigación.

### 3. Análisis y discusión de los resultados

Este capítulo presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos a través de la revisión de literatura y recursos bibliográficos del estado del hidrogeno verde y las beneficios o ventajas e inconvenientes que tienen la implementación de este energético en el sector de transporte público de los siguientes seis (6) países: Chile, Brasil, Estados Unidos, Francia, China y España, además de Colombia, validando mediante una comparación dentro del enfoque mixto, el desarrollo que se ha tenido en la materia y los impactos que se presentarán por la implementación del hidrógeno verde en el SITP de Bogotá.

#### 3.1. Análisis de resultados

El análisis de los resultados se realizó a través de las herramientas definidas en el capítulo 2, según cada una de las variables establecidas. Para obtener la información acerca del estado y el avance del hidrógeno verde enfocado hacia el transporte sostenible, se desarrolló una revisión documental, de diferentes fuentes abiertas al público, mayormente información gubernamental, lo que permitió conocer como los seis países escogidos han progresado en materia del hidrógeno como energía renovable para ser implementado como combustible alternativo en la movilidad sostenible.

La mayor fuente de información de cada país fue la estrategia o el programa que diseñaron alrededor del hidrógeno, enlistados en la tabla 5, en los cuales establecen los objetivos, mecanismos, herramientas y tareas que tiene cada estado para la producción, almacenamiento y distribución del hidrogeno, así como su implementación por distintos usuarios finales, además se destaca que comparten características como se evidencia en la ilustración 10.

**Tabla 5** Listado de las estrategias del hidrógeno

País	Nombre de la estrategia	Año de publicación	Prioridades
China	Plan nacional del desarrollo del hidrógeno	2022	Producción de H2 y movilidad sostenible
Estados Unidos	Programa del hidrógeno	2020	Producción de H2 y consumo local
Francia	Estrategia Nacional para el desarrollo de la descarbonización y el hidrógeno verde en Francia	2020	Descarbonización, independencia energética y apertura de economía
España	Hoja de ruta del hidrógeno	2020	Descarbonización, apertura económica y movilidad
Brasil	Programa Nacional del Hidrogeno PNH2	2021	Descarbonización, desarrollo tecnológico y crecimiento económico
Chile	Estrategia Nacional del Hidrógeno verde	2020	Desarrollo económico, independencia energética y producción de H2
Colombia	Hoja de ruta del hidrógeno	2021	Producción de H2 y descarbonización

*Nota.* Elaboración propia a partir de la revisión documental. Dominio público

**Ilustración 10** Síntesis y puntos claves de la revisión documental



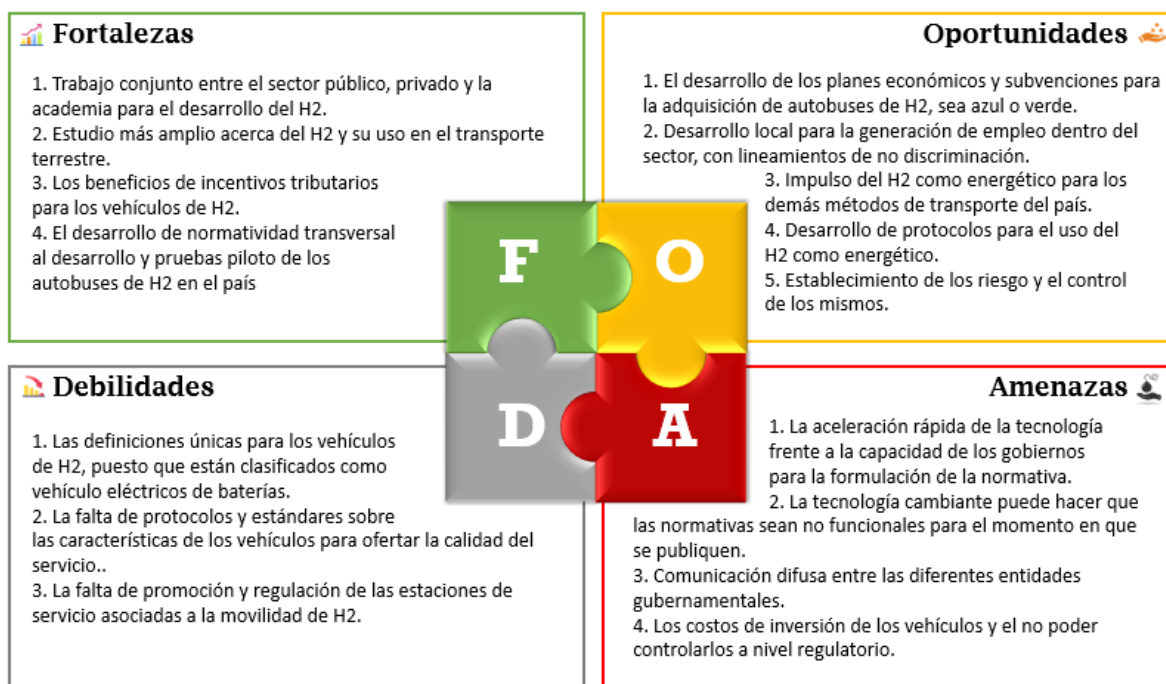
*Nota.* Elaboración propia a partir de la revisión de literatura sobre el hidrogeno verde a nivel global, donde se presenta una descripción de como los países lideran el trabajo de los puntos clasificados. Dominio público.

A partir de la revisión documental, y de la identificación de las ventajas y desventajas o desafíos del hidrógeno en el mundo, se desarrollaron las técnicas de análisis para la obtención de resultados enfocados en las tres variables definidas como se evidenciarán en los siguientes puntos.

### 3.1.1. Regulación de los vehículos de tecnología de hidrógeno

Para esta variable se desarrolló la lectura y estudio de las políticas y regulaciones de las siete naciones, enfocadas en el desarrollo del hidrógeno y su implementación en los vehículos de transporte terrestre, especialmente el transporte público. Entre la información se identificaron una serie de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas presentes en el estado de la regulación y normatividad que rodea a los vehículos de hidrógeno verde, como se evidencia en la matriz FODA presentada en la ilustración 11.

**Ilustración 11** Matriz FODA de la regulación sobre vehículos de H2



*Nota.* Elaboración propia a partir del estudio realizado. Dominio público.

La matriz permite identificar que entre las fortalezas se destaca la participación activa de distintas organizaciones para el desarrollo de las normas y los proyectos en general, y los beneficios de incentivos tributarios, que cada país puede ofrecer para la promoción del hidrógeno en los vehículos de transporte público, como es el caso de España que brinda incentivos para la adquisición de vehículos (“MOVES III”, s.f.) o Estados Unidos

con subvenciones para el reemplazo de autobuses de diésel por hidrógeno con un importe de \$400.000 dólares (Department of energy [DOE], s.f.). Cabe destacar que, de los siete países, incluido Colombia, el más avanzado en términos normativos es Estados Unidos, al tener una regulación bien definida según la aplicación del hidrógeno en cada estado del país.

Entre las oportunidades de mejora se encuentra el impulso de la cadena de valor del hidrógeno verde, mediante la regulación, para la generación de empleo y la apertura económica de los países, además del establecimiento de los protocolos de seguridad del uso del hidrógeno, debido a que este elemento es altamente inflamable y puede causar daños en la salud de los operarios (Calandra et al., 2023).

Por otra parte, se identifican debilidades en las definiciones de los vehículos de transporte y como deben ser funcionalmente para no incrementar los riesgos. También se denota una falencia en la normatividad y estudios para las estaciones de servicio, las cuales deben ir a la par con el desarrollo de los vehículos. Esta aceleración de la tecnología que rodea al hidrógeno en la movilidad es una de las principales amenazas para la normatividad estatal del energético, debido a que las entidades regulatorias no cuentan con la capacidad de moverse al tiempo, lo cual puede crear obstáculos para el buen desarrollo y operación de los autobuses con esta tecnología en el corto plazo (“The French Hydrogen Strategy”, 2021).

Por último, se encuentran los altos costos de la inversión que se requieren para la adquisición y operación de este tipo de vehículos, los cuales requieren de un trabajo conjunto entre entidades gubernamentales para brindar incentivos de adquisición y permisos de operación, las empresas fabricantes para la construcción de los vehículos y los operadores con la más alta calidad de servicio, con el fin de reducir los costos para hacer más viables a los autobuses de hidrógeno.

Las debilidades y las amenazas son aquellas a las que los gobiernos deben dirigir sus esfuerzos para reducir la incertidumbre y los fallos que puedan afectar el buen desarrollo de los proyectos de movilidad sostenible que plantearon en las estrategias del hidrógeno. Para lo cual, es bueno desarrollar e impulsar los programas I+D que permitan obtener respuestas a los desafíos presentes en el hidrógeno como energético para las aplicaciones locales y las futuras a pequeña y gran escala, además de promover la transferencia del conocimiento y la capacitación para la generación de empleo, el cual es

una de las mayores ventajas de esta nueva fuente de energía (Gobierno de Chile, 2020, p.23, p.26).

### **3.1.2. Capacidad del SITP de Bogotá para implementar de vehículos de hidrógeno**

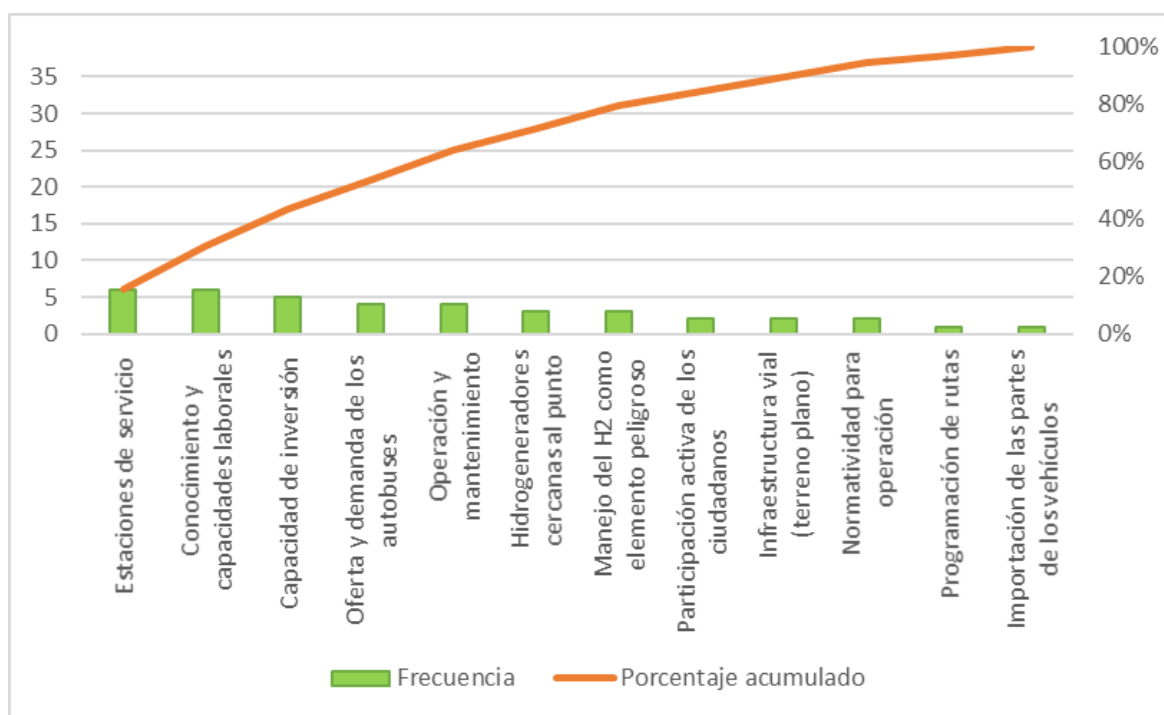
Dentro de la investigación, se evidenciaron varios atributos referentes a las capacidades de las ciudades con pruebas piloto para poner en marcha los autobuses de hidrógeno, los cuales fueron identificados gracias a la frecuencia y similitudes de ocurrencia. Entre ellos se encontraron:

- El desarrollo de la infraestructura, tanto de las estaciones de servicio y reabastecimiento de hidrógeno, además de las plantas productoras de H<sub>2</sub> para abastecer a las estaciones que son muy importantes para mantener la disponibilidad de los vehículos, así como de la infraestructura vial, debido a que los buses de H<sub>2</sub> han en estudios han presentado un mayor rendimiento en recorridos con menores pendientes (Lillo y Belmar, 2021, p.24).
- Los temas enfocados a la economía como lo son la capacidad de inversión que debe tener la ciudad para la adquisición de estos vehículos, la operación y mantenimiento de los mismos, y la importación de las partes en caso de presentarse fallas en los autobuses (Pyza et al. 2022).
- El manejo del hidrógeno con buenas prácticas, debido a que este elemento es altamente inflamable y de alta dispersión, lo cual puede fácilmente afectar la salud de las personas. Para ello se requieren unos protocolos de manejo respectivos y la infraestructura de almacenamiento específica con todos los componentes de seguridad (Souza, 2021).
- Actividades de reorganización, como lo son la normatividad enfocada a la operación, la organización del sistema de rutas, que garantice que el autobús la puede cubrir correctamente y no cause afectaciones al resto del sistema, y generación de la oferta y la demanda para la implementación de estos vehículos (GIZ, 2020, p.17).
- Por último, se encuentran los atributos enfocados en los ciudadanos, tanto la necesidad de la capacitación del personal que trabajaran con los vehículos, como de la participación activa de los ciudadanos para el uso de los autobuses (Lillo y Belmar, 2021, p.34).

Para identificar el estado actual y futuro de la ciudad de Bogotá frente a su capacidad para implementar este tipo de vehículos, se desarrolló un diagrama de Pareto, como se

muestra en la ilustración 12, que permite organizar los atributos definidos, de acuerdo a la experiencia de los demás países, e identificar aquellos a los que la capital colombiana le debe dar prioridad para resolverse primero, con el fin de mitigar los riesgos durante las pruebas piloto de los autobuses de hidrógeno, y a su vez la puesta en marcha de estos vehículos.

**Ilustración 12** Diagrama de Pareto sobre las prioridades de las ciudades con buses de H2



*Nota.* Elaboración propia a partir de la recolección de información de seis países con buses piloto de H2. Dominio público.

De la ilustración anterior se destaca que son prioritarios el desarrollo de las estaciones de servicio de abastecimiento de los buses, en diferentes puntos de la ciudad para no afectar la disponibilidad de los vehículos, y el conocimiento y las capacidades del personal que laboraran directamente con la movilidad del hidrógeno verde. Este atributo aún se encuentra en etapa de desarrollo temprano, debido a que únicamente se ha hablado de una estación de servicio de hidrógeno, desarrollada por Ecopetrol, para dispensar 3 kg/h, que, aunque por el momento es muy útil, se espera crezca su desarrollo a lo largo de la ciudad para el reabastecimiento de los vehículos (H2LAC, 2022b).

Entre los siguientes atributos, se destaca mayormente el de la capacidad de inversión para la adquisición de los vehículos y la viabilidad de ponerlos en marcha, esto

debido a que, a pesar del avance tecnológico, los costos de los vehículos de hidrógeno siguen siendo bastante altos, siendo un 180% más costoso que un autobús de diésel y un 30% más que uno eléctrico con baterías de carga mediante la red eléctrica (Gómez y Tejero, 2021). Estos costos pueden llegar a minimizarse con una mayor cooperación internacional para mitigar la alta inversión y promover el desarrollo de tecnología más económica para hacer viables los proyectos, debido a que es un factor que los afecta a todos por igual como se evidencia en la tabla 6.

**Tabla 6** Costos promedio de autobuses de H2 verde

Inversiones en los autobuses de H2	
País	Costo promedio por autobus
China	850.000 RMB equivalentes a 528 millones de COP aprox. (a)
Estados Unidos	US \$1.27 millones equivalentes a 5 mil millones [MM] de COP aprox. (b)
Francia	1 millón de euros equivalentes a 4 MM de COP aprox. (c).
España	966.427 euros por vehículo equivalentes a 4 MM COP aprox. (d)
Brasil	5 millones de reales por autobús equivalente a 4 MM aprox. (e).
Chile*	US \$1.3 millones equivalente a 5 MM de COP aprox. (f)
Colombia	7 MM de COP cada 3 años para el proyecto piloto de Bogotá. (g)

*Nota.* Elaboración propia. <sup>a</sup>(GIZ, 2020, p.10), <sup>b</sup>(Beshilas, 2019), <sup>c</sup>("Paris adding 47 fuel cell buses to green mix", 2022), <sup>d</sup>("La EMT de Palma presenta sus tres primeros autobuses de hidrógeno verde", 2023), <sup>e</sup>("Ônibus a hidrogênio", s.f.), <sup>f</sup>(Lillo y Belmar, 2021, p.30), <sup>g</sup>(Clopatofsky, 2023). Cabe destacar que Chile toma de referencia a Estados Unidos. Dominio público.

Por último, considerando los resultados donde por experiencias de sistema públicos similares del exterior, se da a entender que el SITP de Bogotá debe dar prioridad en ciertos aspectos, sin descuidar los demás, para el correcto funcionamiento de los autobuses de hidrógeno en la ciudad, para lo cual deberá desarrollar un plan de tareas conjuntas entre sus entidades gubernamentales e instituciones relacionadas al transporte público y la planeación de desarrollo territorial con el fin de mitigar los impactos que se puedan generar por los atributos señalados, en el presente apartado.

### **3.1.3. Buses articulados de tecnología de hidrógeno verde**

Considerando el apartado anterior, se identificaron una serie de eventos repetitivos en las ciudades principales de los países revisados respecto a los vehículos de hidrógeno verde. A partir de ello se hizo un análisis respecto al estado actual de la ciudad de Bogotá y el SITP para evaluar la probabilidad de ocurrencia y el tipo de impacto que generaría el

uso de este energético en el sistema. Cabe destacar que estos eventos se categorizaron en positivos y de oportunidad de mejora como se evidencia en la tabla 7.

**Tabla 7** Matriz de probabilidad / impacto del H2 como fuente de energía en el SITP

Código	Evento	Descripción	Tipo de impacto	Probabilidad de ocurrencia
<b>Positivos</b>				
R1	Mitigación de GEI	Los autobuses con FCEV, la cual es impulsada por H2, no emite ningún elemento nocivo, únicamente agua (H2O) y aire caliente. Esto ayuda a mejorar la calidad del aire y a mitigar las afectaciones a la salud de los ciudadanos (DOE, s.f.)	Muy Alto	Muy Probable
R2	Oferta de una mayor calidad del servicio de transporte mediante buses con energías alternativas	Los autobuses de H2 son silenciosos, y cuentan con altas ventajas frente a los buses de almacenamiento de energía por baterías, como la alta autonomía, el corto tiempo de repostaje del combustible y la velocidad, la cual no disminuye frente a los demás vehículos en las vías (Lillo y Belmar, 2021, p.6).	Alto	Probable
R3	Adaptación de los autobuses de H2 al sistema SITP	Los autobuses de H2 tienen la ventaja de ser de distintos tamaños y capacidades. Pueden ser desde un bus urbano hasta un articulado, sin afectar su autonomía. También se destaca, que las FCEV pueden trabajar conjuntamente con las baterías de litio, generando así autobuses de tecnología H2+2, <i>Hybrid Hydrogen Bus</i> , que garantiza una mayor confiabilidad en la operación y una mayor eficiencia ("Hybrid Hydrogen Bus", s.f.)	Bajo	Muy Probable
R4	Desarrollo del sector de los autobuses	Desarrollo del mercado, las licitaciones, la oferta y la demanda, la atracción de inversión, y el impulso para el uso de vehículos de h2 en carga pesada o carga liviana (DOE, 2020, p.14)	Muy Alto	Muy Probable
R5	Generación de empleo	El impulso de la industria y la transferencia de conocimiento generara miles de empleos en toda la cadena de valor del H2 (Ministerio de Minas y Energía de Brasil, 2021, p.16)	Muy Alto	Certeza
R6	Uso de energías renovables	Se promueve el desarrollo de las energías renovables, especialmente la solar, para producir hidrógeno verde de la forma más limpia posible.	Moderado	Relativamente Probable
<b>Con oportunidades de mejora</b>				
R7	Promoción de la investigación y el desarrollo	A través del I+D se busca el desarrollo sostenible del mercado, y la exploración de las aplicaciones de descarbonización del sector transporte mediante el H2. Además, de la generación de cooperación entre diversas entidades para el desarrollo de nueva tecnología con costos eficiente (Yu, 2022), lo cual Bogotá debe trabajar para mejorar.	Moderado	Relativamente Probable
R8	Desarrollo de normatividad	La falencia de la normatividad y la demora en su publicación y divulgación, por parte de las entidades gubernamentales de la capital, pueden causar retraso en la puesta en marcha de los autobuses de H2.	Moderado	Probable
R9	Tiempo de las pruebas piloto	El tiempo genera un fuerte impacto en las pruebas piloto de autobuses de H2. Esto debido a que las pruebas tienen duraciones muy largas que, al terminar el análisis, la tecnología se habría actualizado a una más moderna y funcional. La prueba estimada del bus de Bogotá es de 8 años (Clopatofsky, 2023), mientras que la de Brasil lleva 13 años en prueba piloto, desde el primer lanzamiento del bus de H2 en 2010 ("Ônibus a hidrogênio", s.f.).	Alto	Muy Probable
R10	Desarrollo de infraestructura	Bogotá debe garantizar la disponibilidad del suministro de H2 en distintos puntos de la ciudad, la capacidad para el óptimo mantenimiento de los buses y la infraestructura vial correcta, con el fin de mitigar los riesgos de fallas del sistema. También debe tener muy en cuenta la infraestructura donde se almacenará el H2, que serían cerca o en las estaciones de servicio, el cual debe cumplir con una normatividad rigurosa para evitar cualquier incendio o desastre por el elemento inflamable (Souza et al., 2021)	Muy Alto	Certeza
R11	Abandono	Factores políticos, económicos, sociales, ambientales, tecnológicos externos a la operación, pueden afectar al proyecto de los buses de H2 presentando inviabilidad y abandono del proyecto.	Moderado	Muy Improbable
R12	Costos de la inversión	Los altos costos de los autobuses de H2 son su principal desventaja. Entre los autobuses de gas, los eléctricos, los híbridos y los de hidrógeno, son estos últimos los que presentan mayores costos tanto en la inversión que corresponde a adquisición, llegando a costar 2,5 veces más que uno de diésel, el registro, la infraestructura relacionada, como en costos de operación que incluye el costo del combustible, el mantenimiento y los seguros, así como el costo final de vida útil, es decir su proceso de reciclaje (Pyza et al. 2022).	Muy Alto	Certeza

*Nota.* Elaboración propia a partir de los resultados de la revisión documental. Dominio público.

A partir, de la información obtenida se desarrollaron dos mapas de calor que permiten evidenciar por colores los niveles de impacto de los eventos categorizados, siendo el rojo el que generaría mayores afectaciones y el verde del que menos habría que preocuparse, como se puede ver en las ilustraciones 13 y 14.

### Ilustración 13 Mapa de calor de eventos positivos

Mapa de calor (Probabilidad / impacto) de eventos con positivos						
	PROBABILIDAD	MUY IMPROBABLE	RELATIVAMENTE PROBABLE	PROBABLE	MUY PROBABLE	CERTEZA
IMPACTO	MUY ALTO				R1, R4	R5
	ALTO			R2		
	MODERADO		R6			
	BAJO				R3	
	MUY BAJO					

*Nota.* Elaboración propia a partir de la síntesis de la matriz de probabilidad / impacto, respecto a los aspectos positivos. Dominio público.

En la ilustración 13, se puede evidenciar que los eventos positivos que han ocurrido en otras ciudades no representan mayor riesgo para el SITP de Bogotá, como la mitigación de las emisiones que realmente ayudarían a mejorar la calidad del aire de la ciudad. Sin embargo, se debe poner atención a los eventos como el desarrollo del sector de autobuses de H2, el cual tiende a tener conflictos por diversidad de opiniones, así como el uso de las energías renovables, debido a que en ciertos casos los costos de estas también son elevados, que puede llevar al SITP de Bogotá a desarrollar primero el H2 azul y posterior, con la reducción de costos en las fuentes renovables, el H2 verde.

### Ilustración 14 Mapa de calor de eventos con oportunidad de mejora

Mapa de calor (Probabilidad / impacto) de eventos con oportunidad de mejora						
	PROBABILIDAD	MUY IMPROBABLE	RELATIVAMENTE PROBABLE	PROBABLE	MUY PROBABLE	CERTEZA
IMPACTO	MUY ALTO					R10, R12
	ALTO				R9	
	MODERADO	R11	R7	R8		
	BAJO					
	MUY BAJO					

*Nota.* Elaboración propia a partir de la síntesis de la matriz de probabilidad / impacto, respecto a los aspectos con oportunidad de mejora. Dominio público.

Por otra parte, la ilustración 14 se puede evidenciar que los costos de inversión y el desarrollo de la infraestructura necesaria para los autobuses de H2, son los eventos que

presentan mayor desafío para el transporte público, y en general, con hidrógeno verde. El SITP de Bogotá debe estar preparado para encontrar una solución que mitigue los riesgos que pueden presentar estos impactos. Además, debe llevar a cabo los proyectos de pruebas piloto, y posteriormente la operación, con la mayor asertividad posible, para evitar que la aceleración de la tecnología supere los tiempos de los proyectos y así evitar el posible abandono de los mismos.

### **3.2. Discusión de resultados**

El hidrógeno verde se ha convertido en los últimos años en uno de los pilares claves para la descarbonización de la economía al ser una fuente energética que se produce a través de energía renovables y que como residuo solamente emite agua. Además, de su alta eficiencia y su potencial de almacenamiento, es considerado como un valioso vector para transformar los actuales usuarios finales que consumen altas cantidades de combustibles fósiles por una fuente más amigable con el medio ambiente, como lo es el sector del transporte (MITERD, 2020, p.4).

Este sector, especialmente el de servicio público, es el que llama más la atención de programas de inversiones para realizar una transición energética hacia un servicio más limpio y con mejor calidad. En los últimos años, se han promovido los autobuses eléctricos e híbridos que igualmente ayudan a mitigar la emisión de GEI, pero que han presentado fallas respecto a la autonomía de las baterías y al peso de los vehículos que, en ciertas ciudades, como Bogotá por términos normativos, se detenga el proceso y obstaculice la operación, como por ejemplo el bus articulado de TransMilenio que no ha podido entrar en pruebas por el peso del vehículo que supera los límites establecidos por la ciudad para tecnologías anteriores, aún no actualizadas para las modernas (Pyza et al. 2022 ; Guglielmetti, 2022).

Sin embargo, el hidrógeno verde responde ante esas problemáticas de una manera más certera incrementando su autonomía, frente a los autobuses de nuevas energías, y hasta mejorando, la calidad del servicio prestado actualmente en el sector público. Es tanto así que los gobiernos, a través de las iniciativas de H<sub>2</sub>, procuran incentivar el uso del transporte público a través de una imagen más amigable con el medio ambiente y más consciente con los pasajeros, que hoy en día presentan opiniones divididas de por parte de los ciudadanos, sea por su servicio o por lo contaminante que son. (Ministerio de energía de Chile, 2016, p.122)

A pesar de que la viabilidad técnica del hidrógeno como combustible para los autobuses tienen resultados muy positivos, son otros los factores los que han hecho que esta tecnología presente atrasos en desarrollo frente a los vehículos con baterías de carga mediante la red eléctrica. Estos desafíos son principalmente por los altos costos de la inversión en la tecnología de la cadena de valor del hidrogeno, que incluye producción, almacenamiento y distribución, de la fabricación de las celdas de combustibles y por lo tanto del producto, el cual equivale al 13% del costo total del vehículo, y de la infraestructura, especialmente de las estaciones de servicio que son extremadamente necesarias para garantizar la disponibilidad y abastecimiento de los vehículos (Souza et al., 2021).

En términos de costos, uno de los hechos que se evidenciaron en la investigación, es que los países revisados, entre ellos Colombia, buscan una apertura económica para la producción y exportación del hidrógeno para fortalecer la industria nacional, sin embargo, en ninguno de ellos se evidencio el entusiasmo de realizar una cooperación internacional que permita establecer estándares e intercambio de recursos para reducir los riesgo que afectan el desarrollo del transporte de H2 verde, y en general de todos los productos que puedan usar al hidrógeno como combustible.

Por otra parte, respecto a la ciudad de Bogotá y el sistema de transporte público, se evidencia un gran desarrollo y avance por parte del SITP para el fomento de la movilidad sostenible al realizar los cambios de flota de motores diésel y de gasolina a motores de gas natural y eléctricos. En los últimos meses, han presentado la iniciativa de agregar al hidrógeno como otro tipo de motor verde a sus activos, con los avances del primer bus piloto del SITP de Bogotá, sin embargo, los altos costos del proyecto, la falta de normatividad, la limitación de la capacidad de Bogotá para tener este tipo de vehículos especialmente en infraestructura, y otros factores como el tiempo, han evidenciado que a la ciudad aún le falta mucho por desarrollar para tener una flota de hidrógeno más amplia y que sea económicamente viable tanto para la ciudad como para los ciudadanos.

Aún así con los amplios desafíos que presenta esta tecnología, se pueden desarrollar oportunidades de mejora en el mediano y largo plazo, que logren disminuir los impactos de estos eventos y fortalezcan aún más aquellos factores que son positivos en la movilidad pública con hidrógeno. Acorde a la investigación, la adaptación a la adversidad, la inversión a la innovación y el trabajo cooperativo entre diferentes organizaciones, sean públicas, privadas o académicas, serán los principales mecanismos del SITP de Bogotá para planificar y construir una de las flotas públicas más sostenibles del mundo.

#### 4. Conclusiones

El SITP de Bogotá, es un sistema que nació para ofrecer calidad y eficiencia, movilizándolo a los ciudadanos de la capital y generando experiencias dentro de los vehículos y de su infraestructura. Sin embargo, es un sistema que en los últimos años ha estado desconectándose de la comunidad debido a las altas afectaciones que generan los autobuses a la calidad del aire y la salud de los ciudadanos por la tecnología obsoleta que tenían. Esto llevó al SITP a realizar una transición hacia las energías renovables, tales como el hidrógeno verde, el cual presenta ciertos eventos que pueden afectar a diferentes niveles el desarrollo de la iniciativa.

La investigación permitió identificar los impactos tanto de forma positiva como negativa, con oportunidades de mejora, que tendría el hidrógeno verde como combustible de la flota del SITP de Bogotá. A través de la revisión documental sobre cómo se ha desarrollado este tipo de proyectos en seis países: Chile, Brasil, España, China, Estados Unidos y Francia, y la aplicación de herramientas de análisis de información, se pudo establecer una serie de eventos de alta ocurrencia y el nivel de impacto que pueden tener sobre los proyectos piloto de autobuses de hidrógeno verde en la ciudad de Bogotá.

Entre ellos se recalcan los eventos positivos con impactos positivos como la mitigación de los gases de efecto invernadero y la descarbonización del sector, además de la oferta de un servicio con alta calidad y eficiencia, de alto rendimiento con energías alternativas. Sin embargo, también se evidencia eventos a subsanar por el SITP de Bogotá como los son la infraestructura, el desarrollo de la normatividad y la capacitación del personal, además de la habilidad de adaptarse a la adversidad para enfrentarse a desafíos altos como el tiempo y los costos de inversión, que hacen tambalear los proyectos de los vehículos de hidrógeno.

Aún así, con los altos costos de inversión, el hidrógeno verde es un energético con una gran cantidad de ventajas, no solo frente al transporte público, sino también a los demás sectores de la economía de los países que les permitirá crecer económicamente mediante el desarrollo de una industria más limpia y la independencia energética de los combustibles fósiles. Es posible que a este energético le ocurra lo mismo que paso con la energía solar, que en sus inicios era muy costosa, pero en la actualidad es económica y altamente eficiente para el ahorro energético.

En conclusión, los efectos del hidrógeno verde en el SITP de Bogotá son mayormente conocidos y trabajados por otros países, lo cual le permite a la ciudad y el sistema de transporte público una oportunidad de generar respuestas y atención a los impactos que pueda tener este energético dentro de la flota vehicular urbana. Por último, se recomienda, que este documento, de alto valor teórico, sea utilizado para futuras investigaciones gracias a la aportación de la categorización y el detalle de los eventos que pueden ocurrir en los proyectos de movilidad sostenible de hidrógeno verde en el transporte público.

## 5. Referencias

- Andesco. (2021). *Vanti gana premio de la Eficiencia Energética por proyecto de TransMilenio con buses a gas natural*. <https://andesco.org.co/vanti-gana-premio-de-la-eficiencia-energetica-por-proyecto-de-transmilenio-con-buses-a-gas-natural/>
- AutoCrash. (2016). Conozca la clasificación de los vehículos pesados de pasajeros. Edición 38. <https://www.revistaautocrash.com/conozca-la-clasificacion-los-vehiculos-pesados-pasajeros/>
- Banco Mundial. (s.f.). *Transport – The Essential Connector* [Transporte – El conector esencial]. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/157201585683713721-0190022020/original/WBTransportNarrative.pdf>
- Bernal Torres, C. (2010). Proceso de la investigación científica. En *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. (Tercera Edición, p. 113). Pearson.
- Beshilas, L. (2019). *Fuel Cell Electric Buses in The USA*. *National Renewable Energy Laboratory* [Autobuses eléctricos de pila de combustible en los Estados Unidos. Laboratorio Nacional de Energías Renovables]. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/state-local-tribal/blog/posts/fuel-cell-electric-buses-in-the-usa.html#:~:text=These%20include%20brake%2C%20suspension%2C%20air,than%20buses%20purchased%20in%202010.>
- “¡Bienvenida! la primera flota de buses eléctricos en Bogotá”. (2020). SITP. <https://www.sitp.gov.co/publicaciones/91122/bienvenida-la-primera-flota-de-buses-electricos-en-bogota/>

- Calandra, D., Wang, T., Cane, M., y Alfiero, S. (2023). Management of hydrogen mobility challenges: A systematic literature review [Gestión de los desafíos de la movilidad del hidrógeno: una revisión sistemática de la literatura]. *Journal of Cleaner Production*. (410). <https://www.sciencedirect.com/bdiblioteca.universidadean.edu.co/science/article/pii/S0959652623014634>
- Clopatofsky, J. (2023). Bus de hidrógeno rodará en Bogotá. *Revista Motor*. <https://www.motor.com.co/industria/Bus-de-hidrogeno-rodara-en-Bogota-20230317-0008.html>
- Crotte, A., Galarza, D. y Navas, C. (2020). La nueva tendencia en concesiones de BRT en América Latina. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://n9.cl/04wpr>
- Departement of Energy. (2020). The U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan [Programa de hidrógeno del departamento de energía de los Estados Unidos]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>
- Department of Energy. (s.f.). *Hydrogen Laws and Incentives in California [Leyes e incentivos del hidrógeno en California]*. Alternative Fuels Data Center [Centro de información de combustibles alternativos]. <https://afdc.energy.gov/fuels/laws/HY?state=ca>
- Diazgranados, L., López, C. y Duque, J. (2022). Estado del hidrógeno verde en América Latina y el Caribe. Inicio. [https://hinicio.com/wp-content/uploads/2022/09/Infografia\\_Estado-H2-Verde-LAC\\_2022\\_GIZ\\_Hinicio\\_vf.pdf](https://hinicio.com/wp-content/uploads/2022/09/Infografia_Estado-H2-Verde-LAC_2022_GIZ_Hinicio_vf.pdf)
- DNP. (2017). Energy Demand Situation in Colombia [Situación de la demanda de energía en Colombia]. <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>
- Foster, S. y Elzinga, D. (s.f.). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- GIZ. (2020). *New Energy Buses in China [Autobuses de nueva energía en China]*. [Informe]. [https://www.changing-transport.org/wp-content/uploads/2020\\_GIZ\\_New-Energy-Buses-in-China.pdf](https://www.changing-transport.org/wp-content/uploads/2020_GIZ_New-Energy-Buses-in-China.pdf)

- Gobierno de Chile. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf)
- Gobierno de Francia. (2020). Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. [Estrategia nacional para el desarrollo del hidrógeno libre de carbono en Francia]. [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/secteurs-d-activite/industrie/decarbonation/dp\\_strategie\\_nationale\\_pour\\_le\\_developpement\\_de\\_l\\_hydrogene\\_decarbone\\_en\\_france.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/secteurs-d-activite/industrie/decarbonation/dp_strategie_nationale_pour_le_developpement_de_l_hydrogene_decarbone_en_france.pdf)
- Gómez, L. y Tejero, A. (2021). *El transporte de hidrógeno es hasta un 30% más caro que el eléctrico*. El Economista. <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/11267716/06/21/El-transporte-de-hidrogeno-es-hasta-un-30-mas-carro-que-el-electrico.html>
- Guglielmetti, F. (2022). El bus eléctrico más largo del mundo está en Colombia y tiene prohibido circular ¿Se va a México? Portal Movilidad. <https://portalmovilidad.com/el-bus-electrico-mas-largo-del-mundo-esta-en-colombia-y-tiene-prohibido-circular-se-va-a-mexico/>
- H2LAC. (2022a). Hevolución, el proyecto colombiano de movilidad con hidrógeno verde. <https://h2lac.org/noticias/hevolucion-el-proyecto-colombiano-de-movilidad-con-hidrogeno-verde/>
- H2LAC. (2022b). Colombia tendrá dos estaciones de servicio de hidrógeno verde. <https://h2lac.org/noticias/colombia-tendra-dos-estaciones-de-servicio-con-hidrogeno-verde/>
- Hernández Sampieri, R. y Mendoza, P. (2018). En *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. (Primera Edición). McGraw Hill. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/stage.aspx?il=&pg=&ed=>
- Hinicio. (2021). Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. Alianza energética México – Alemania. [https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user\\_upload/mexico/media\\_elements/reports/Hidro%CC%81geno\\_AE\\_Tomo\\_1.pdf](https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_1.pdf)
- "Hybrid Hydrogen bus". (s.f.). COPPE-UFRJ. <https://www.coppe.ufrj.br/en/a-coppe/coppe-produtos/hybrid-hydrogen-bus>

- Hyundai. (2023). *Fiscalidad de los vehículos de hidrógeno*. Drive to Business Hyundai. <https://www.drivetobusiness.fr/fiscalite-vehicule/hydrogene/>
- IRENA. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor [Geopolíticas de la transformación energética: El factor de hidrógeno]*. International Renewable Energy Agency. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA\\_Geopolitics\\_Hydrogen\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf)
- "La Agenda para el Desarrollo Sostenible". (s.f.). Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- "La EMT de Palma presenta sus tres primeros autobuses de hidrógeno verde". (2023). Acciona. [https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/emt-palma-presenta-tres-primeros-autobuses-hidrogeno-verde/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/emt-palma-presenta-tres-primeros-autobuses-hidrogeno-verde/?_adin=02021864894)
- Lillo, P. y Belmar, F. (2021). *Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones y Ministerio de Energía. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/20211230\\_informe\\_ext\\_mtt\\_men.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/20211230_informe_ext_mtt_men.pdf)
- Ministerio de Energía de Chile. (2016). Política energética de Chile 2050. [https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia\\_2050\\_-\\_politica\\_energetica\\_de\\_chile.pdf](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA – PAI PROURE 2017 – 2022*. [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía de Brasil. (2021). Programa Nacional de Hidrógeno. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognoRelatiodiretrizes.pdf>

- Ministerio de Transporte. (2021). *Los 7 Sistemas Integrados de Transporte Masivo, fundamentales durante el primer año de emergencia sanitaria en el país*. Gobierno de Colombia. <https://n9.cl/v5ssl>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITERD]. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovables. [https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja\\_de\\_ruta\\_del\\_hidrogeno.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf)
- "MOVES III - Programa de incentivos a la movilidad eléctrica". (s.f.). Fondos Europeos. <https://fondoseuropeos.jcyl.es/web/es/1285233187761.html>
- Naturgas. (2021). Vehículos de hidrógeno: La movilidad sostenible del futuro. Asociación colombiana de gas natural. <https://naturgas.com.co/movilidad-sostenible-vehiculos-de-hidrogeno/>
- Norma técnica colombiana 5206 (2009, 15 de julio). Vehículos para el transporte terrestre público colectivo y especial de pasajeros. Requisitos y métodos de ensayo. ICONTEC.
- "Nueva flota de TransMilenio es en su mayoría a gas". (2018). TransMilenio S.A. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151058/nueva-flota-de-transmilenio-es-en-su-mayoria-a-gas>
- "Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna". (s.f.). Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Observatorio ambiental de Bogotá. (2014). *2.500 buses del SITP y Transmilenio contarán con filtros para eliminar las bocanadas de humo*. Secretaría de Ambiente. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://oab.ambientebogota.gov.co/2-500-buses-del-sitp-y-transmilenio-contaran-con-filtros-para-eliminar-las-bocanadas-de-humo/>
- Oficina de prensa de TransMilenio S.A. (2020). *Llegan 130 buses nuevo más a Gas Natural*. TransMilenio S.A. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151632/llegan-130-buses-nuevos-mas-a-gas-natural/>
- "Ônibus a hidrogênio". (s.f.). Financiadora de estudios y proyectos [FINEP]. <http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>

Organización de las Naciones Unidas. (2020). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020*. [Informe]. [https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf)

"Para finales de este año, Bogotá tendrá la flota eléctrica más grande del mundo, superada solo por China". (2022). TransMilenio S.A. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/152658/para-finales-de-este-ano-bogota-tendra-la-flota-electrica-mas-grande-del-mundo-superada-solo-por-china/>

"Paris adding 47 fuel cell buses to green mix". (2022). Buses Magazine. <https://www.keybuses.com/article/paris-adding-47-fuel-cell-buses-green-mix#:~:text=Purchasing%20the%20buses%20will%20cost,pilot%20scheme%20launched%20in%202019>

Pyza, D., Golda, P. y Sendek-Matysiak, E. (2022). Use of hydrogen in public transport systems [Uso del hidrógeno en el sistema de transporte público]. *Journal of Cleaner Production*. (335). <https://www.sciencedirect.com/bdiblioteca.universidadean.edu.co/science/article/pii/S0959652621044127>

"¿Qué es la normativa EURO 6?". (2020). Toyota España. <https://www.toyota.es/world-of-toyota/contaminacion-diesel/norma-euro6-que-es-como-afecta-compra-coche-toyota>

"¿Qué es SITP?". (2016). TransMilenio. <https://n9.cl/uqpv2>

Ramírez, L. (2021). *259 buses eléctricos del SITP ya están rodando por Bogotá*. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/sitp/buses-electricos-del-sitp-0>

Resolución 7126 (1995, 11 de octubre). Por la cual se establecen las características y especificaciones técnicas y de seguridad para los vehículos de transporte público colectivo de pasajeros. Ministerio de transporte. <https://www.medellin.gov.co/movilidad/jdownloads/Normas/Normatividad/Resoluciones%20Nacionales/1995/1995-resolucion007126.pdf>

Resolución 2099 (2021, 10 de julio). Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. Función Pública. [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=166326](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=166326)

- Rodríguez, D., Nocua, M., Lancheros, M., Chaves, L., Mendoza, F., Puello, M., Rodas, N., Sánchez, C. y Galvis, L. (2019). *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica*. Gobierno de Colombia. <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>
- Sánchez-Hernández, A. (s.f.). *Nuevo reglamento Euro 5 y Euro 6*. CESVIMAP. <https://www.vagindauto.com/archivos/featureds/Nuevo%20reglamento%20EuroV%20y%20Euro%20VI.pdf>
- Sánchez, R. (2022). *Lista de localidades donde operarán los 406 nuevos buses eléctricos de Bogotá*. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/localidades-de-bogota-donde-operaran-los-406-nuevos-buses-electricos>
- Sanín, J. (2008). Transporte masivo. En *Historia del transporte y la Infraestructura en Colombia* (Primera edición, pp. 497-513). Ministerio de transporte.
- Santos, D. (2023). *Recolección de datos: métodos, técnicas e instrumentos*. HubSpot. <https://blog.hubspot.es/marketing/recoleccion-de-datos>
- Souza, H., Petzhold, G. y Albuquerque, C. (2021). *Ônibus a hidrogênio pode complementar veículos a bateria em transição para transporte limpo [Los autobuses de hidrógeno pueden complementar la transición de los vehículos de batería al transporte limpio]*. WRI Brasil. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/onibus-hidrogenio-pode-complementar-veiculos-bateria-em-transicao-para-transporte-limpo>
- Transmilenio S.A. (2023). Bus en operación febrero 2023 [MS Excel]. Datos abiertos Bogotá. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/organization/transmilenio>
- Terzaghi, V. (2022). *Cómo es el negocio del hidrógeno [verde] y por qué Argentina es una plaza clave*. H2Lac. <https://h2lac.org/noticias/como-es-el-negocio-del-hidrogeno-y-por-que-argentina-es-una-plaza-clave/>
- "The French Hydrogen Strategy". (2021). Watson Farley & Williams. <https://www.wfw.com/articles/the-french-hydrogen-strategy/>
- Torres, J. (2020). *Historia del transporte en Bogotá*. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://archivobogota.secretariageneral.gov.co/noticias/historia-del-transporte-bogota>

- Torres, R., y García, N. (2022). Introducción al Hidrógeno verde. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33009/1/Introduccion\\_al\\_Hidrogeno\\_Verde.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33009/1/Introduccion_al_Hidrogeno_Verde.pdf)
- TÜV SÜD. (s.f.). *Producción de hidrógeno* [Artículo]. <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/produccion-hidrogeno>
- Universidad EAN. (2023a). Alcance de Investigación [OVA]. Seminario de Investigación <https://n9.cl/whnn3>
- Universidad EAN. (2023b). Diseño metodología cuantitativa parte 1 [Ambiente virtual]. Seminario de Investigación. <https://n9.cl/7b2hf>
- UPME. (2020). Plan Energético Nacional 2020-2050. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)
- Vanek, F., Largus, A., Banks, J., Daziano, R. y Turnquist, M. (2014). Public Transportation and Multimodal Solutions [Transporte público y soluciones multimodales]. En *Sustainable Transportation Systems Engineering [Ingeniería de Sistemas de Transporte Sostenible]*. (Primera edición, capítulo 8). McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/content/book/9780071800129/chapter/chapter8>
- Yu, Y. (2022). *China's National Hydrogen Development Plan [Plan nacional de desarrollo de Hidrogeno de China]*. Energy Iceberg. <https://energyiceberg.com/national-hydrogen-development-plan/>
- Ziehe, J., Walter, K., Oliva, T, Cárdenas, P. y González, J. (2021). *Manual del Hidrógeno verde*. Alianza Hidrógeno Verde. [https://www.ah2vbiobio.cl/wp-content/themes/lms\\_mooc/assets/Manual\\_Del\\_Hidr%C3%B3geno\\_Verde\\_Ah2VBiobio%3%ADo.pdf](https://www.ah2vbiobio.cl/wp-content/themes/lms_mooc/assets/Manual_Del_Hidr%C3%B3geno_Verde_Ah2VBiobio%3%ADo.pdf)