

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
VEHÍCULOS CON CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO EN
COLOMBIA**

**PAOLA IBETH SÁNCHEZ
JUAN DAVID LÓPEZ**

**COLEGIO DE ESTUDIO SUPERIORES DE ADMINISTRACIÓN - CESA
MBA INTERNACIONAL
BOGOTÁ
2019**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
VEHÍCULOS CON CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO EN
COLOMBIA**

**PAOLA IBETH SÁNCHEZ
JUAN DAVID LÓPEZ**

Tutor:

GUILLERMO ALBERTO SINISTERRA

**COLEGIO DE ESTUDIO SUPERIORES DE ADMINISTRACIÓN - CESA
MBA INTERNACIONAL
BOGOTÁ
2019**

TABLA DE CONTENIDO

1. ACRÓNIMOS	7
2. INTRODUCCIÓN	8
3. TEMA DE INVESTIGACIÓN	10
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
6. HIPÓTESIS	18
7. OBJETIVOS	18
7.1 Objetivo general	18
7.2 Objetivos específicos	19
8. ALCANCE Y LIMITACIONES	19
9. ESTADO DEL ARTE	20
9.1 Hidrógeno como combustible	20
9.2 Estado de implementación de las celdas de combustible en el mundo	24
9.3 Estudios de tecnologías vehiculares con combustibles alternativos	26
10. MARCO TEÓRICO	37
10.1 Análisis de Costo de Ciclo de Vida	37
10.2 Costo Nivelado de Electricidad - LCOE	40
10.3 Incentivos Fiscales Vehículos Eléctricos	41
10.4 Ley 1715 de 2014	43
10.5 Ley 1964 de 2019	45
11. METODOLOGÍA	46
11.1 Costo Social de ciclo de Vida	46

	4
11.2 Costo de ciclo de Vida del Consumidor	47
12. RESULTADOS	51
11.1 Costo de producción del hidrógeno a través del proceso de electrólisis	51
11.2 Costo Social de ciclo de Vida	53
11.3 Costo de ciclo de vida del consumidor	55
11.4 Comparación de costos de ciclo de vida de las tres tecnologías	59
11.5 Sensibilidades	60
11.5.1 Precio del vehículo	60
11.5.2 Precio del combustible	65
11.5.3 Precio de la energía	66
11.5.4 Rango de manejo	67
CONCLUSIONES	69
ANEXOS	71
REFERENCIAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de GEI para diferentes tecnologías vehiculares.....	13
Figura 2. Valores relativos de emisiones WTW (desde pozo a rueda) para diferentes tecnologías vehiculares.....	14
Figura 3. Valor presente costo de vida social.....	15
Figura 4. Análisis de sensibilidad costo ciclo vida para una tasa de aprendizaje del 8%	16
Figura 5. Costo de movilidad diferentes tecnologías 2050	17
Figura 6. Costos de obtención del hidrógeno a través de diferentes procesos	23
Figura 7. Costo de ciclo de vida FCEV	49
Figura 8. Costo de ciclo de vida BEV	50
Figura 9. Costo de ciclo de vida ICEV.....	51
Figura 10. Costos de los vehículos BEV y FCV de acuerdo con curva de aprendizaje tecnológico	62
Figura 11. Costos de ciclo de vida del vehículo eléctrico versus convencional gasolina	63
Figura 12. Costos de ciclo de vida del vehículo de celdas de hidrógeno versus convencional gasolina.....	64
Figura 13. Costos de ciclo de vida del ICEV variando precios de la gasolina.....	65
Figura 14. Costos de ciclo de vida del BEV y FCV variando precios de la energía solar ...	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cupos anuales de vehículos con gravamen arancelario del 0% y 5%.....	42
Tabla 2 Parámetros Estimación Costo Producción Hidrógeno.....	52
Tabla 3 Factor emisiones para vehículos ICEV, FCV y BEV en el contexto Colombiano	53
Tabla 4 Costo social de emisiones para Colombia.....	55
Tabla 5 Costo de mantenimiento y reparaciones por vehículo para recorrer 10,000 millas	57
Tabla 6 Costos de ciclo de vida por vehículo.....	59
Tabla 7 Tasas de aprendizaje de la tecnología vehicular	61
Tabla 8 Costos de ciclo de vida por hora según rango de manejo	67

1. Acrónimos

A continuación, se detalla el significado de los acrónimos más comunes utilizados en el documento. Algunos de ellos se presentan por sus siglas en inglés para mayor comprensión de las referencias bibliográficas.

FCV: Fuel Cell Vehicle o Vehículo de Celda de combustible.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GHE: Green House Emissions

BEV o EV: Battery Electric Vehicle o Electric Vehicle

ICE: Internal Combustion Engine

ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle

HEV: Hybrid Electric Vehicle

CNG: Compress Natural Gas

GNV: Gas Natural Vehicular **ACPM:** Aceite Combustible para Motores o Petrodiesel

H2: Hidrógeno

GH2: Hidrógeno en estado Gaseoso

LH2: Hidrógeno en estado líquido

MMBTU: Million British Thermal Units

REET: The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation

LCOE: Levelized Cost of Electricity

FNCER: Fuentes No Convencionales de Energía Renovable

AVCEM: Advanced Vehicle Cost and Energy Use Model

LEM: Lifecycle Emission Model

LCC: Life Cycle Cost

SSCHISM: Steady State Model of Hydrogen Infrastructure for US Urban Areas Model

CIF: Cost, Insurance and Freight

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

BioD: BioDiesel

WTW: Well to Wheel Analysis o Análisis de Pozo a Rueda

WTT: Well to Tank Analysis o Análisis de Pozo a Tanque

TTW: Tank to Wheel Analysis o Análisis de Tanque a Rueda

IEA: International Energy Association

En las referencias bibliográficas y en el desarrollo de este documento, el funcionamiento de los vehículos FCV se considera a base de hidrógeno, a menos que se especifique lo contrario.

2. Introducción

El cambio climático es una preocupación creciente alrededor del mundo. Recientemente, Europa se declaró en emergencia climática, convirtiéndose en el primer continente en hacerlo (El Tiempo, 2019). La adopción del Acuerdo de París en 2015 representó uno de los mayores hitos en la historia del cambio climático. Un total de 195 países más la Unión Europea, firmaron un pacto para tomar medidas drásticas para luchar contra el cambio climático. Dentro de estas medidas, diferentes actores han sumado esfuerzos para soportar iniciativas que generen la des-carbonización de diferentes sectores.

El sector de movilidad y transporte no se ha mantenido ajeno a estas iniciativas, las cuales concentran sus mayores esfuerzos en alternativas de movilidad que generen menos emisiones y sean más amigables con el ambiente, como por ejemplo los vehículos impulsados por hidrógeno. No obstante, su masificación aun ha sido lenta, dado su elevado costo de adquisición que hacen la tenencia de este tipo de vehículos más costosa frente a los vehículos convencionales de combustibles fósiles.

El objetivo de esta investigación es evaluar la factibilidad económica de los vehículos de hidrógeno, obtenido a partir de la electrólisis del agua en Colombia, utilizando energía solar fotovoltaica y energía de la red, comparándolo frente al vehículo de gasolina y el vehículo eléctrico. Su factibilidad económica es valorada desde una perspectiva de costo de ciclo de vida, la cual no solo tiene en cuenta el costo de ciclo de vida del consumidor, sino que además pondera el costo social asociado a las emisiones GEI y de contaminación atmosféricas producidas durante el ciclo de vida del vehículo. Se evalúa el futuro costo del vehículo de hidrógeno en relación con su costo de inversión y los posibles efectos de aprendizaje tecnológico sobre su costo de producción a lo largo del tiempo.

Los resultados indican que el costo de inversión y el rango de manejo son los factores claves para hacer que los costos de ciclo de vida de los vehículos de hidrógeno sean comparables con los vehículos convencionales de gasolina. Con el costo actual de inversión, los vehículos de hidrógeno son competitivos para rangos de manejo mayores de 75.000 millas/año, mientras para rangos de manejo de 10.000 millas/año, solo es comparable frente al de gasolina en un horizonte de 25 años.

En Colombia es escasa la literatura relacionada con los costos de ciclo de vida de los vehículos para el consumidor, los costos de las emisiones de los gases contaminantes y de efecto invernadero, y comparaciones económicas de las diferentes tecnologías vehiculares (gasolina, eléctrico e hidrógeno) respecto a sus costos de ciclo de vida. Por tal motivo, con el presente estudio se pretende aportar a dicha literatura realizando los análisis sobre costos de ciclo de vida de esas tecnologías en el contexto Colombiano, para concluir si es factible económicamente la implementación de los vehículos de celda de combustible de hidrógeno en Colombia y bajo cuáles condiciones.

El proyecto se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la sección 3 se expondrá el tema de investigación, en la sección 4 el planteamiento del problema, en la sección 5 la pregunta de investigación, en la sección 6 los objetivos del estudio, en la sección 7 el alcance y las limitaciones del proyecto, en la sección 8 se presentará el estado del arte, en la sección 9 el marco teórico, en la sección 10 se explicará la metodología que se empleará para realizar el análisis de ciclo de costos de vida, y por último en las secciones 11 y 12 se presentarán los resultados y las conclusiones respectivamente.

3. Tema de investigación

Estudio de factibilidad económica para la implementación de vehículos con celdas de combustible de hidrógeno en Colombia.

“Yo creo que el agua algún día será empleada como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno, los cuales la constituyen, usados en forma individual o conjunta, originarán una fuente inagotable de calor y luz” (Verne, 1874)

4. Planteamiento del problema

Recientemente, en diversas ciudades de Colombia, tales como Medellín y Bogotá, se han tenido que implementar restricciones a la circulación de vehículos, como medidas orientadas a reducir los niveles de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y la concentración de material particulado en el ambiente. El transporte es la segunda fuente de CO₂ global relacionado con la energía, y representó en 2012 alrededor un cuarto (1/4) de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) de combustibles fósiles; Además, las emisiones de CO₂ impulsadas por el transporte han aumentado más rápidamente que las emisiones globales en las dos últimas décadas (Ebanha, Blumberg, & Miller, 2012, pág. 1).

En la actualidad, la mayor parte de la contaminación atmosférica es producida por los vehículos automotores. “Los niveles de contaminantes en los centros urbanos de América Latina exceden las directrices de la organización mundial para la salud” (Onursal & Gautam, 1997, pág. xxi). Según la OMS, 9 de cada 10 personas respiran aire contaminado en el mundo y cerca de siete millones de personas mueren cada año por causas directamente relacionadas a la polución (El Intransigente, 2019)

Ante la contaminación ambiental de los combustibles fósiles, diferentes tecnologías de movilidad, más amigables con el ambiente, se han venido desarrollando, entre ellas, los vehículos eléctricos, híbridos y la más reciente, los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno. Esta tecnología es similar a la del vehículo eléctrico, en donde la transmisión mecánica es también impulsada por un motor eléctrico, sin embargo, su diferencia radica en que al contrario del vehículo eléctrico, en la que la batería es la encargada de suministrar energía eléctrica al motor, en el vehículo de celda de combustible, FCV por sus siglas en inglés, esta energía eléctrica proviene de la reacción química generada entre el hidrógeno, almacenado a presión en un reservorio dentro del vehículo, y el oxígeno presente en el ambiente.

La figura 1 muestra las emisiones de gases de efecto invernadero generada por diferentes tecnologías vehiculares desde una perspectiva de evaluación de ciclo de vida, en la cual se tiene en cuenta el ciclo de vida del vehículo comprendido por: producción del material, ensamble, distribución y disposición. Así como, el ciclo de vida del combustible, conocido también como análisis de pozo a rueda, en la cual se tiene en cuenta la energía requerida y emisiones para la extracción de la materia prima usada en la fabricación del combustible vehicular, su transporte, la producción del combustible, su consumo y nivel de emisiones causados por el vehículo.

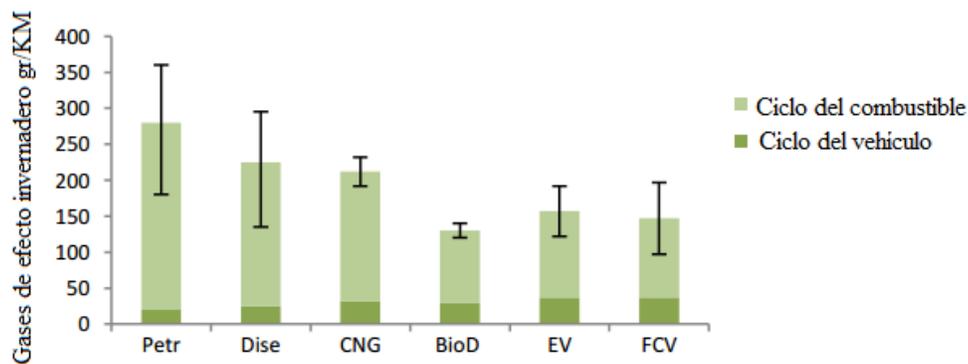


Figura 1. Emisiones de GEI para diferentes tecnologías vehiculares

Nota: Adaptado de “Environmental impact of alternative fuels and vehicle technologies: A Life Cycle Assessment perspective”, de Ashnani, M., Miremadi, T., Johari, A., Danekar, A., 2015, *Revista Procedia Environmental Sciences*, p. 208.

En el caso de los vehículos de celda de combustible de hidrógeno, el nivel de emisiones generado por el ciclo de vida del combustible dependerá de la forma de obtención del hidrógeno y de los recursos utilizados para su extracción.

El hidrógeno puede ser obtenido a partir del reformado con vapor de hidrocarburos como el gas natural y el carbón, así como del agua, a través del proceso de electrólisis. “La obtención del hidrógeno, independientemente de su fuente, requiere de grandes cantidades de energía” (Hordeski, 2009, pág. 5) siendo entonces el costo de energía un “factor determinante en el costo de producción de este elemento” (Ajanovic & Reinhard, 2018, pág. 283).

Dependiendo de la fuente de la cual se obtenga el hidrógeno y la fuente de la energía utilizada durante su extracción, su factor de emisión de GEI y material particulado

también variará; Siendo el proceso de reformado con vapor de hidrocarburos el de mayor huella de carbono y el obtenido a partir del proceso de electrólisis del agua usando energías renovables, el de menor impacto para el medio ambiente.

En la figura 2 se muestra los valores relativos de emisiones y material particulado para diferentes tecnologías vehiculares desde una perspectiva de análisis de ciclo de vida del combustible, análisis de pozo a rueda¹, respecto al vehículo de gasolina. En ella se puede observar que la tecnología de vehículos de celda de combustible (FCV) con hidrógeno obtenido a partir del proceso de electrólisis utilizando energía renovable (Electro. GH2 FCV. Renew. kWh) es la que presenta mayor reducción de gases contaminantes y material particulado.

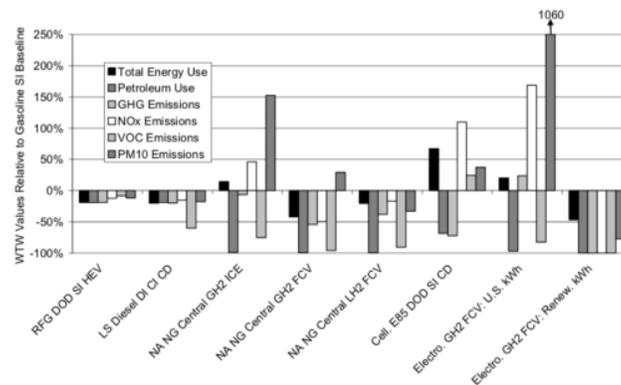


Figura 2. Valores relativos de emisiones WTW (desde pozo a rueda) para diferentes tecnologías vehiculares

Nota: Recuperado de “Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions”, de Brinkman, N., Wang, M., Weber, T., Darlington, T., 2005, *U.S. Department of Energy Office of Science*, p. 4

¹ Análisis desde la recuperación de la materia prima de energía, "pozo", hasta la entrega de energía al vehículo, las "ruedas". Puede dividirse en dos etapas clave: el pozo al tanque (consumo de energía y emisiones para extraer las materias primas, transportarlas, producir el combustible deseado, distribuir el combustible a los consumidores, etc.); y del tanque a las "ruedas"(consumo de energía y emisiones causadas por el uso del combustible por el vehículo)

Por ser una tecnología reciente y aun en desarrollo, su costo de fabricación y comercialización es elevado, lo que ha impedido su masificación a pesar de los beneficios ambientales que presenta frente a las tecnologías de combustión convencionales.

Desde la academia se han realizado diferentes comparaciones económicas de los vehículos FCV frente a los vehículos convencionales de gasolina. Sun, Ogden & Delucchi (2010, pág. 11942) evalúan el costo de vida social de los vehículos de celdas de combustible de hidrógeno frente al vehículo de gasolina de uso particular para un rango de manejo anual de 10.000 millas, desde una perspectiva de bienestar social. En ella, emplean un modelo de curva de aprendizaje para estimar el costo de las celdas de combustible en el tiempo² y calculan el costo de producción del hidrógeno a partir de diferentes fuentes como, el gas natural, el carbón y la electrólisis del agua usando energía de la red. La evaluación concluye que para el 2025 el costo anualizado de un vehículo FCV será solo \$260 USD mayor al vehículo de gasolina.

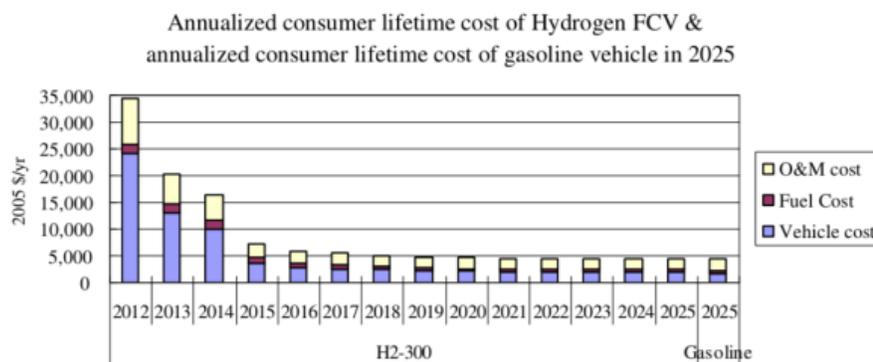


Figura 3. Valor presente costo de vida social

Nota: Recuperado de “Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles”, de Sun, Y., Ogden, J., Delucchi, M., 2010, *Revista International Journal of Hydrogen Energy*, p. 11941

² La curva de aprendizaje se basa en el fenómeno observado empíricamente de que los costos unitarios a menudo tienden a disminuir en un porcentaje constante por cada duplicación del volumen de producción acumulado (Ruffini & Wei, 2018, pág. 331).

Ruffini & Wei (2018, pág. 329) proveen una comparación detallada del costo del ciclo de vida de los vehículos de celda de combustible frente a otras tecnologías en California, para un rango de manejo anual de 12.000 millas. Utilizan un enfoque de curva de aprendizaje bajo diferentes escenarios para estimar los costos de la tecnología FCV y el costo de producción del hidrógeno a través de la electrólisis del agua usando energía de la red. Los resultados muestran que para una tasa de aprendizaje del 18%, los FCV se estiman que sean costos competitivos a los vehículos convencionales para el 2025, sin embargo, para una tasa del 8%, el punto de corte de ambas tecnologías se extiende a casi 25 años

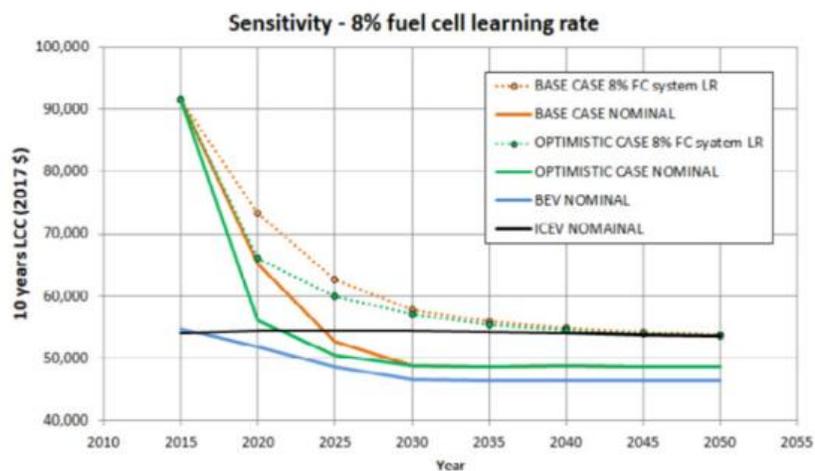


Figura 4. Análisis de sensibilidad costo ciclo vida para una tasa de aprendizaje del 8%

Nota: Recuperado de “Future cost of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach”, de Ruffini, E., Wei, M., 2018, *Revista Energy*, p. 338

Ajanovic y Reinhard (2018), analizan la prospectiva económica del uso del hidrógeno como combustible en el sector transporte. En este análisis, los autores calculan el costo de movilidad de los vehículos de celda de combustible de hidrógeno obtenido a partir de la electrólisis del agua con energía excedentaria de la red para un rango de manejo anual

de 12.000 millas. Usan precios de kWh del mercado mayorista de energía de Alemania y Austria durante el 2016 y su diferencia en costos se observa en la Figura 5. En su análisis, los autores estiman que el vehículo FCV sea competitivo en costo al vehículo de gasolina en el 2050, gracias a posibles reducciones futuras en el costo de los vehículos implementando una curva de aprendizaje tecnológica. Los autores concluyen que los costos de movilidad de los vehículos de hidrógeno comparado a otras tecnologías dependen de la cantidad de kilómetros recorridos por año.

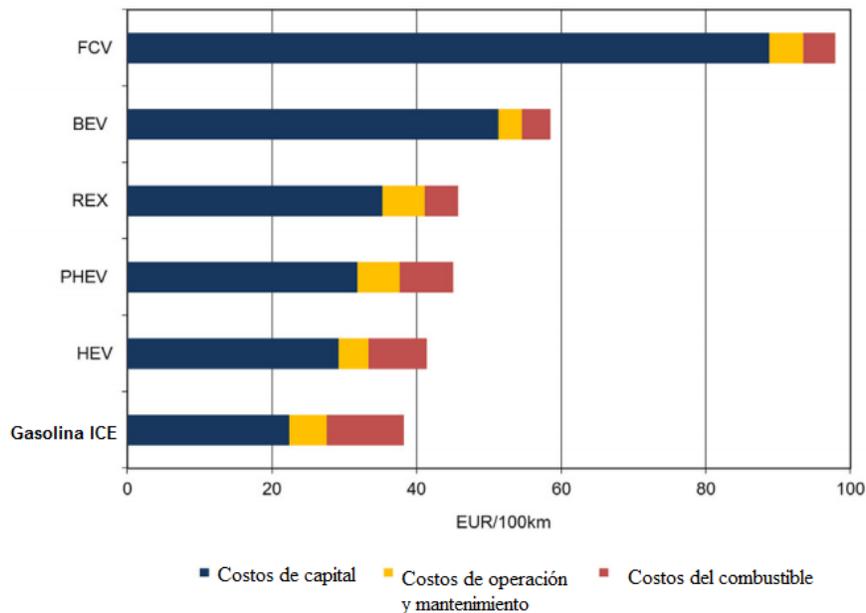


Figura 5. Costo de movilidad diferentes tecnologías 2016

Nota: Adaptado de “Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector”, de Ajanovic, A., Reinhard, H., 2018, *Revista Energy Policy*, p. 286

5. Pregunta de investigación

¿Cuáles son las condiciones bajo las cuales la implementación de vehículos de celda de combustible de hidrógeno es viable económicamente en el contexto colombiano?

6. Hipótesis

La implementación de vehículos de celda de combustible de hidrógeno en Colombia resulta factible a mediano plazo, siempre y cuando se mantenga en el país un alto porcentaje de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, los precios de los combustibles fósiles sean elevados y existan restricciones en movilidad para los vehículos convencionales.

7. Objetivos

7.1 Objetivo general

Realizar un estudio de factibilidad económica para la implementación de vehículos de celda de combustible de hidrógeno en Colombia, obtenido mediante el proceso de electrólisis.

7.2 Objetivos específicos

- Determinar el costo de producción de hidrógeno a través del proceso de electrólisis en sitio, utilizando energía de la red y energía solar fotovoltaica, en Colombia.
- Estimar el costo de ciclo de vida del vehículo de celda de combustible de hidrógeno, vehículo convencional de gasolina y vehículo eléctrico de batería, incluyendo los costos sociales asociados a la contaminación del aire y emisión de GEI.
- Comparar el costo de ciclo de vida de las diferentes tecnologías vehiculares analizadas.
- Analizar el impacto sobre la viabilidad económica en la implementación de la tecnología de vehículos de celda de combustible de variables como: el costo de la tecnología de celda de combustible, el rango de manejo del vehículo, el precio de los combustibles y el precio de la energía.

8. Alcance y limitaciones

El alcance de este estudio se limita a la evaluación de la factibilidad económica de la implementación de la tecnología de celdas de combustión de hidrógeno en vehículos particulares de uso familiar, con un peso aproximado de 1100-1400 kg y capacidad entre 4 y 5 pasajeros en el contexto económico colombiano.

Dada la metodología del estudio, enmarcada desde la perspectiva descriptiva de las variables objeto de estudio, tomadas de indicadores y referencias nacionales como

internacionales, hace que los resultados puedan variar dependiendo del contexto en el cual se aplique. Esto dado a que las variables determinantes en el costo de movilidad, tales como el rendimiento del combustible por kilómetro y el costo de mantenimiento, dependen de las condiciones operativas del automotor, su peso promedio de carga, la altitud del lugar en el cual se movilice, el perfil topográfico de la ruta, el tipo de llantas, el uso del aire acondicionado, entre otras variables. A su vez, el costo de la energía y el costo de los combustibles dependerán también del sitio específico en el cual se desarrolle el análisis.

Sería ideal realizar el estudio desde una perspectiva experimental, en la cual se compararán las diferentes tecnologías vehiculares bajo un mismo contexto y en situaciones operacionales idénticas. Esto permitiría obtener resultados dentro del estudio más confiables y precisos.

9. Estado del arte

9.1 Hidrógeno como combustible

El hidrógeno es el elemento más simple, ligero y de mayor abundancia en el universo. Constituye el 90% del universo y el 60% del cuerpo humano en forma de agua. Sin embargo, este elemento no se encuentra por sí solo, su presencia en el universo se encuentra en combinación con otros elementos, como el oxígeno y el carbono (Hordeski, 2009, pág. 3).

El hidrógeno, es la materia prima en la producción de gasolina, lubricantes, fertilizantes, plásticos, pinturas, detergentes en el sector petroquímico, productos farmacéuticos, hasta su uso como fuente de energía para el sector transporte. La combustión del hidrógeno se considera una combustión limpia, con cero emisiones de carbono hacia la atmósfera, dado que el hidrógeno reacciona completamente con el oxígeno dando paso a la formación de vapor de agua como subproducto. No obstante, “cuando la combustión del hidrógeno se produce en el aire, el cual contiene nitrógeno, óxidos nitrosos pueden generarse al igual que durante la combustión de la gasolina” (Hordeski, 2009, pág. 6).

El hidrógeno puede ser obtenido del agua, del gas natural, de la gasolina, del carbón, el metano, propano, biomasa, y cualquier otro combustible que posea hidrocarburos. La obtención del hidrógeno a partir de cualquier fuente requiere de energía para realizar la separación del hidrógeno de los otros elementos. “La obtención del hidrógeno, a partir del proceso de electrólisis³, requiere de mayores cantidades de energía en comparación de su obtención a través del reformado de hidrocarburos”. (Hordeski, 2009, págs. 6-7). El costo de esta energía hace que usualmente la obtención del hidrógeno sea más costoso que el combustible que se pretende reemplazar.

Si bien el hidrógeno se considera como un combustible limpio, el cual genera cero emisiones de carbono, su proceso de obtención si puede ser contaminante. La obtención del

³ El proceso de fabricación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua fue descubierto por William Nicholson y Sir Anthony Carlisle en U.K en 1800, cuando descubrieron que el hidrógeno y oxígeno pueden ser formados haciendo atravesar una corriente a través del agua (Sasaki, y otros, 2016, pág. 54)

hidrógeno a partir del reformado de hidrocarburos, como el gas natural y la gasolina, genera dióxidos de carbono. Además, si la energía requerida para este proceso proviene de matrices energéticas con alto componente de generación no renovable, tales como: plantas de generación térmica con gas natural, carbón o diésel, la generación de gases contaminantes en la producción de hidrógeno será aún mayor. “La mayor parte del hidrógeno producido en la actualidad, proviene de la reacción del gas natural con vapor a altas temperaturas, con el fin de separar el hidrógeno del carbono. No obstante, la fabricación de hidrógeno a partir de combustibles fósiles no contribuye al problema de agostamiento de estos recursos ni soluciona los problemas de contaminación global” (Hordeski, 2009, págs. 111,112)

Por otro lado, si la obtención del hidrógeno se realiza a través del proceso de electrólisis utilizando energía renovable como, energía hidráulica, solar, eólica, entre otras, su obtención entra a ser parte de un ciclo de vida del combustible 100% limpio.

El reformado de hidrocarburos es el mecanismo más utilizado y económico de obtener el hidrógeno. Si el costo del gas natural en Estados Unidos es de \$4 USD/MMBtu, el costo de obtención del hidrógeno es de \$10 USD/MMBtu en estado gaseoso (GH₂), mientras que el hidrógeno en estado líquido, es del doble, \$20 USD/MMBtu (LH₂), dado los costos incurridos durante el proceso de licuefacción. El hidrógeno también puede ser obtenido a partir de la gasificación del carbón, cuyo costo de obtención oscila alrededor de los \$12 USD/MMBtu (H₂-Carbon).

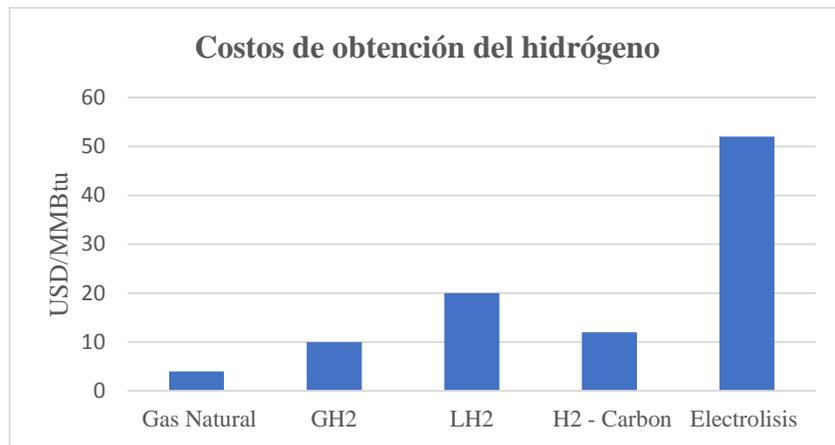


Figura 6. Costos de obtención del hidrógeno a través de diferentes procesos

Nota: Elaboración propia a partir de “*Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power*”, de Hordeski, M., 2009, , p. 112,116, Lilburn, Georgia/Estados Unidos: Fairmont Press

El agua es la materia prima para la obtención del hidrógeno a través del proceso de electrólisis. La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno requiere de grandes cantidades de energía. El costo estimado de producción de hidrógeno en una planta de electrólisis centralizada oscila alrededor de los \$52 USD/MMBtu. Su alto costo de producción es una de las razones por las cuales solo un pequeño porcentaje del hidrógeno a nivel mundial es producido a través de este mecanismo (4-5%); no obstante, cuando los costos externos de usar combustibles fósiles, incluyendo las regulaciones ambientales y los costos de salud pública, son factorizados en el precio de los combustibles convencionales, el hidrógeno resulta ser uno de los combustibles más económicos. (Hordeski, 2009, págs. 8,116).

9.2 Estado de implementación de las celdas de combustible en el mundo

La tecnología de celda de combustible o pila de combustible permite la obtención de energía eléctrica a partir del hidrógeno suministrado y el oxígeno presente en el aire. “Consiste en un proceso de electrólisis inversa, en el cual la energía puede ser extraída directamente sin la necesidad de un proceso de combustión, lo cual la hace un mecanismo de generación de energía limpia y sin contaminantes, en donde el único subproducto es agua potable”. (Sasaki, y otros, 2016, pág. 5). La electricidad es producida a través de un proceso electroquímico similar al de una batería, a diferencia de ella, es que esta nunca pierde su carga, siempre y cuando exista una fuente constante de hidrógeno a través de la celda. Las celdas de combustible pueden funcionar con diferentes combustibles como: la gasolina, el metanol o el etanol, sin embargo, la desventaja de usar estos combustibles es la obtención de CO₂ como subproducto adicional. Por ello, los esfuerzos de desarrollo tecnológico y comercialización se han enfocado principalmente en las celdas de combustible de hidrógeno.

La aplicación de las celdas de combustible de hidrógeno como fuente de generación eléctrica no es novedosa, su primera aplicación se dio en la carrera espacial de los años 60, en la cual la NASA utilizó pilas de combustible de hidrógeno como mecanismo de generación de energía eléctrica para la misión espacial del Apolo. En la actualidad, su aplicación no se limita únicamente a la industria espacial, las celdas de combustible son utilizadas como generadores de emergencia, en sustitución a los generadores diésel convencionales, en centrales de cómputo, recintos operativos y zonas residenciales; así como en la industria automovilística, entre otras.

A continuación, se detallan las principales aplicaciones de esta tecnología referenciadas por Hordeski (2009):

Delta Airlines está utilizando un tractor de arrastre de hidrógeno en el aeropuerto de Orlando. General Motors ha entregado su primer camión de pila de combustible al Ejército de los EE. UU., mientras que la Marina de los EE. UU. planea usar celdas de combustible para la generación de energía de abordó. John Deere está probando módulos de celdas de combustible para aplicaciones en sus tractores.

Dow Chemical y General Motors están instalando hasta 400 celdas de combustible en las plantas de Dow. El hidrógeno es un subproducto natural en Dow y proporcionará 35 megavatios en sus instalaciones. El proyecto HyNor en Noruega incluye planes para construir una carretera de hidrógeno entre Oslo y Stavanger en la costa sur del país, con estaciones de reabastecimiento de combustible espaciadas a lo largo de la ruta. Islandia planea construir una pequeña flota de autobuses de celdas de combustible en la capital, Reykjavikk, y luego convertir lentamente todos los vehículos en la isla, incluidos los barcos de pesca, para crear la primera economía mundial de hidrógeno. DaimlerChrysler está entregando vehículos de celdas de combustible a clientes en California. Shell Oil ha establecido un equipo de Economía del Hidrógeno dedicado a investigar oportunidades en la fabricación de hidrógeno y la tecnología de celdas de combustible en colaboración con otros, incluido DaimlerChrysler. En la Conferencia y Feria Internacional de Tecnologías del Hidrógeno y Celdas de Combustible de 2005, hubo más de 600 vehículos de celdas de combustible. En Europa, se prevé que el mercado potencial para los sistemas de pilas de combustible y de hidrógeno alcanzará varios billones de euros para 2020.

Al igual que Islandia, Japón es uno de los países que ha venido realizando grandes esfuerzos en la aplicación de esta tecnología. En el Plan Nacional de Energía Básica, el gobierno ha declarado que el objetivo de la política incluye el establecimiento de una sociedad a base de hidrógeno antes que otros países, a partir de 2014. Desarrollaron una hoja de ruta que especifica expansiones en los esfuerzos de popularización de las celdas de combustible industriales y de los hogares, reducciones de costos para el combustible de hidrógeno y FCV, y el establecimiento de una cadena de suministro de hidrógeno a gran escala que incluye el transporte de hidrógeno por mar. La introducción de la generación de energía de hidrógeno para fines industriales es un objetivo prioritario y se están desarrollando políticas para posicionar la energía del hidrógeno como una fuente de energía secundaria central para otras aplicaciones también (Sasaki, y otros, 2016, pág. 89).

9.3 Estudios de tecnologías vehiculares con combustibles alternativos

A raíz de la dependencia energética a los combustibles fósiles, el impacto ambiental que estos generan y la preocupación global ante el cambio climático, diferentes estudios se han realizado evaluando la viabilidad de varias tecnologías vehiculares usando combustibles alternativos. En la mayoría de estos estudios se evalúa la eficiencia energética del vehículo, las emisiones de material particulado y gases de efecto invernadero al ambiente y los costos directos tales como, el costo del vehículo, el combustible, costos de operación y mantenimiento.

En 1999, Michael Wang desarrolla un modelo (GREET)⁴ para la estimación de energía y emisiones asociadas a diferentes combustibles y tecnología vehiculares (Wang, The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation (GREET) Model, 1999).

Wang utiliza su modelo para estimar la energía y emisiones GEI en un análisis de pozo a rueda para la tecnología de celda de combustible utilizando diferentes combustibles, en el cual tiene en cuenta los siguientes eslabones en la cadena de suministro: la extracción de la materia prima y su transporte, la producción del combustible, transporte y distribución hasta la operación del vehículo. En su estudio Wang incluye la generación de hidrógeno a partir de la electrólisis a través de dos caminos: energía de la red proveniente de la matriz energética de E.E.U.U (54% carbón, 15% gas natural, 1% crudo, 18% nuclear y 12% hidráulica, geotérmica, entre otras) y a partir de energía renovable en sitio. Su estudio concluye que la energía y nivel de emisiones GEI varía significativamente dependiendo del combustible empleado, y si bien el proceso de obtención del hidrógeno a través de la electrólisis es uno de los menos eficientes energéticamente es el combustible que genera el menor impacto de GEI en el ambiente (Wang, 2002). Hace una propuesta de generación de hidrógeno en cada estación de recarga de combustible lo cual mitiga el impacto económico del desarrollo de la infraestructura requerida para el transporte y distribución del hidrógeno.

⁴ GREET: The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation. Es un modelo de ciclo de vida que evalúa plenamente los impactos energéticos y de emisiones de los combustibles de transporte nuevos y avanzados, el ciclo del combustible desde el pozo hasta la rueda y el ciclo del vehículo a través de la recuperación de materiales y la eliminación de vehículos. (WIKIPEDIA)

Ogden , Williams & Larson (2004) desde el instituto ambiental de la universidad de Princeton realizan una comparación teórica de diferentes tecnologías vehiculares, realizando un análisis del costo de ciclo de vida social, para vehículos de combustión interna de gasolina, vehículos híbridos, vehículos de gas natural comprimido, vehículos diésel, y vehículos de celda de combustible usando gasolina, metanol e hidrógeno, este último, obtenido a partir del gas natural, el carbón y energía eólica. Para la estimación del costo de ciclo de vida social se tiene en cuenta los siguientes costos: el costo de compra del vehículo (asumiendo producción y masificación a gran escala), el costo del combustible (asumiendo el desarrollo de la infraestructura requerida), costos de externalidades en la seguridad de suministro de petróleo y los costos por los daños causados por las emisiones de GEI y material particulado sobre el ciclo de vida del combustible (basados en el modelo GREET desarrollado por Wang y modificado para combustibles no presentes en el modelo, y usando el modelo ExternE, ajustando las estimaciones de costos a la densidad poblacional de Estados Unidos). Los costos asociados al mantenimiento de los vehículos son excluidos al ser considerados equivalentes para todas las opciones evaluadas.

El resultado de esta comparación muestra que las tecnologías vehiculares más avanzadas no son costo competitivas en un análisis de ciclo de vida si no se tienen en cuenta las externalidades asociadas a la contaminación del aire, la emisión de GEI y a los riesgos de seguridad en el suministro de petróleo. Al tener en cuenta estos costos, los vehículos de celda de combustible de hidrógeno son aquellos que presentan el menor costo de ciclo de vida social de las opciones evaluadas.

Colella, Jacobson & Golden (2005) analizan el impacto potencial en el nivel de emisiones y uso de la energía de reemplazar la flota de vehículos de combustible fósiles de los Estados Unidos a vehículos híbridos o de celda de combustible de hidrógeno. El nivel de emisiones y uso de energía para vehículos de celda de combustible es realizado para tres escenarios diferentes: (1) hidrógeno obtenido a partir del reformado de gas natural, (2) hidrógeno obtenido a partir de la electrólisis usando energía eólica e (3) hidrógeno obtenido a partir de la regasificación del carbón. El estudio muestra que el remplazo de vehículos de combustibles fósiles a vehículos de celda de combustible de hidrógeno reduce significativamente el nivel de emisiones y contaminación del aire, incluso por encima de los vehículos híbridos. En los tres escenarios evaluados de vehículos de celda de combustible, se genera una reducción neta en la contaminación de aire, incluyendo óxidos nitrosos, material particulado, amoniaco y monóxido de carbono. La mayor reducción en el calentamiento global dada la emisión de GEI y material particulado es obtenida bajo el escenario 2 estimado en un 23%.

Granovskii, Dincer & Marc (2006) comparan desde una perspectiva tanto económica como ambiental, utilizando diversos datos publicados en otros estudios, los vehículos convencionales, híbridos, eléctricos de batería y de celda de combustible de hidrógeno. Las cuatro opciones de vehículos se compararon según los indicadores económicos (precio del vehículo, costos de combustible y rango de manejo) e indicadores ambientales (contaminación del aire y emisiones de GEI) para los años 2002 a 2004. El ejercicio muestra que los vehículos híbridos y eléctricos de batería funcionan mejor que las otras opciones y que la composición de la matriz energética para la producción de electricidad afecta sustancialmente los impactos económicos y ambientales de los autos

eléctricos. En el caso de los vehículos de celda de combustible de hidrógeno, la obtención del hidrógeno se considera únicamente a través del reformado de gas natural, por lo cual, su contribución a la reducción de emisiones de GEI no representa mayor relevancia frente a las otras opciones.

El laboratorio de energía y ambiente del MIT ha realizado diferentes análisis comparativos, enfocados en la energía consumida durante el ciclo de vida y el nivel de GEI de diferentes tecnologías vehiculares. En su reporte “On the road 2035: Reducing Transportation’s Petroleum Consumption and GHE Emissions” exploran el potencial de nuevos sistemas de propulsión y tecnologías vehiculares para mejorar el consumo de combustible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los próximos 20 años. El informe utiliza un análisis del ciclo de vida para incluir la energía consumida y las emisiones de GEI producidas en la producción del combustible y vehículos, además del consumo y las emisiones durante la operación misma del automóvil. Segmenta el análisis de pozo a rueda en sus componentes: de pozo a tanque y de tanque a rueda, para las diferentes tecnologías analizadas (Bandivadekar, y otros, 2008). Su reporte concluye que los vehículos híbridos ofrecen ventajas importantes frente a los otros vehículos eléctricos (vehículo de baterías y de celda de combustible) al no estar limitados en su rango de manejo y al ser de las tecnologías de mejor eficiencia en el consumo de combustible por kilómetro, en el análisis de tanque a rueda, al igual que el vehículo de batería y de celda de combustible. A su vez, los vehículos híbridos poseen el menor nivel de emisiones de GEI por kilómetro. Sin embargo, vale la pena resaltar, tal como es mencionado en el reporte, los vehículos de eléctricos no representan mayor reducción en las emisiones de GEI en el análisis de pozo a rueda, dado a la composición de la matriz energética de E.E.U.U., cuya

energía proviene principalmente de plantas de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles.

Lee, Yoo, Cha, Lim, & Hur (2009) utilizan la metodología del costo de ciclo de vida para identificar cuando el hidrógeno será económicamente factible en comparación con los combustibles convencionales. La obtención del hidrógeno es evaluada para cuatro fuentes diferentes: (1) hidrógeno obtenido a partir del reformado de gas natural, (2) hidrógeno obtenido a partir del reformado de la nafta, (3) hidrógeno obtenido a partir del gas licuado de petróleo e (4) hidrógeno obtenido a partir del proceso de electrólisis. La gasolina y el diésel son tenidos en cuenta en la comparación. El estudio concluye que a pesar de que la tecnología de celda de combustible de hidrógeno es más costo eficiente en la etapa de consumo de combustible, sigue siendo menos competitiva en el análisis de ciclo de vida dado el alto costo del vehículo.

Thomas (2009) compara los vehículos de celda de combustible de hidrógeno frente a los vehículos eléctricos de baterías. En su análisis demuestra que para un rango superior a 160 kilómetros, el vehículo de celda de combustible es superior al vehículo de baterías en términos de masa, volumen, costo, reducción de GEI, tiempo de tanqueo y eficiencia en el combustible de pozo a rueda utilizando gas natural o biomasa como la fuente de electricidad e hidrógeno.

Sun, Ogden, & Delucchi (2010) realizan una de las comparaciones más completas entre los vehículos de celda de combustible de hidrógeno y los vehículos de gasolina. En su estudio, realizan el comparativo desde una perspectiva de costo de ciclo de vida de la

sociedad, la cual definen como la suma del costo de ciclo de vida para el consumidor y los costos de las externalidades sobre el ciclo de vida del combustible y el vehículo. Este concepto considera los costos económicos directos del vehículo, combustible, su operación y mantenimiento sobre la vida útil del automóvil y los costos asociados a las emisiones de GEI, material particulado y nivel de ruido sobre el ciclo de vida del combustible y la vida útil del automóvil.

En su estudio, los autores demuestran que, a pesar de la gran diferencia inicial en costo entre los vehículos de gasolina y los vehículos de celda de combustible, estos últimos serán eventualmente competitivos a medida que su volumen de producción se incrementa. Se estima que para el 2025, la diferencia en el costo anualizado entre un vehículo FCV y de gasolina será únicamente de USD \$260.

Ruffini & Wei (2018) realizan una de las comparaciones más recientes entre los FCV, los vehículos eléctricos de baterías y los vehículos convencionales de gasolina, asumiendo escenarios de adopción internacionales y tasas de aprendizaje en el estado de California. En el análisis, el costo de la infraestructura requerida para soportar la masificación de los vehículos de hidrógeno es tomada en cuenta, así como, la reducción en el costo de los componentes del vehículo y el valor económico asociado a las emisiones de carbono. La metodología seguida por los autores parte de uno de los escenarios de adopción vehicular más reciente, desde la cual estiman los efectos económicos sobre los costos del vehículo y de la infraestructura necesaria para soportar la flota de vehículos en las redes de estaciones de California. Luego realizan un análisis de costo de ciclo de vida en la cual evalúan el costo del consumidor, incluyendo el costo de compra del vehículo y los

costos asociados a su operación y mantenimiento, así como, los costos externos asociados a las emisiones de carbono.

Los resultados del estudio muestran que para una tasa de aprendizaje del 18%, los FCV se estiman que sean costos competitivos a los vehículos convencionales para el 2025, sin embargo, para una tasa del 8%, el punto de corte de ambas tecnologías se extiende a casi 25 años.

Los autores realizan un análisis de sensibilidad para las siguientes variables con el fin de evaluar su impacto en el costo de ciclo de vida de los vehículos: porcentaje de producción de energía a partir de la electrólisis (100%), costo de la electricidad +/- 20%, incremento del costo del combustible convencional en un 20%, variación en el rango de manejo anual del vehículo (9000 - 12000 millas) y una disminución en la tasa de aprendizaje en la celda de combustible en un 8%. Del análisis de sensibilidad se puede concluir que el mayor impacto es generado por la variación en la tasa de aprendizaje la cual afecta directamente el precio de adquisición del vehículo y los costos en la infraestructura del hidrógeno.

Ajanovic & Reinhard, (2018) analizan la perspectiva económica del uso del hidrógeno como combustible en el sector transporte teniendo en cuenta las siguientes dos consideraciones: (1) integración de fuentes de generación renovable en el sistema eléctrico y (2) sustitución de los combustibles fósiles en el sector transporte. El estudio centra su interés principalmente en analizar el impacto potencial del aprendizaje tecnológico y economías de escala en la producción de hidrógeno a través de la electrólisis. El futuro

económico del vehículo de pasajeros a base de hidrógeno es evaluado, a su vez, a través de una curva de aprendizaje tecnológico para estimar su reducción en costo sobre el tiempo. En el estudio se evidencia la alta dependencia del costo de la producción de hidrógeno al costo de la celda de electrólisis y del precio de la energía, alcanzando precios entre 7 y 12 cent/kWh. Así mismo, se resalta la dependencia del costo de movilidad a la cantidad específica de kilómetros recorridos por año por el vehículo. La principal conclusión es que la perspectiva futura del uso del hidrógeno depende de un marco de políticas que incentiven el uso de dicho combustible, la plena explotación de las economías de escala y el aprendizaje tecnológico para la electrólisis. Sin embargo, la reducción de costos de las celdas de combustible a través del aprendizaje tecnológico es esencial para la competitividad económica del uso de hidrógeno en el transporte.

Como se puede determinar a partir de la revisión de la literatura, el método más común para la comparación de las diferentes tecnologías vehiculares es el análisis de costo de ciclo de vida, y a partir de ello se obtuvieron conclusiones como: 1) la energía y el nivel de emisiones GEI varía dependiendo del combustible empleado (Wang, 2002), 2) el hidrógeno a través de la electrólisis es el combustible que genera el menor impacto de GEI en el ambiente (Wang, 2002), 3) tecnologías como la de los vehículos híbridos, eléctricos e hidrógeno no son costo competitivas si no se tienen en cuenta los costos ambientales (Ogden, Williams, & Larson, 2004), 4) a pesar que la tecnología de celda de combustible de hidrógeno es más costo eficiente en la etapa de consumo de combustible, sigue siendo menos competitiva en el análisis de ciclo de vida dado el alto costo del vehículo (Lee, Yoo, Cha, Lim, & Hur, 2009), 5) a pesar de la gran diferencia inicial en costo entre los vehículos de gasolina y los vehículos de celda de combustible, estos últimos serán eventualmente

competitivos a medida que su volumen de producción se incrementa. Se estima que para el 2025, la diferencia en el costo anualizado entre un vehículo FCV y de gasolina sea mínima (Sun, Ogden, & Delucchi, 2010), 6) para una tasa de aprendizaje de la tecnología del 18%, los costos del FCV se estiman que sean competitivos a los costos vehículos convencionales para el 2025, sin embargo, para una tasa del 8%, el punto de corte de ambas tecnologías se extiende a casi 25 años (Ruffini & Wei, 2018).

Para el caso específico de Colombia, cuyas variables macroeconómicas divergen del contexto económico de los estudios realizados, contando con una matriz energética principalmente renovable, con precios de electricidad, combustibles y costos ambientales diferentes, el objeto de esta investigación toma un carácter pionero en el sector de transporte y energía colombiano. Los estudios realizados hasta la fecha en Colombia sobre la factibilidad del hidrógeno en el sector transporte han abordado la proyección del precio de producción del hidrógeno para el año 2025 en el Valle de Aburra (Mejia & Acevedo, 2013). En este estudio los autores elaboran un modelo económico para estimar el costo de producción de hidrógeno para el sector transporte a partir de la electrólisis del agua con energía de la red y del reformado del gas natural. En la estructura de costos los autores tienen en cuenta el costo de diferentes etapas de la cadena de suministro, tales como: el costo de la energía y gas natural en Colombia, el transporte y distribución del hidrógeno, el costo de almacenamiento y de las estaciones de suministro. El estudio concluye que el costo de producción de hidrógeno en Colombia es muy sensible a las tarifas de energía eléctrica y de gas natural y a los volúmenes de producción. Los costos del hidrógeno obtenido en ambos casos son superiores a los costos de referencia internacional utilizados dentro del estudio. Los autores justifican esta diferencia dado a los elevados precios del gas

natural en Colombia en comparación a las proyecciones internacionales y a los costos de importación e impuesto de la tecnología requerida en el caso de la electrólisis.

Los mismos autores realizan un estimación del costo de una flota de 20 buses con celda de combustible de hidrógeno para el año 2025 en el Valle de Aburra. (Mejia & Acevedo, 2015). En este estudio los autores elaboran un modelo económico para determinar el costo de implementación, de operación del sistema, los costos por kilómetro recorrido y los costos por pasajero de la flota de buses. El estudio utiliza costos proyectados para las celdas de combustible, tomando como referencia el año 2050, y proyectando el rendimiento por km/kgH₂ de los buses. El costo del hidrógeno utilizado corresponde a su estudio anterior, en el cual determinan el costo del hidrógeno a través del proceso de reformado del gas natural y de electrólisis utilizando energía de la red. Los resultados obtenidos del estudio muestran una factibilidad económica en el costo obtenido por pasajero bajo la tecnología evaluada. El costo utilizando energía de la red para producir hidrógeno oscila entre COP\$478-\$773 / pasajero y el costo utilizando hidrógeno a partir del gas natural oscila entre COP\$596-\$619/pasajero.

En el estudio no se tienen en cuenta los costos ambientales asociados a las emisiones del uso del combustible ni presenta comparaciones frente otros tipos de tecnologías vehiculares como la convencional de gasolina, vehículos eléctricos de baterías, entre otros.

10. Marco Teórico

10.1 Análisis de Costo de Ciclo de Vida

El análisis de costos de ciclo de vida LCCA (por sus siglas en inglés Life Cycle Cost Analysis) es un método económico para la evaluación de proyectos en el que son considerados todos los costos en los que se incurren, desde la compra del activo hasta el final de la vida útil del mismo. Es decir, este método tiene en cuenta los costos de inversión, operación, mantenimiento y disposición final del proyecto para cada una de las alternativas evaluadas, y a partir de esta información, se toma la decisión de la mejor opción costo-eficiente (Fuller & Petersen, 1995).

El Costo de Ciclo de Vida LCC (por sus siglas en inglés Life Cycle Cost) es la sumatoria de los costos que intervienen en el ciclo de vida de un activo. Algunos conceptos clave para la comprensión del LCC son los siguientes (Fuller & Petersen, 1995):

- Costos de inversión inicial: Costos en los que se incurre para obtener un activo.
- Costos de operación: Costos necesarios para mantener operando el activo.
- Costos de mantenimiento y reparación: Costos para garantizar que los activos cumplan con sus funciones.
- Costo de la energía: Costo relacionado con el consumo de energía que se requiere para el funcionamiento del activo.
- Costos ambientales: Costos para prevenir, mitigar o remediar la degradación ambiental.
- Costos Iniciales: Costos incurridos antes de utilizar el activo.

- Costos Futuros: Costos incurridos durante la utilización del activo.
- Período de estudio: Periodo de tiempo durante el cual se incurre en costos.
- Tasa de descuento: Tasa de interés que refleja el valor del dinero en el tiempo del inversionista.
- Monedas constantes: “Valores de poder adquisitivo uniforme, atados a un año de referencia y exclusivo de una precio general de depreciación, de inflación o deflación” (Fuller & Petersen, 1995). Las monedas constantes deben usarse cuando se usa la tasa de descuento real al calcular el Valor Presente Neto.
- Monedas corrientes: “Valores de poder adquisitivo no uniformes, incluida la inflación general de precios o deflación, en la que se indican los precios reales” (Fuller & Petersen, 1995). Las monedas corrientes deben usarse cuando se usa la tasa de descuento nominal al calcular el Valor Presente Neto.
- Valor residual o de salvamento: Valor neto del activo al final de un período de estudio.
- Valor presente: “Es el valor equivalente en el tiempo de los flujos de efectivo pasados, presentes o futuros, tal como en el principio del año base” (Fuller & Petersen, 1995).

El Valor presente Neto (VPN) se emplea para evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El objetivo es establecer si con el proyecto se maximiza la inversión, y su cálculo depende de variables como la inversión inicial, costos durante la operación del activo, flujos netos de efectivo, la tasa de descuento y la duración del proyecto.

El cálculo del valor presente emplea la tasa de descuento y el tiempo en que un costo fue o será incurrido para así poder determinar el valor presente en el año base del período de estudio.

Los costos futuros se dividen en dos categorías: Costos únicos y costos recurrentes. Los costos únicos no ocurren todos los años durante el período de estudio. Los costos recurrentes se dan todos los años durante el período de estudio (Alaska Department of Education & Early Development, 1999).

Para calcular el valor presente de costos únicos futuros se emplea la siguiente fórmula:

$$VP = A_t * \frac{1}{(1 + d)^n}$$

Donde:

VP : Valor Presente

A_t : Cantidad de costo único en el tiempo t

d : Tasa de descuento real

n : Tiempo expresado en número de años

Para calcular el valor presente de los costos recurrentes futuros, se emplea la siguiente fórmula:

$$VP = A_0 * \frac{(1 + d)^t - 1}{d * (1 + d)^t}$$

Donde:

VP : Valor Presente

A_0 : Cantidad de costo recurrente

d : Tasa de descuento real

n : Tiempo expresado en número de años

10.2 Costo Nivelado de Electricidad - LCOE⁵

El costo nivelado de energía es una metodología utilizada para comparar diferentes tecnologías de generación de electricidad, independiente de la capacidad de generación, del tiempo de vida de la planta, el costo de capital y el riesgo. “El LCOE representa el ingreso promedio por unidad de electricidad generada que se requeriría para recuperar los costos de construir y operar una planta generadora durante su ciclo de vida y servicio financiero asumido. El LCOE a menudo se utiliza como una medida para comparar la competitividad global de diferentes tecnologías generadoras” (EIA. US Energy Information Department, 2019).

El LCOE se calcula como la razón entre el valor presente neto de los costos durante la vida útil de la planta de generación y el valor presente neto de la energía generada sobre el mismo periodo. Los costos claves para el cálculo incluyen: los costos de capital, costos de combustibles, costos fijos y variables de operación y mantenimiento.

⁵ LCOE: Levelized Cost of Electricity

$$LCOE = \frac{\text{Suma de los costos durante la vida util}}{\text{Suma de la electricidad producida durante la vida util}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

I_t : Inversiones realizadas en el periodo t

M_t : Costos de operación y mantenimiento en el periodo t

F_t : Costos de combustible en el periodo t

E_t : Electricidad generada durante el periodo t

r : Tasa de descuento

n : Vida util de la planta o sistema de generación.

10.3 Incentivos Fiscales Vehículos Eléctricos

El Gobierno Nacional Colombiano, por medio de las siguientes leyes busca promover la adquisición de vehículos eléctricos o híbridos ofreciendo un beneficio fiscal respecto a los vehículos de combustible convencionales:

La Ley 1819 de 2016, Artículo 185 donde se modifica el artículo 468-1 del Estatuto Tributario, estipula que dentro de los bienes gravados con la tarifa del cinco por ciento (5%), se encuentran los inversores de carga eléctrica para uso en vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables; vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables para el transporte de 10 o más personas, incluido el conductor; vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables concebidos principalmente para el transporte de personas, incluidos

los vehículos de tipo familiar y los de carreras; y los vehículos automóviles eléctricos, híbridos e híbridos enchufables para el transporte de mercancías. (Congreso Colombiano, 2016)

En el Decreto 1116 de 2017 se establece, hasta el 2027, un gravamen arancelario para la importación anual de vehículos eléctricos del 0%, y para vehículos híbridos del 5% (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2017). Esta modificación parcial al arancel de aduanas establece cupos para la importación de la siguiente manera:

Tabla 1

Cupos anuales de vehículos con gravamen arancelario del 0% y 5%

Vehículo	Arancel	Años	Cupo
Totalmente eléctrico	0%	2017 - 2019	1,500
		2020 - 2022	2,300
		2023 - 2027	3,000
Híbridos	5%	2017 - 2019	1,500
		2020 - 2022	2,300
		2023 - 2027	3,000

Nota: Elaboración propia a partir de “Decreto 1116 de 2017”, Presidente de la República de Colombia, 2017, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo

En el Estatuto Tributario Nacional, Artículo 512-5, se establecen los vehículos que no causan impuesto nacional al consumo, entre ellos se encuentran los vehículos eléctricos. Con respecto a los vehículos híbridos tienen una tarifa de impuesto al consumo del 8% si el valor de importación es menor a US\$30,000 y si es superior a ese monto, el impuesto es de 16%.

Actualmente en Colombia se está trabajando en el proyecto de Ley 075 de 2017, el cual promueve el uso de vehículos eléctricos por medio de incentivos como: Impuesto sobre el vehículo inferior al 1% del valor comercial; descuento mínimo del 50% sobre la revisión técnico-mecánica; el costo del registro inicial del vehículo eléctrico no podrá ser superior al 50% del valor habitual que se cobre a los vehículos de combustión; tasas diferenciadas de estacionamiento; eliminación absoluta de restricción vehicular; entre otros (Congreso Colombiano, 2017).

10.4 Ley 1715 de 2014

La ley 1715 de 2014 expedida por el gobierno nacional colombiano, tiene como objetivo regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. En ella se establece el marco legal y regulatorio para “la promoción del aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda” (Congreso Colombiano, 2014, pág. 1).

La ley 1715 de 2014 define las fuentes no convencionales de energía (FNCER) como aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.

Dentro de los incentivos a la generación de energías no convencionales, el gobierno decreto que aquellos obligados a declarar renta, que realicen investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCER, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el 50% del valor total de la inversión realizada.

El valor a deducir por este concepto, en ningún caso podrá ser superior al 50% de la renta líquida de la contribuyente determinada antes de restar el valor de la inversión. Como parte de los incentivos tributarios expedidos por el gobierno en esta ley se encuentra la exclusión del IVA a los equipos, maquinaria, elementos y servicios nacionales o importados que se destinen a la pre inversión e inversión, para la producción y utilización de energía a partir de las FNCER, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos. Adicionalmente, Las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de la presente ley sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCER gozaran de exención del pago de los Derecho Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre inversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes.

El ultimo instrumento fiscal decretado por la ley 1715 de 2014 para la promoción de las FNCER consiste en el régimen de depreciación acelerada en la actividad de generación a partir de FNCER. LA depreciación acelerada será aplicable a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la pre inversión, inversión y operación de la generación con FNCER, que sean adquiridos y/o construidos, exclusivamente para ese fin. Para estos

efectos, la tasa anual de depreciación será no mayor de 20% como tasa global anual. La tasa podrá ser variada anualmente por el titular del proyecto, previa comunicación a la DIAN, sin exceder el límite señalado (Congreso Colombiano, 2014, pág. 12).

10.5 Ley 1964 de 2019

Esta Ley tiene por objeto promocionar el uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones, para así contribuir con la movilidad sostenible, reducir las emisiones de contaminantes y de GEI. Para tal efecto, la Ley establece que:

- El impuesto sobre los vehículos eléctricos no podrá superar el uno por ciento (1%) del valor comercial del vehículo.
- Descuento en la revisión técnico-mecánica.
- Descuento del diez por ciento (10%) en las primas del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT)
- Estos vehículos tienen exención de la restricción a la circulación vehicular (Pico y placa y día sin carro)
- Entidades públicas y establecimientos comerciales que ofrezcan al público sitios de parqueo, deberán destinar mínimo dos por ciento (2%) del total de la plaza de parqueo para vehículos eléctricos y de cero emisiones (parqueaderos preferenciales).

11. Metodología

La herramienta principal de comparación entre las tecnologías vehiculares que hacen parte del alcance de esta investigación es el costo de ciclo de vida del vehículo, el cual se calculará a través de dos costos principales: el costo social de ciclo de vida determinado a partir de las emisiones asociadas al combustible y al vehículo; y el costo de ciclo de vida del consumidor, determinado a partir de los costos del combustible, el precio de compra del vehículo y los costos de operación y mantenimiento durante la vida útil del automóvil. Adicionalmente, la disponibilidad en tiempo del uso del vehículo es un factor relevante en la estimación del costo del consumidor en el caso colombiano, esto dado a las restricciones de movilidad que existen en las principales ciudades del país para los vehículos convencionales de combustibles fósiles.

11.1 Costo Social de ciclo de Vida

Para la estimación de las emisiones durante el ciclo de vida del vehículo y del combustible se utilizará el modelo GREET patrocinado por el departamento de eficiencia energética y energías renovables del departamento de energía de EE.UU (Argonne National Laboratory). Las variables utilizadas por el modelo serán ajustadas al contexto nacional, como el factor de emisiones asociado a la matriz energética nacional y las emisiones asociadas a la combustión de la gasolina comercializada en el país.

El costo social por contaminación del aire y emisión de gases de efecto invernadero, será tomada del modelo ExternE (Dones, y otros, 2015), el cual estima los costos ambientales asociados para Europa. Estos valores serán ajustados para la densidad poblacional de Colombia.

11.2 Costo de ciclo de Vida del Consumidor

Costo del combustible: El costo del combustible asociado al vehículo FCV, será el que resulte de estimar la producción en sitio de hidrógeno a través del proceso de electrólisis utilizando energía de la red y energía solar fotovoltaica. En el caso de la energía solar fotovoltaica, la estimación del precio de electricidad se realizará a través de la herramienta del LCOE ajustándola a los beneficios fiscales de la ley 1715 para el desarrollo de esta tecnología. Al costo asociado a la tecnología de las celdas de electrólisis, se aplicará una curva de aprendizaje tecnológico que permita estimar su costo a futuro.

Para los vehículos eléctricos de baterías, el costo del combustible es equivalente al precio de la energía de la red utilizado para cargar la batería, y en el vehículo convencional de gasolina, el precio utilizado será el precio de comercialización de la gasolina en las estaciones de combustible.

Costo de operación y mantenimiento: Los costos de operación, excluyendo el combustible, tales como, impuestos, seguros y licencias, serán estimados a partir de los valores comerciales y valores regulados para el contexto colombiano.

Por su parte, los costos de mantenimiento serán tomados de parámetros referenciados en los estudios mencionados en el estado del arte e indexados a su respectiva tasa de cambio.

Costo del vehículo FCV: El costo del vehículo FCV partirá de su valor actual de mercado, al cual se le aplicará una curva de aprendizaje tecnológico a sus componentes de acuerdo con el escenario de adopción de dicha tecnología tomado de la hoja de ruta de la tecnología de hidrógeno y celdas de combustible de la IEA (IEA: International Energy Agency, 2015)

Costo del vehículo Eléctrico de Batería: El costo del vehículo BEV partirá al igual que la tecnología FCV de su valor actual de mercado, al cual también se le aplicará una curva de aprendizaje tecnológico de acuerdo con el escenario de adopción tomado de la perspectiva global para vehículos eléctricos de la IEA (IEA: International Energy Agency, 2018).

Costo del vehículo Convencional de Gasolina: el costo del vehículo convencional de gasolina, ICEV, será tomado del valor comercial del automóvil con características tales como: peso, velocidad máxima, capacidad de pasajeros, entre otras, semejantes a los vehículos FCV, BEV evaluados. A esta tecnología no se le aplicara curva de aprendizaje tecnológico dado a que es una tecnología consolidada en el mercado y con largos años de implementación.

Disponibilidad de Tiempo del Vehículo: Para la disponibilidad de tiempo del vehículo se tomará el promedio en horas, de pico y placa, en las principales ciudades del país en las que rige esta medida.

A continuación, se describe la estrategia que se seguirá para la estimación del costo de ciclo de vida de los vehículos objeto de este proyecto, con el propósito de cumplir con los objetivos de la investigación.

- Costo de ciclo de vida del vehículo de celda de combustible de hidrógeno

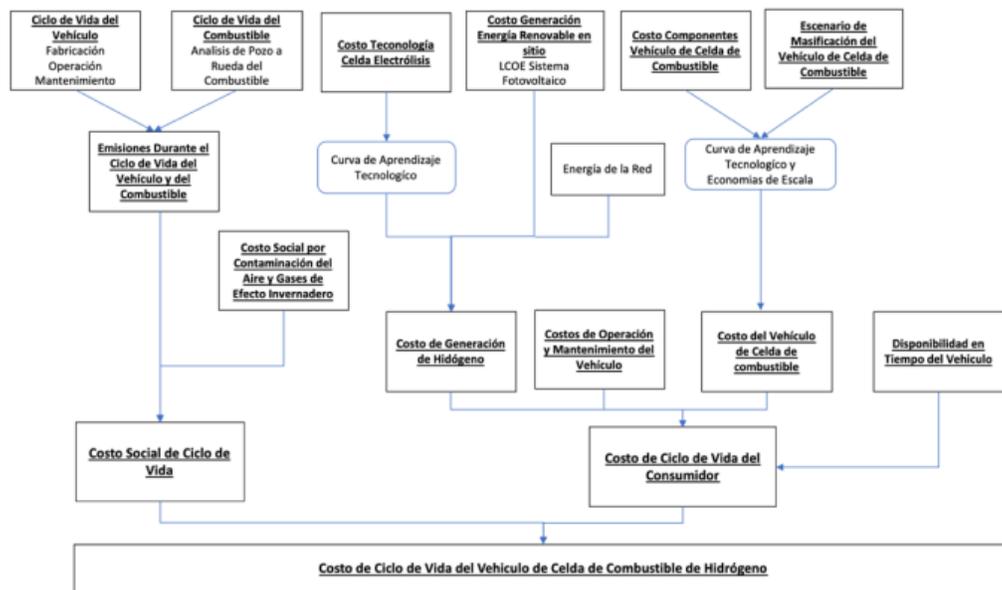


Figura 7. Costo de ciclo de vida FCEV

Nota: Elaboración propia, 2019

- Costo de ciclo de vida del vehículo eléctrico de batería

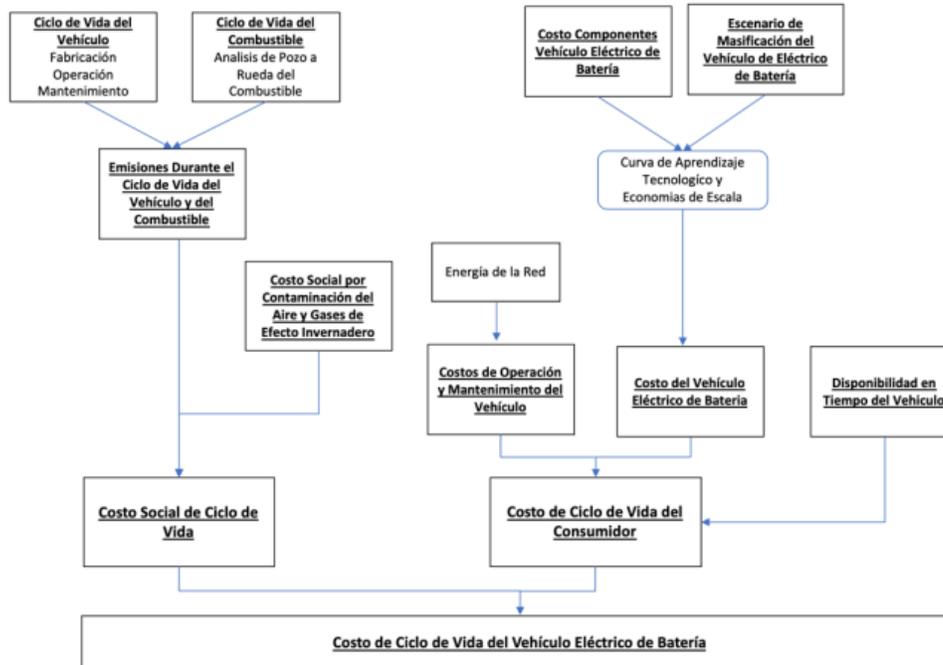


Figura 8. Costo de ciclo de vida BEV

Nota: Elaboración propia, 2019

- Costo de ciclo de vida del vehículo convencional de gasolina

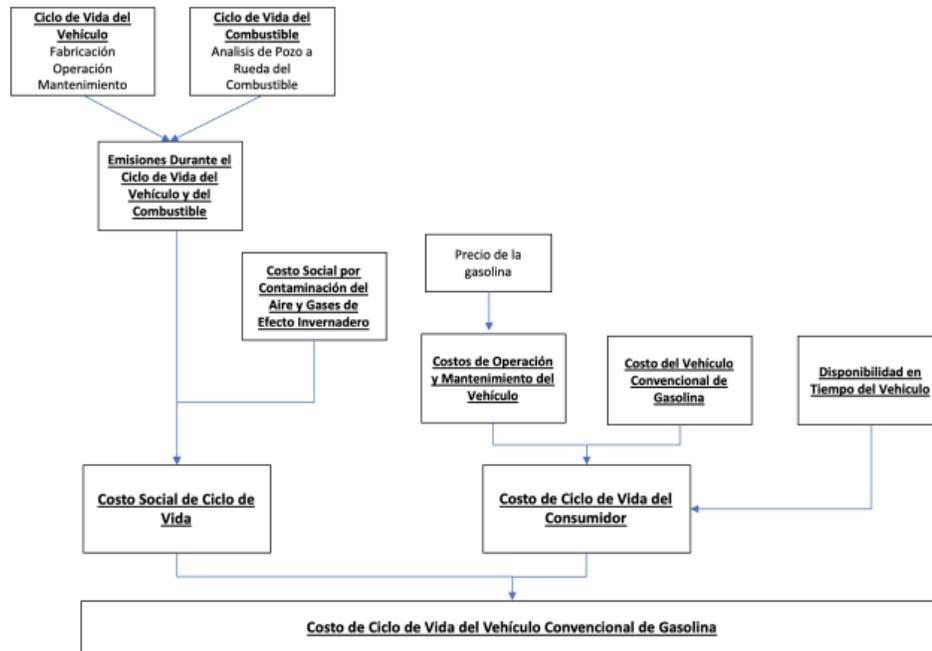


Figura 9. Costo de ciclo de vida ICEV

Nota: Elaboración propia, 2019

12. Resultados

11.1 Costo de producción del hidrógeno a través del proceso de electrólisis

Para la estimación del costo de producción de hidrógeno a través del proceso de electrólisis se tienen en cuenta dos aspectos principales, la inversión de capital en el sistema de producción, compuesto principalmente por la tecnología de celda de electrólisis, y el costo operativo de producción de hidrógeno, el cual, dada la cantidad de energía demandada en la producción de un kilogramo de H₂, el costo del kWh utilizado resulta determinante en la estimación del costo total.

Para la estimación se utiliza la eficiencia de las unidades de electrólisis comerciales tomada de (Ruffini & Wei, 2018, pág. 334), las cuales requieren de 44 kWh por kilogramo de hidrogeno. La inversión de capital de la planta de producción de hidrógeno es tomado (Ajanovic & Reinhard, 2018, pág. 283) con base a una capacidad de 500 kW.

El costo de producción de un kilogramo de hidrógeno será entonces:

$$\text{CostoProducciónH2}_{(COP/kg)} = CAPEX_{(COP/kg)} + \text{EficienciaElectrolisis}_{(kWh/kg)} \times \text{CostoEnergía}_{(COP/kWh)}$$

Tabla 2

Parámetros Estimación Costo Producción Hidrógeno

Parametro	Unidad	Valor
LCOE Solar Fotovoltaica ¹	COP/kWh	282.00
Energía Red ²	COP/kWh	410.00
CAPEX ³	COP/Kg	3,945.00

Nota: Elaboración propia, 2019

¹Costo nivelado de energía fotovoltaica aplicando beneficios de ley 1715 y tasa interna de retorno para el sector de distribución de energía eléctrica en Colombia, 11.8%. (Comisión de Energía y Gas, 2018) – ANEXO 1

²Costo de energía regulada por la comisión de regulación de energía y gas (CREG) enero 2019, para el sector industrial conectado a un nivel de tensión 2 (11.4 y 13.2 kV).

³Costo de inversión asociado a la producción de un kilogramo de H2 utilizando la tasa interna de retorno del sector de distribución de energía eléctrica en Colombia, 11.8%.

De esta manera se puede estimar entonces que el costo de producción de un kilogramo de hidrogeno es de \$16.353 COP/kg generado a partir de energía solar fotovoltaica en sitio y de \$21.984 COP/Kg utilizando energía de la red. El costo de producción de hidrógeno a partir de energía de la red es similar al obtenido por Hordeski (2009, págs. 8,116) a partir de plantas centralizadas de electrólisis y un poder calorífico entre 120-141 MJ/kg.

11.2 Costo Social de ciclo de Vida

El costo social de ciclo de vida de un vehículo está determinado por la cantidad de emisiones asociadas durante su ciclo de vida y el costo social asociado a cada una de ellas. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), material particulado y gases causantes de la contaminación atmosférica varían principalmente del combustible empleado por el vehículo. Para la estimación de las emisiones durante el ciclo de vida de cada tecnología, análisis de pozo a rueda (WTW), se utilizó el modelo GREET patrocinado por el departamento de eficiencia energética y energías renovables del departamento de energía de EE.UU (Argonne National Laboratory). El modelo fue ajustado de acuerdo con las propiedades fisicoquímicas de la gasolina empleada en Colombia, así como al factor de emisiones del Sistema Interconectado Nacional, para aquellas tecnologías que emplean energía de la red.

Los resultados de las emisiones de GEI y contaminación atmosférica para el vehículo convencional de gasolina, el vehículo de celda de combustible de hidrogeno y el vehículo eléctrico de batería se resume en la tabla 3.

Tabla 3

Factor emisiones para vehículos ICEV, FCV y BEV en el contexto Colombiano

WTW (well to wheel)	Unidad	ICEV		FCV		BEV	
		Gasolina	Solar	Energía Red	Solar	Energía Red	
GEI	[gCO ₂	433.592	0.000	103.517	0.000	94.723	
NOx: Total	[g/mi]	0.290	0.000	0.066	0.000	0.060	
PM10: Total	[g/mi]	0.040	0.018	0.029	0.018	0.021	
PM2.5: Total	[g/mi]	0.021	0.005	0.009	0.005	0.007	
SOx: Total	[g/mi]	0.101	0.000	0.179	0.000	0.164	
VOC: Total	[g/mi]	0.385	0.000	0.011	0.000	0.010	

Nota: Elaboración propia, 2019

¹ Factor de emisiones GEI calculado de acuerdo a la energía requerida por milla del modelo GREET (5511 BTU/mi) y las emisiones de la gasolina convencional, 74570 KgCO₂eq/TJ, tomado del factor de emisiones para los combustibles colombianos del sistema de información ambiental minero energético SIAME. Los parámetros de NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO_x y VOC fueron indexados de acuerdo a la proporción de emisiones de GEI de la gasolina colombiana frente a las emisiones de GEI de la gasolina utilizada por el modelo GREET (Combustible de EE.UU).

² Las emisiones asociadas al vehículo eléctrico de batería fueron ajustadas al factor de emisiones del Sistema Interconectado Nacional Colombiano, 0.38 TonCo₂/MWh, frente a 0.707 TonCo₂/MWh de la matriz energética de EE.UU.

³ Dado que el modelo GREET no considera factor de emisiones para la tecnología FCV a partir de energía de la red, las emisiones para este escenario fueron tomadas del escenario del vehículo BEV con energía de la red Colombiana y ajustada a la mayor proporción de energía requerida (BTU/mi) del vehículo FCV frente al vehículo BEV.

El factor de emisiones de GEI y contaminación atmosférica para los vehículos de gasolina en Colombia son en promedio un 5% mayores a los vehículos del mismo combustible en Estados Unidos, esto dado a la diferencia de composición fisicoquímica de la gasolina entre ambos países. Sin embargo, para las tecnologías vehiculares FCV y BEV alimentadas a partir de energía de la red, el factor de emisiones es 46% menor frente a vehículos de la misma tecnología en Estados Unidos. Esta diferencia radica en el alto porcentaje de generación renovable en la matriz energética de Colombia.

Cuando se compara el vehículo FCV frente al BEV, ambos alimentados por energía de la red, el factor de emisiones del FCV es un 9% mayor, dado a que requiere de un mayor gasto energético por la obtención del hidrógeno. No obstante, cuando la energía proviene de una fuente 100% renovable, como la solar fotovoltaica, esta diferencia en emisiones se anula.

Los resultados de este análisis permiten validar las conclusiones presentes en la literatura, en la que autores como Wang (2002), establecen que la adopción de vehículos

FCV y BEV logra reducciones significativas en el ozono y material particulado frente a vehículo de gasolina.

Para la estimación del costo social por contaminación del aire, se tomó como referencia el costo del modelo ExternE (Dones, y otros, 2015), el cual estima los costos ambientales asociados para Europa y se indexaron para la densidad poblacional de Colombia. Para el costo social de emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, se tomó como referencia el costo social estimado por Ruffini & Wei para California (2018).

Los resultados se resumen en la tabla 4.

Tabla 4

Costo social de emisiones para Colombia

Parámetro	Unidad	Valor
CO ₂ e	(USD/Ton)	49.00
SO ₂	(Eur/ton)	189.64
NO _x	(Eur/ton)	187.64
PM ₁₀	(Eur/ton)	756.42
PM _{2.5}	(Eur/ton)	1,260.75
VOC	(Eur/ton)	72.53

Nota: Elaboración propia, 2019

11.3 Costo de ciclo de vida del consumidor

Para llevar a cabo el análisis de costos de ciclo de vida del consumidor de los tres tipos de vehículos ICEV, BEV y FCV se tuvieron en cuenta los siguientes supuestos e información:

Un vehículo familiar en promedio recorre 10,000 millas al año, tiene una vida útil de 10 años y el costo de oportunidad de un consumidor se asume que es del 10%.

Costo del vehículo: Para el vehículo convencional de gasolina se tomó como referencia el valor comercial en Colombia de un Toyota Corolla SE-G modelo 2019, el cual es de COP\$ 74, 400,000 (Reyes, 2018) . El vehículo de referencia para un BEV es un Nissan Leaf modelo 2019, el cual tiene un valor comercial de COP\$ 148, 000,000 (Motor, 2019). Respecto al FCV, el vehículo de referencia es un Toyota Mirai 2019 cuyo valor es de COP\$190, 155,936 (Edmunds, 2019).

Costo del combustible: Para los ICEV, se tuvo en cuenta el precio promedio de la gasolina en el mes de Octubre de 2019, según el Ministerio de Minas y Energía del Gobierno Colombiano, el cual fue equivalente a \$ 9,410 COP/gal. Dado que un Toyota Corolla recorre 40 millas por galón, se calcula que para recorrer 10,000 millas el vehículo requiere 250 galones de gasolina al año, lo que equivale en costo de combustible a COP \$2,352,486.

De las especificaciones de un Nissan Leaf (Motor, 2019) se obtiene que un BEV tiene una autonomía de aproximadamente 313 km/kWh y una batería de 40 kWh, por lo cual para recorrer 10,000 millas requiere 51 ciclos de carga equivalentes a 2,057 kWh. El precio de la energía solar y de la red es mencionada en la tabla 2. Parámetros Estimación Costo Producción Hidrogeno. De lo anterior se calcula que el costo de combustible anual de un BEV que se carga mediante energía solar es de COP\$ 579,969, y si se carga por energía de la red el costo es de COP\$843,232.

Para estimar el costo de combustible de un FCV, se tiene en cuenta la autonomía de este tipo de vehículos, la cual como referencia será la del Toyota Mirai 2019, es decir 72 millas / kg. Para recorrer 10,000 millas se necesitan 139 kg. de hidrógeno lo cual multiplicado por la cantidad de energía que se requiere para producir un kg. de hidrógeno, se obtiene que los kWh anuales necesarios son 6,389. Si estos kWh se obtienen de energía solar, el costo del combustible es de COP\$1,801,667, más el costo de la infraestructura para producir los 139 kg de H₂, el cual es COP\$547,831, para un total de COP\$2,349,498. Si la energía se obtiene de la red, el costo de combustible será el mismo de infraestructura más COP\$2,619,444 para un total de COP\$3,167,276.

Costo de operación y mantenimiento: Los costos de reparaciones y mantenimiento son tomados del artículo *Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach* de donde se obtiene que a una tasa de cambio 3,251 COP/US (Banco de la República de Colombia, 2019) para recorrer 10,000 millas anuales, los costos de mantenimiento para un ICEV son de COP\$2, 145,349, para BEV y FCV son de COP\$1, 560,254. Así como se muestra en la tabla 5:

Tabla 5

Costo de mantenimiento y reparaciones por vehículo para recorrer 10,000 millas

Unidad	ICEV	FCEV	BEV
US\$/Milla	0.066	0.048	0.048
COP\$/Milla	215	156	156
COP\$/ 10,000 millas	2,145,349	1,560,254	1,560,254

Nota: Elaboración propia, 2019

Relacionado con costo del impuesto vehicular se paga según el avalúo comercial del vehículo, en el caso del ICEV de acuerdo con el carro seleccionado para la evaluación (Toyota Corolla) se cancelaría una tarifa del 2.5% (Secretaría Distrital de Hacienda - Alcaldía de Bogotá, 2019). Para los BEV y FCV la tarifa sería de máximo un 1% según la Ley 1964 de 2019. El impuesto se paga año vencido, y el avalúo comercial es tomado de la Secretaria Distrital de Hacienda.

El costo del SOAT es tomando de las tarifas de SOAT 2019 (Seguros Mundial, 2019) el cual, de acuerdo al tipo de vehículo, equivale a COP\$387,050 para el 2019. Según el artículo 4 de la Ley 1964 de 2019, los vehículos BEV y FCV tienen un descuento del 10%, por lo tanto el costo del SOAT sería de COP\$348,930.

Disponibilidad de tiempo del vehículo: El costo de disponibilidad de tiempo del vehículo se estima calculando la cantidad de horas que tiene un año y descontando las horas de restricción vehicular que tienen los vehículos de gasolina. Un ICEV tiene disponibilidad de 7,850 horas anuales, mientras los BEV y FCV no tienen restricción por lo tanto tienen disponibilidad de 8,760 horas año.

Para estimar los costos en los próximos años de combustible, mantenimiento y SOAT, se toma la proyección del Índice de Precios al Consumidor para los próximos años del Banco de la República y se indexan los costos anualmente. Respecto al impuesto vehicular se estima que los ICEV pierden anualmente el 8% de su valor comercial, y los BEV y FCV pierden un 7%. Estos porcentajes son calculados de la tabla de avalúo comercial de la

Secretaria Distrital de Hacienda de acuerdo con los valores que tienen para estos tipos de vehículos en los últimos años.

11.4 Comparación de costos de ciclo de vida de las tres tecnologías

Los costos de ciclo de vida por tecnología se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6
Costos de ciclo de vida por vehículo

Valor presente Neto COP\$, 10 Años, @10%						
Tipo de vehículo	ICEV		BEV		FCV	
Fuente energía	Gasolina	Solar	Red	Solar	Red	
Costo social del ciclo de vida	4,154,229	5,444	960,445	5,444	1,049,607	
Costo del vehículo	74,400,000	148,000,000	148,000,000	190,155,936	190,155,936	
Costo del combustible	17,982,063	4,433,278	6,445,547	17,959,222	24,210,197	
Costo de operación y Mantenimiento	26,965,287	15,666,580	15,666,580	15,666,580	15,664,762	
Costo de ciclo de vida del consumidor	119,347,350	168,099,859	170,112,127	223,781,738	230,030,895	
Costo de ciclo de vida del vehículo	123,501,579	168,105,302	171,072,572	223,787,182	231,080,502	
Disponibilidad de tiempo del vehículo	48,235	53,826	53,826	53,826	53,826	
Valor presente Neto/Disponibilidad en tiempo (COP/h)	2,560	3,123	3,178	4,158	4,293	

Nota: Elaboración propia, 2019

De acuerdo con tabla 6 se evidencia que los vehículos a gasolina tienen un menor costo de ciclo de vida debido a la menor inversión en el vehículo, lo cual compensa el mayor costo social y de mantenimiento, y la menor disponibilidad en tiempo versus las otras tecnologías.

Respecto a las otras dos tecnologías, el costo de ciclo de vida de los vehículos eléctricos es significativamente menor que los vehículos de celda de hidrógeno, lo cual se debe principalmente a la menor inversión en el vehículo y al menor costo en combustible,

pues se requieren menor cantidad de kWh para cargar la batería en los BEV. En cuanto el costo de vida social, usar energía solar en los dos tipos de vehículos, tiene un costo significativamente menor que usar energía de la red debido a la menor cantidad de emisiones.

El costo de ciclo de vida obtenido para estos vehículos es similar al ejercicio realizado por Ajanovic y Reinhard (2018), figura 5, en donde el vehículo ICEV es el que presenta menor costo de movilidad, seguido por el vehículo BEV y el de mayor costo el FCV. De la estructura de costos, el alto costo de inversión de los vehículos BEV y FCV no permite que sean costos competitivos frente al vehículo de gasolina.

11.5 Sensibilidades

11.5.1 Precio del vehículo

Con el fin de representar la dinámica de los precios de las tecnologías vehiculares en el análisis a largo plazo, se utiliza el concepto de curva de aprendizaje. “Esto se basa en el fenómeno observado empíricamente de que los costos unitarios a menudo tienden a disminuir en un porcentaje constante por cada duplicación del volumen de producción acumulado” (Ruffini & Wei, 2018, pág. 331). Este fenómeno se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$IC_{(t1)} = IC_{(t0)} \times \left(\frac{x_t}{x_{t0}} \right)^{-b}$$

Donde $IC_{(t_1)}$ es el costo de inversión de la tecnología, b representa la tasa de aprendizaje, y $IC_{(t_0)}$, el costo de inversión de la tecnología en el tiempo 0. X , representa la capacidad acumulada en el tiempo t_1 y t_0 .

En este análisis se utilizó este enfoque para evaluar la reducción de los costos de capital de los componentes de los vehículos de celda de combustible y de los vehículos eléctricos.

Tabla 7
Tasas de aprendizaje de la tecnología vehicular

Componente	Tasa aprendizaje	
	FCV	BEV
Celda de Combustible	18%	-
Tanque Hidrogeno	15%	-
Batería	8%	8%
Motor Eléctrico	10%	10%

Nota: Adoptado de “Future cost of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach”, de Ruffini, E., Wei, M., 2018, *Revista Energy*, p. 334

La capacidad acumulada de estos vehículos, semejante a su volumen de producción, se basa en escenarios de adopción global. En el caso de los vehículos eléctricos, el volumen de producción proyectado se asume constante y equivalente al crecimiento ponderado del número de unidades vendidas durante el 2016 en 12 países⁶ (China, Estados Unidos, Noruega, Reino Unido, Francia, Japón, Alemania, Holanda, Suecia, Canadá, Dinamarca y Corea del Sur), correspondiente a un 51.5%.

⁶ Número de unidades vendidas en 2016 tomadas de Global EV Outlook 2017 (IEA: International Energy Agency, 2017)

En el caso de los vehículos de celda de hidrógeno, se toma la participación del mercado proyectado para Estados Unidos, Europa y Japón, correspondiente a un 30%⁷.

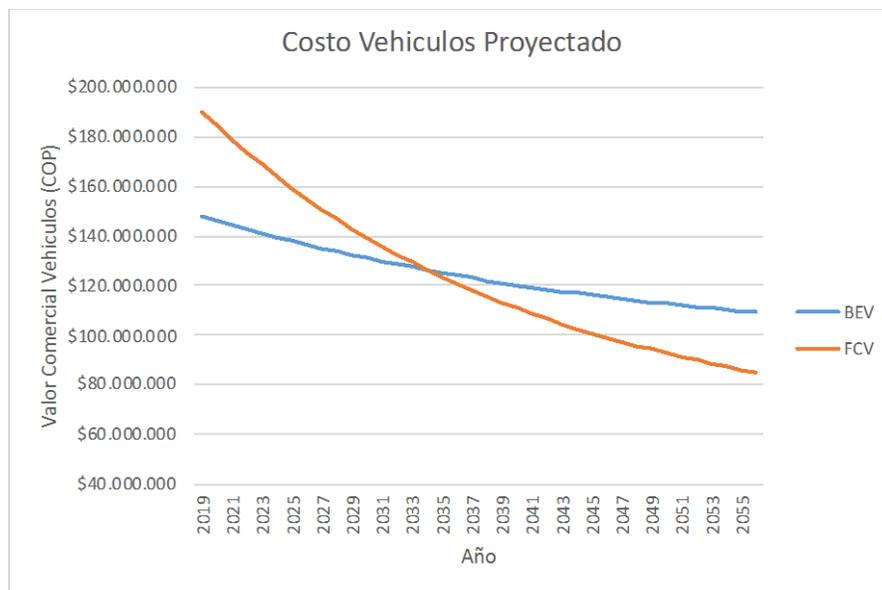


Figura 10. Costos de los vehículos BEV y FCV de acuerdo con curva de aprendizaje tecnológico

Nota: Elaboración propia, 2019

Si se tiene en cuenta la curva de aprendizaje para fabricación de los componentes principales de los vehículos eléctricos y de celda de combustible de hidrógeno, esto implica una disminución de su precio de venta a medida que se adopta la tecnología en los siguientes años. Las siguientes gráficas tienen el objetivo de establecer en que año las tecnologías BEV y FCV serán en costos de ciclo de vida equivalentes al automóvil de gasolina.

⁷ Participación de mercado tecnología FCV tomado de (IEA: International Energy Agency, 2015)

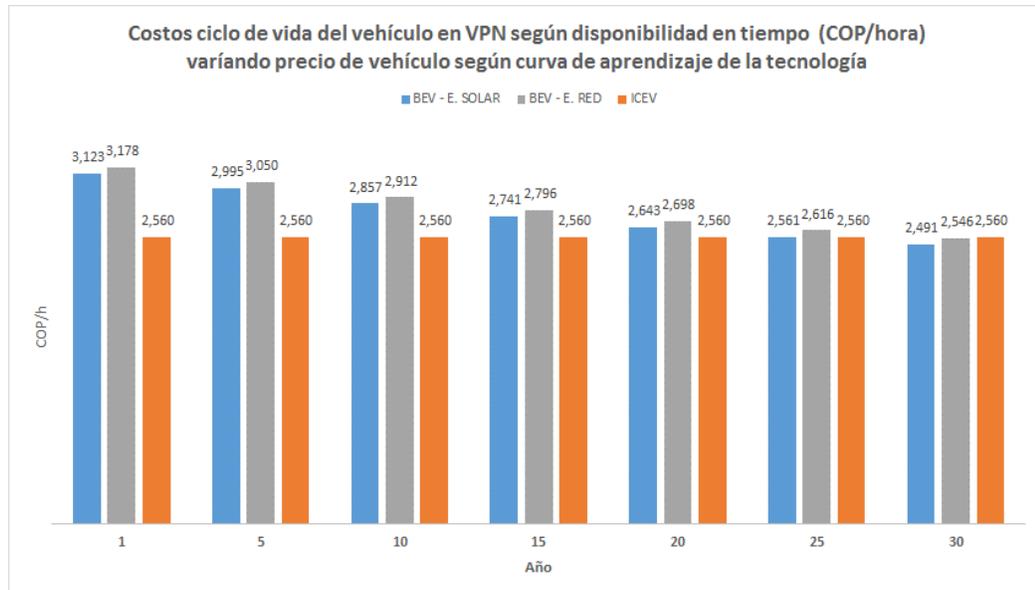


Figura 11. Costos de ciclo de vida del vehículo eléctrico versus convencional gasolina

Nota: Elaboración propia, 2019

De acuerdo con la Figura 11, en 25 años el costo de ciclo de vida del BEV cargado mediante energía solar será equivalente al costo de ciclo de vida actual del vehículo a gasolina, es decir cuando el valor comercial del vehículo eléctrico sea equivalente a COP\$117,724,225. El BEV cargado por energía de la red tendrá un costo de ciclo de vida menor que el ICEV para el año 30, cuando el precio del vehículo sea de COP\$113,989,172.

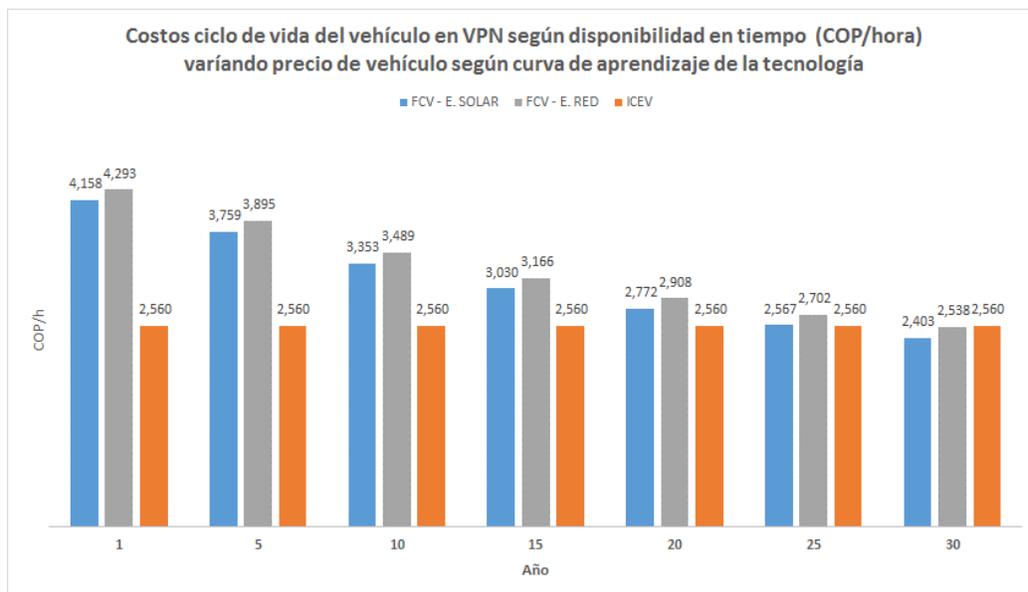


Figura 12. Costos de ciclo de vida del vehículo de celdas de hidrógeno versus convencional gasolina

Nota: Elaboración propia, 2019

Según Figura 12, en 25 años el costo de ciclo de vida del FCV cargado mediante energía solar será equivalente al costo de ciclo de vida actual del vehículo a gasolina, es decir cuando el valor comercial del vehículo de celda de hidrógeno sea equivalente a COP\$104, 524,567. El FCV cargado por energía de la red tendrá un costo de ciclo de vida menor que el ICEV para el año 30, cuando el precio del vehículo sea de COP\$95,690.966.

Los resultados obtenidos al aplicar una curva de aprendizaje tecnológico muestran que tanto los vehículos FCV como los vehículos BEV, se estiman que sean costos competitivos en un horizonte de 25 a 30 años. Horizonte de tiempo mayor al obtenido por Ruffini y Wei (2018) quienes estimaron un punto de corte para ambas tecnologías de 10 años, con la misma tasa de aprendizaje del 18%. Esta disparidad en años se puede explicar

por la diferencia en los escenarios de adopción asumidos en la producción de vehículos FCV y BEV (capacidad acumulada, x_0 y x_t) que impacta en el valor de los vehículos en el tiempo.

11.5.2 Precio del combustible

El objetivo del siguiente análisis es calcular en cuanto debe incrementar el precio de la gasolina para que el costo de ciclo de vida del ICEV sea similar al costo de las otras tecnologías.

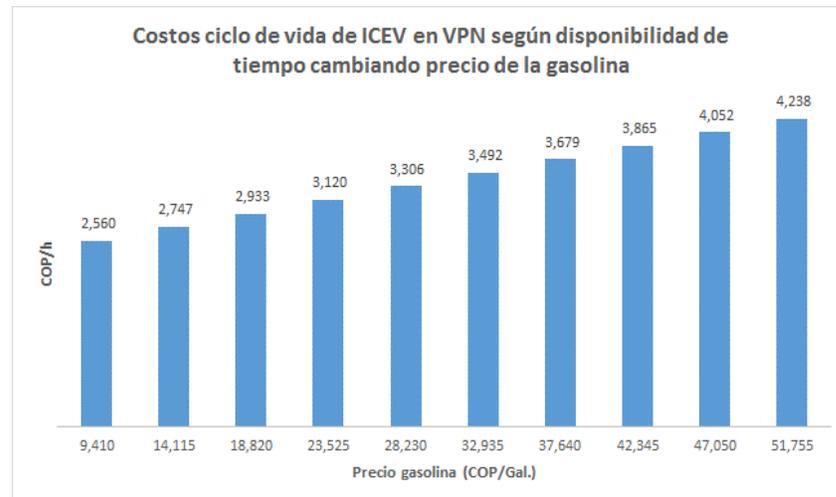


Figura 13. Costos de ciclo de vida del ICEV variando precios de la gasolina

Nota: Elaboración propia, 2019

La Figura 13 evidencia que para que el costo de ciclo de vida del vehículo convencional sea similar al del vehículo eléctrico, debe incrementar el precio actual de la gasolina en 2.5 veces, es decir ser equivalente a COP\$23,525/gal, y para que sea el costo similar al de

FCV, el precio de la gasolina debe incrementarse en 5.5 veces llegando a un monto de COP\$51,755/gal.

11.5.3 Precio de la energía

Por medio del siguiente análisis se busca establecer si con la disminución del costo del combustible, es decir la reducción del precio de la energía solar, el costo de ciclo de vida del BEV y FCV es competitivo respecto al ICEV.

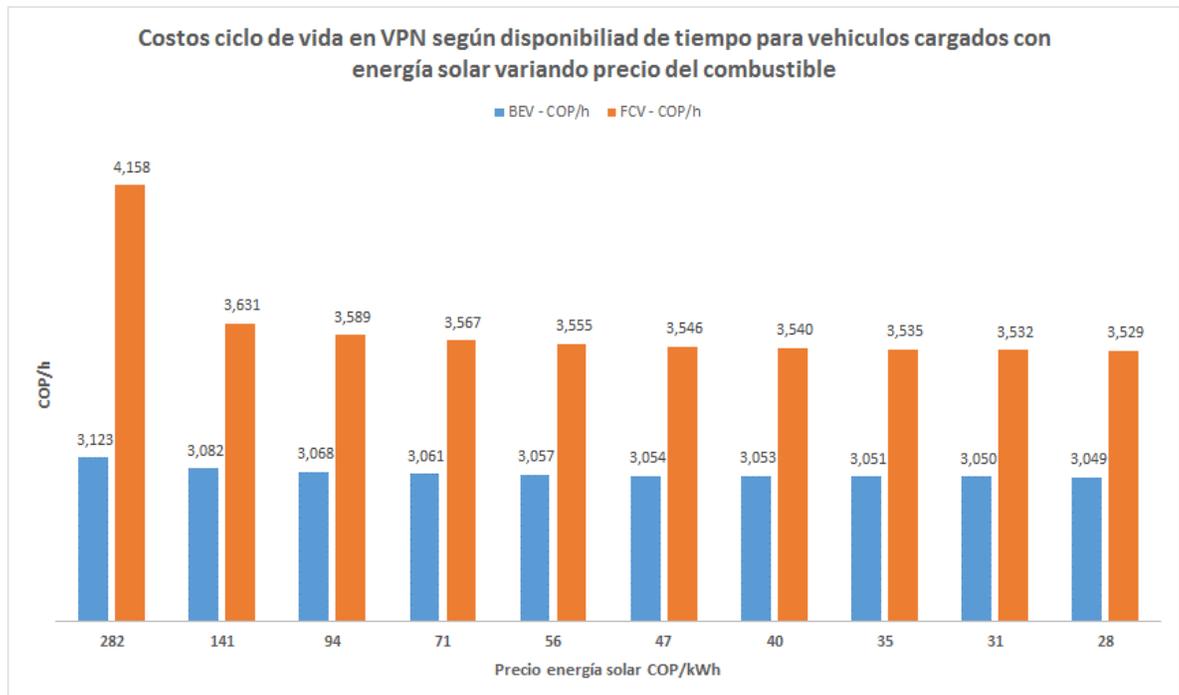


Figura 14. Costos de ciclo de vida del BEV y FCV variando precios de la energía solar

Nota: Elaboración propia, 2019

Si el precio de la energía solar se reduce 10 veces su valor actual pasando de \$282 COP /Kwh a \$28 COP /Kwh, tanto para el vehículo eléctrico como para el de celdas de

hidrógeno, el costo de ciclo de vida no es competitivo respecto al automóvil de gasolina (\$2,560 COP/h).

De lo anterior se deduce que, si se disminuye el precio de la energía de la red, el costo de ciclo de vida de BEV y FCV tampoco será competitivo respecto al ICEV dado que el precio de energía de red es más alto que el solar.

11.5.4 Rango de manejo

En la siguiente tabla se observan los costos de ciclo de vida de las diferentes tecnologías para diferentes rangos de manejo en millas.

Tabla 8
Costos de ciclo de vida por hora según rango de manejo

Tipo de vehículo	Costo ciclo de vida por hora (COP/h)				
	ICEV	BEV		FCV	
	Gasolina	Solar	Red	Solar	Red
Rango de manejo (millas)					
10,000	2,560	3,123	3,178	4,158	4,293
25,000	3,759	3,579	3,717	4,991	5,329
50,000	5,756	4,339	4,615	6,379	7,056
75,000	7,753	5,099	5,513	7,767	8,784
100,000	9,751	5,859	6,411	9,155	10,511
125,000	11,748	6,619	7,309	10,544	12,238
150,000	13,745	7,380	8,206	11,932	13,965

Nota: Elaboración propia, 2019

Si el rango de manejo es de 25,000 millas anuales, el costo de ciclo de vida de un vehículo eléctrico es menor que el de un auto de gasolina, y si el rango es de 100,000 millas

anuales, el vehículo de celda de combustible cargado mediante energía solar, tiene un menor costo de ciclo de vida versus el ICEV. La principal diferencia radica en el costo social de ciclo de vida, costo de combustible y de mantenimiento, los cuales incrementan en el vehículo a gasolina por la mayor cantidad de emisiones, y reparaciones que requiere el automóvil.

De los análisis de sensibilidad se puede observar que si bien la variación en el precio de adquisición del vehículo tiene un alto impacto sobre el costo de ciclo de vida de los vehículos “La reducción de costos de las celdas de combustible a través del aprendizaje tecnológico es esencial para la competitividad económica del uso de hidrógeno en el transporte” (Ajanovic & Reinhard, 2018), el rango de manejo es determinante a la hora de comparar las tecnologías de los vehículos FCV y BEV frente al vehículo de gasolina. Dependiendo del rango anual de manejo, el vehículo BEV y FCV presentan una mayor competitividad. Esto se puede explicar dado a que, a mayor utilización del vehículo, los costos operativos y su factor de emisiones se incrementan, representando un mayor porcentaje sobre la estructura de costos del ciclo de vida, punto en el cual, las ventajas de los vehículos FCV y se hacen notorias y más relevantes frente al vehículo ICEV.

Conclusiones

A pesar de existir una preocupación mundial por el medio ambiente y el cambio climático, y que los países y empresas se encuentren adaptando medidas para mitigar y reducir las emisiones contaminantes y GEI por medio de avances tecnológicos, estudios y regulaciones ambientales, los esfuerzos realizados en el sector transporte, aún no son suficientes. Si bien, el sector automotriz ha avanzado en el desarrollo de nuevos vehículos como los BEV y FCV con combustibles diferentes a la gasolina, el elevado costo de inversión del consumidor para adquirir este tipo de vehículos, hace que estas tecnologías no sean económicamente competitivas en el corto y mediano plazo respecto los autos de gasolina, incluso, los costos de ciclo de vida del vehículo relacionados con emisiones, combustible, mantenimiento, y restricciones en disponibilidad del vehículo, no alcanzan a compensar el valor de la inversión.

Cabe resaltar, que si se considera solo el efecto de las emisiones de contaminantes, material particulado y GEI, los vehículos tanto eléctrico como de celda de combustible de hidrógeno presentan una reducción de hasta el 99.9% respecto a los vehículos de gasolina, si se obtiene la energía de una fuente renovable como la solar fotovoltaica. Es por este motivo, que los gobiernos están interesados en la masificación de estas tecnologías ofreciendo incentivos y otorgando beneficios a quienes inviertan en este tipo de vehículos.

En Colombia, estas nuevas tecnologías de vehículos amigables con el ambiente están siendo empleados para el transporte masivo (buses), dado que al recorrer grandes distancias son más costo efectivo respecto los de gasolina. En el caso de los vehículos

familiares, los BEV o FCV no se han masificado por su alto costo, pero son una buena alternativa de inversión, si se emplean para servicio público de transporte (taxi o uber), dado que su rango de manejo puede superar las 100,000 millas por año, y según ese millaje, son más competitivos económicamente frente los de gasolina como se demostró en este estudio.

El escenario óptimo para la sociedad, es que se acelere el aprendizaje tecnológico de la producción de los BEV y FCV, y así disminuyan los precios de estos vehículos, pues a corto plazo, medidas como el incremento en el precio de la gasolina, o disminución del precio de la energía de la red o solar fotovoltaica, no compensan el valor de inversión en el vehículo en el análisis de ciclo de vida. Es importante mencionar que los vehículos de celda de combustible de hidrógeno son menos competitivos respecto los autos eléctricos, por lo tanto su curva de aprendizaje debe acelerarse aún más para poder competir contra los BEV y los ICEV.

Anexos

Anexo 1 - Costo Nivelado de Energía Sistema Solar Fotovoltaico

El costo nivelado de energía es una metodología utilizada para comparar diferentes tecnologías de generación de electricidad, independiente de la capacidad de generación, del tiempo de vida de la planta, el costo de capital y el riesgo.

El LCOE se calcula como la razón entre el valor presente neto de los costos durante la vida útil de la planta de generación y el valor presente neto de la energía generada sobre el mismo periodo. Los costos claves para el cálculo incluyen: los costos de capital, costos de combustibles, costos fijos y variables de operación y mantenimiento.

$$LCOE = \frac{\text{Suma de los costos durante la vida util}}{\text{Suma de la electricidad producida durante la vida util}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

I_t : Inversiones realizadas en el periodo t

M_t : Costos de operación y mantenimiento en el periodo t

F_t : Costos de combustible en el periodo t

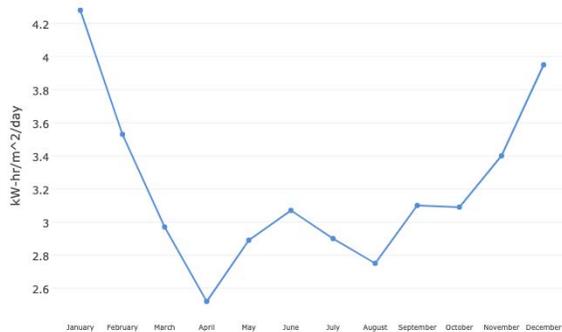
E_t : Electricidad generada durante el periodo t

r : Tasa de descuento

n : Vida util de la planta o sistema de generación.

Producción de energía

Para la estimación de la energía generada por un sistema solar fotovoltaico en Colombia, se utiliza como referencia la irradiación promedio de Bogotá en los últimos 30 años, tomado del portal de la NASA⁸. Tomando la irradiación promedio anual de 3.2 kWh/m²/día y la eficiencia de un modulo solar marca Jinko monocristalino JKM365M-72-V ,18.82%, la producción de energía del sistema fotovoltaico es de 1216 kWh/kWp/año.



```

-BEGIN HEADER-
NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatologies
22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies
(January 1984 - December 2013)
Location: Latitude 4.9148 Longitude -73.9026
Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 2287.86 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
DNR_MAX SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Maximum Direct Normal Radiation (kW-hr/m²/day)
DNR_MIN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Minimum Direct Normal Radiation (kW-hr/m²/day)
DNR SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Direct Normal Radiation (kW-hr/m²/day)
PARAMETER
-END HEADER-

```

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
DNR_MAX	5.87	5.52	3.85	2.97	3.54	4.45	3.62	3.72	4.20	4.17	4.29	5.55	4.31
DNR_MIN	2.92	2.19	2.12	1.97	2.22	2.39	2.33	1.97	2.23	2.26	2.66	3.36	2.38
DNR	4.28	3.53	2.97	2.52	2.89	3.07	2.90	2.75	3.10	3.09	3.40	3.95	3.20

Costo de Inversión, Operación y Mantenimiento

El costo de inversión, operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico ha sido tomado de cotizaciones de empresas colombianas del sector energético para una capacidad de 100 kWp.

⁸ <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Tabla A1. Resumen parametros de inversion y operativos sistema fotovoltaico

Parametro	Unidad	Valor
Inversión	USD/kWp	900
Operación y Mantenimiento	COP/kWp/año	35,000
Seguro	COP/año	0.33% del valor de inversión

Vida útil de la planta

La vida útil de la planta se asume a 25 años de acuerdo con la hoja de datos del módulo solar Jinko monocristalino JKM365M-72-V.

Tasa de descuento

La tasa de descuento utilizada para descontar los flujos de los costos y energía de la planta es la misma del sistema de distribución de energía eléctrica en Colombia, 11.8%.

(Comisión de Energía y Gas, 2018)

LCOE con y sin beneficios de ley 1715

Teniendo en cuenta los costos de la tabla A1 y proyectando durante la vida útil de la planta la producción de energía eléctrica solar utilizando el factor de generación estimado de 1216 kWh/kWp/año, y asumiendo la degradación anual sugerida por el fabricante de 0.8% por año. El LCOE del sistema es:

Tabla A2. LCOE sistema solar fotovoltaico

LCOE	Unidad	Valor
Con beneficios Ley 1715	COP/kWh	282
Sin beneficios Ley 1715	COP/kWh	353

Referencias

- Ajanovic, A., & Reinhard, H. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy*, 123, 280-288.
- Alaska Department of Education & Early Development. (1999). *Life Cycle Cost Analysis Handbook*. Juneau: State of Alaska.
- Ashnani, M., Miremadi, T., Johari, A., & Danekar, A. (2015). Environmental impact of alternative fuels and vehicle technologies: A Life Cycle Assessment perspective. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 205-210.
- Banco de la República de Colombia. (2019). *Banco de la República*. Obtenido de Banco de la República Web site: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>
- Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J., . . . Weiss, M. (2008). *On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions*. Laboratory for Energy and the Environment. Massachusetts Institute of Technology.
- Brinkman, N., Wang, M., Weber, T., & Darlington, T. (2005). *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions*. Argonne National Laboratory, US Department of Energy. Chicago: U.S. Department of Energy Office of Science.
- Colella, W., Jacobson, M., & Golden, D. (2005). Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. *Journal of Power Sources*(150), 150-181.
- Comisión de Energía y Gas. (2018). *Creg016-2018: Resolución por la cual se define la tasa de retorno para la actividad de distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional*. Bogota.
- Congreso Colombiano. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogota DC: Republica de Colombia - Gobierno Nacional.
- Congreso Colombiano. (2016). Ley 1819 de 2016: Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones. Bogotá DC, República de Colombia : Gobierno Nacional.
- Congreso Colombiano. (2017). Proyecto de Ley 075 de 2017: Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones. Bogotá DC, República de Colombia: Gobierno Nacional.
- Delucchi, M. (2003). *A Lifecycle Emissions Model (LEM): lifecycle emissions from transportation fuels, motor vehicles, transportation modes, electricity use, heating and cooking fuels, and materials*. Institute of Transportation Studies University of California. Davis: Institute of Transportation Studies University of California.
- Delucchi, M. (2005). *AVCEM: Advanced-Vehicle Cost and Energy-Use Model, Overview of AVCEM*. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. California: Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

- DOE Hydrogen and Fuel Cells Program. (s.f.). *DOE H2A Analysis*. Obtenido de https://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html : https://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html
- DOE: Alternative Fuels Data Center - Vehicle Cost Calculator Assumptions and Methodology. (s.f.). https://www.afdc.energy.gov/calc/cost_calculator_methodology.html. Obtenido de https://www.afdc.energy.gov/calc/cost_calculator_methodology.html.
- Dones, R., Heck, T., Bauer, C., Hirschberg, P., Bickel, P., Preiss, P., . . . Ina, V. (2015). *ExternE-Pol Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications*. Europe: Contract N° ENG1-CT-2002-00609.
- Edmunds. (2019). *Edmunds*. Obtenido de Edmunds Web site: <https://www.edmunds.com/toyota/mirai/>
- EIA. US Energy Information Department. (2019). *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2019*. US Energy Information Department. US Energy Information Department.
- El Intransigente. (18 de Febrero de 2019). ¿Cuáles son las enfermedades más peligrosas en 2019? *El Intransigente*.
- El Tiempo. (28 de Noviembre de 2019). Europa, el primer continente en declarar emergencia climática. *El Tiempo*.
- Façanha, C., Blumberg, K., & Miller, J. (2012). *Global Transportation Energy and Climate Roadmap*. International Council on Clean Transportation. Washington DC: International Council on Clean Transportation.
- Fuller, S. K., & Petersen, S. R. (1995). *Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*. Washington DC: National Institute of Standards and Technology Handbook.
- García, J., Mercedes, M., López, C., & Montes, E. (2017). *Los Costos de Comerciar en Colombia - Resultados de la Encuesta de Comercio Exterior del Banco de la República*. Banco de la República. Bogota DC: Banco de la República.
- Granovskii, M., Dincer, I., & Marc, R. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 159, 1186-1193.
- Hordeski, M. F. (2009). *Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power*. Fairmont Press.
- IEA: International Energy Agency. (2015). *Technology Road Map Hydrogen and Fuel Cells*. IEA.
- IEA: International Energy Agency. (2017). *Global EV Outlook 2017 - Two million and Counting*. IEA.
- IEA: International Energy Agency. (2018). *Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification*. IEA.
- Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases. (2016). *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*.
- Lee, J.-Y., Yoo, M., Cha, K., Lim, T. W., & Hur, T. (2009). Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 4243-4255.
- Mac Kinnon, M., Shaffer, B., Carreras-Sospedra, M., Dabdub, D., Samuelson, G., & Brouwer, J. (2016). Air quality impacts of fuel cell electric hydrogen vehicles with

- high levels of renewable power generation. *international journal of hydrogen energy*, 41, 16592-16503.
- Mejia, J., & Acevedo, C. (2013). Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá. *Scientia et Technica*, 18(2), 327-334.
- Mejia, J., & Acevedo, C. (2015). Determinación del costo de una flota de buses con celdas de combustible para el horizonte 2025 en el Valle de Aburrá. *Scientia et Technica*, 20(3), 247-254.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2017). Decreto 1116 de 2017: Por el cual se modifica parcialmente el arancel de aduanas y se establecen disposiciones para la importación de vehículos eléctricos, vehículos híbridos y sistemas de carga. Bogotá DC, República de Colombia : Gobierno Nacional.
- Motor. (20 de Agosto de 2019). *Lanzamientos: Motor*. Obtenido de Motor Web site: <https://www.motor.com.co/actualidad/lanzamientos/nissan-leaf-segunda-generacion-colombia/32766>
- Ogden, J., Williams, R., & Larson, E. (2004). Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. *Energy Policy*, 32, 7-27.
- Onursal, B., & Gautam, S. (1997). *Contaminación atmosférica por vehículos automotores , Experiencias recogidas en siete centros urbanos de America Latina*. Banco Mundial. Washington DC: Banco Mundial.
- Reyes, M. (18 de Abril de 2018). *Publimetro*. Obtenido de Publimetro Web site: <https://www.publimetro.co/co/tacometro/2018/04/18/toyota-corolla-2019-en-colombia.html>
- Ruffini, E., & Wei, M. (2018). Future cost of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach. *Energy*, 150, 329-341.
- Sasaki, K., Li, H.-W., Hayashi, A., Yamabe, J., Ogura, T., & M.Lyth, S. (2016). *Hydrogen Energy Engineering - A Japanese Perspective*. Springer.
- Secretaría Distrital de Hacienda - Alcaldía de Bogotá. (2019). *Secretaría Distrital de Hacienda*. Obtenido de Secretaría Distrital de Hacienda Web Site: <http://www.shd.gov.co/shd/node/16683>
- Seguros Mundial. (2019). *Seguros Mundial*. Obtenido de Seguros Mundial Web site : <https://www.soatmundial.com.co/media/TARIFAS-SOAT.pdf>
- Sun, Y., Ogden, J., & Delucchi, M. (2010). Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 11932-11946.
- Thomas, C. (2009). Fuel cell and battery electric vehicles compared . *international journal of hydrogen energy*, 34, 6005-6020.
- Verne, J. (1874). *The mysterious island* (1 ed.). Pierre-Jules Hetzel.
- Wang, M. (1999). *The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation (GREET) Model*. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.
- Wang, M. (2002). Fuel choices for fuel cell vehicles: well-to-wheel energy and emissions impact. *Journal of Powers*, 112, 307-321.
- Yang, C., & Ogden, J. (2007). *Steady state model of hydrogen infrastructure for US urban areas*. UC Davis Institute of Transportation Studies Report,. California: UC Davis Institute of Transportation Studies Report,.