



**“Instalación de una Planta para la Generación, Adecuación y Provisión de Hidrógeno para Buses Urbanos: Análisis de su factibilidad técnico / económica para una prueba piloto en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina”**

**Ing. Alejandro Roy Bierregaard**

**Nro. de Registro: 093034**

**Director: Lic. Marcelo Ferrando**

**Codirector: Ing. Leonardo Iannuzzi**

**Trabajo Final de Tesis – Maestría en Administración de Empresas, MBA**

**Junio 2020**

*“La historia de las ciencias nos demuestra que las teorías son perecederas. Con cada nueva verdad revelada, tenemos una mejor comprensión de la naturaleza y nuestras concepciones, y nuestros puntos de vista, se modifican.”*

Nikola Tesla

## **Agradecimientos**

Siento una gran satisfacción por haber culminado el presente trabajo, el cual es el fruto de una gran dedicación teniendo la posibilidad de brindar un pequeño aporte a una problemática tan actual como real, no sólo en Argentina, sino también en el mundo, como es el tema de la energía junto al cuidado de la salud y de nuestro medio ambiente.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director, el Licenciado Marcelo Ferrando, quien con su gran conocimiento, experiencia y entusiasmo me ha marcado el camino para el desarrollo y presentación del presente trabajo de manera incondicional.

Agradecer a mi co-director, el Ingeniero Leonardo Iannuzzi, quien ha sido el principal sustento de toda la información necesaria para el desarrollo del presente trabajo y que también, con su gran entusiasmo, amplio conocimiento y experiencia en el campo elegido me ha marcado el norte a seguir en términos de investigación, más allá del presente trabajo.

Agradecer a Ingrid Van Zele por todo su apoyo en la coordinación sobre el trabajo y continuo apoyo.

A mi mujer, Josefina y a mis hijos, Mateo y Joaquín, quienes me sostienen constantemente, soportándome y cuidándome desde el amor todos los días de manera incondicional, por lo cual me encuentro bendecido y profundamente agradecido.

A mi padre, Alex, quien desde siempre forjó mis valores, me marcó la importancia del estudio y la investigación, y quien, desde el cielo, me sigue acompañando en todos mis desafíos.

A mi madre, Annette, y mi hermana, Karen, quienes, con todo su amor, me han brindado su continuo apoyo pese a las distancias, y me siguen acompañando en mis desafíos, al igual que mi padre.

A mis amigos, dentro de los cuales conté con la invaluable asistencia de Sofía Tanzer, Mariano Baldinelli y Gabriel Baldasarre para la elaboración del presente trabajo.

A mi familia y principalmente a Federico O'Hagan, Clara Gaviña, Dimas Gaviña y Constanza Mainoli quienes me brindaron todo su afecto y apoyo durante todo el desarrollo.

## 1. Resumen

La revolución industrial y la era moderna han traído consigo grandes avances en todas las áreas. Aun así, con el tiempo se ha requerido una mayor demanda energética, cuya oferta fue extendiéndose a base de tecnologías existentes, provocando así un mayor incremento sobre las emisiones de gases de efecto invernadero o GEI (Gases de Efecto Invernadero), principales responsables del actual calentamiento global. Mediante los Objetivos de Desarrollos Sostenibles impulsados por las Naciones Unidas, el mundo se está comprometiendo a bajar dichas emisiones, logrando así una disminución en la temperatura promedio de la Tierra de al menos 2 grados centígrados para el año 2030 respecto de principios del milenio, buscando evitar el incremento de la frecuencia e intensidad de desastres naturales y mejorar la resiliencia de los países ante tales eventos que tanto comprometen a la vida humana en distintas partes del mundo. Dentro de los gases de efecto invernadero, se les presta mayor atención a las emisiones de Dióxido de Carbono y otros gases con potencial de calentamiento global, cuya expresión integrada es definida en Dióxido de Carbono equivalente (en adelante  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ).

La Argentina no escapa a este compromiso y actualmente se encuentra en el desarrollo de estrategias y políticas que se encuentren alineadas con los objetivos mencionados, a fin de lograr la reducción neta de emisiones, fundamentalmente de  $\text{CO}_2$ , siendo el sector del Transporte responsable por más de del 15 % de las mismas. En lo que se refiere al mencionado sector, es de vital importancia se defina una clara transición energética que logre una reducción de estas emisiones, la cual debe estar acompañada por un cambio tecnológico, así como también por las estrategias y políticas nacionales que ayuden a equilibrar los costos.

El presente trabajo estudia la factibilidad técnica y económica para la instalación de una Planta de generación, adecuación y provisión de Hidrógeno para Buses Urbanos en la Ciudad de Buenos Aires, considerando que dicha ciudad contiene la mayor concentración de buses del país. A su vez, tiene como objetivo encontrar el precio actual de venta por Kilogramo de Hidrógeno a fin de comprender el valor de Break-Even en comparación con el Diesel tradicional relacionado al costo por cada 100 Kilómetros recorridos por el bus. Por último y a partir de este punto, analizar y comprender los principales conceptos sensibles al proyecto los cuales deben ser desarrollados para alcanzar la sustentabilidad del mismo. A su vez, el presente trabajo deja abierta la posibilidad de continuar la investigación sobre otras alternativas tecnológicas con el objetivo de lograr comparar y encentrar la mejor alternativa, en la óptima relación de compromiso entre costos e impacto ambiental.



## Índice

<b>1. Resumen</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Marco de Referencia</b> .....	<b>9</b>
3.1. Hidrógeno En Reemplazo del Petróleo como Combustible.....	9
3.2. Buses con Celdas de Combustible (Fuel Cell Buses) y la Obtención del Hidrógeno .....	10
3.2.1. Buses de Combustible a Base de Hidrógeno .....	11
3.2.2. Proceso de Obtención y Abastecimiento del Hidrógeno .....	12
3.3. Antecedentes en el Mundo .....	14
<b>4. Formulación del Proyecto</b> .....	<b>17</b>
4.1. Diagnóstico de la situación actual.....	17
4.2. Análisis de Mercado .....	17
4.3. Análisis FODA .....	18
4.4. Análisis de la Demanda .....	24
<b>5. Definición del Proyecto</b> .....	<b>26</b>
5.1. Beneficios del Proyecto .....	26
5.2. Análisis de Inversión y Costos .....	28
5.3. Evaluación económica y Flujos de beneficios netos .....	30
<b>6. Diagnóstico del Proyecto</b> .....	<b>36</b>
6.1. Análisis de Sensibilidad .....	36
6.2. Análisis de Sensibilidades para Alcanzar la Sustentabilidad del Proyecto .....	36
6.2.1. Reducción en los Costos de Energía y Mayor Eficiencia en la Producción de Hidrógeno.....	37
6.2.2. Reducción en el costo de los Buses Basados en Fuel Cell.....	38
6.2.3. Aumento del Costo Total de Propiedad (TCO) con Buses de Combustión Interna .....	38
6.2.4. Reducción de los Costos de la Tecnología Utilizada Para la Obtención del Hidrógeno Mediante el Proceso de la Electrólisis del Agua .....	39
6.2.5. Mayor impulso Nacional para el Desarrollo de Tecnologías más Sustentables.....	39
6.2.6. Bonos de Carbono – Upsize Actual del Proyecto .....	41
6.2.7. Economía de Escala.....	41
<b>7. Conclusiones</b> .....	<b>42</b>
<b>8. Bibliografía y Fuentes de Información General</b> .....	<b>43</b>
<b>9. Lista de Ilustraciones</b> .....	<b>45</b>
<b>10. Lista de Tablas</b> .....	<b>46</b>

## 2. Introducción

El cambio climático actual se encuentra principalmente relacionado con el llamado “Efecto Invernadero” debido a distintos factores dentro de los cuales se destacan las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles y no renovables como el carbón, petróleo y el gas natural. Esto genera la necesidad de una transición energética a nivel mundial con el fin de reducir el uso de los mencionados recursos fósiles yendo al uso de energías más limpias y renovables como la hidroeléctrica, eólica, solar y biomasa, aumentando el uso de vectores energéticos sin emisiones como la electricidad y el hidrógeno derivado de fuentes renovables y aumentando la eficiencia energética. Todo esto impulsó a que los Estados Miembros de las Naciones Unidas definan los “Objetivos de Desarrollo Sostenible” (ODS), apuntando como primera medida para el 2030, dentro de los cuales varios de ellos están relacionados a tomar acciones por el clima y energías asequibles y no contaminantes. Esto obliga a las naciones del mundo a desarrollar un plan que minimice las emisiones GEI (Gases de Efecto Invernadero) proveniente de los distintos sectores, siendo uno de los principales, el transporte automotor.

Por otro lado, el llamado “Acuerdo de París”, vino a ratificar el Tratado de Kyoto y reconfirmar el objetivo de limitar el calentamiento global para que no supere los 2° Centígrados para el año 2030 respecto de principios del milenio. Para lograr esto, las emisiones de gases de efecto invernadero deben alcanzar su pico en 2020.

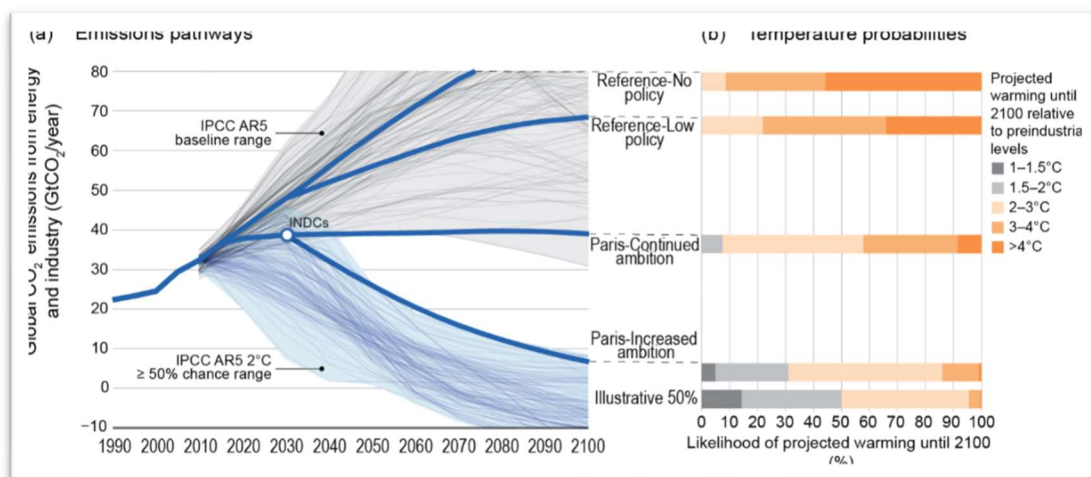


Ilustración 1 - Emisiones de CO<sub>2</sub> y resultados probabilísticos de temperatura basado en los anuncios gubernamentales asociados con el período previo a la conferencia climática de París. Fuente: U.S. Global Change Research Program: Climate Science Special Report, Fourth National Climate Assessment (NCA4), Volume I, chapter 14.2

Emisiones de CO<sub>2</sub> y resultados probabilísticos de temperatura basado en los anuncios gubernamentales asociados con el período previo a la conferencia climática de París. Fuente: U.S.

Global Change Research Program: Climate Science Special Report, Fourth National Climate Assessment (NCA4), Volume I, chapter 14.2.

Debido a esto, cada vez son más los países que van adoptando planes concretos en vías de transiciones energéticas y de una descarbonización con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, y otros gases con potencial de calentamiento global. Una contribución importante relacionada a estas emisiones está relacionada directamente con el transporte automotor.

En relación con este, se fueron desarrollando nuevas tecnologías como es el caso de los vehículos eléctricos o incluso los vehículos propulsados por celdas de combustible (Fuel Cells) a base de Hidrógeno como principal fuente de energía. Tanto en varios países del mundo como en Argentina, ya pueden verse vehículos llamados híbridos, siendo estos una combinación entre el uso de motores de combustión interna (con combustibles a nafta, gasoil o gas natural) y baterías eléctricas, pero, si se quisiera abandonar por completo los vehículos con combustible fósil, existe una incertidumbre acerca de cuál tecnología se terminará adoptando: Baterías puramente eléctricas o las mencionadas Fuel Cells a base de Hidrógeno como fuente de energía. La decisión dependerá de muchos factores relacionados tanto al costo del vehículo como así también a la eficiencia energética, la autonomía, tiempos de recargas, el tipo de vehículo y su aplicación y costos por cada 100 kilómetros recorridos por el mismo. A todo esto, debe sumarse una determinada infraestructura que lo acompañe, la cual deberá considerar un sistema de recarga fácil, rápido, seguro y asequible a fin de mantener al vehículo en movimiento de una forma eficiente. y por supuesto, su impacto ambiental desde una perspectiva de análisis de ciclo de vida (ACV). Se entiende por análisis del ciclo de vida (ACV), como la evaluación de un proceso desde la etapa de extracción pasando por las de producción, transporte, distribución, utilización, reutilización (si la hubiere), el reciclado y la disposición de residuos en relación, principalmente, al impacto ambiental.

Por otro lado, se exigirá que la tecnología adoptada cuente con el menor impacto ambiental posible, en línea con los objetivos de desarrollo sustentable.

En un estudio reciente sobre el análisis de ciclo de vida (ACV) sobre la utilización de Hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs. buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina, su autor, Iannuzzi, indica que el proceso de transición a una movilidad más sustentable expresado en huella de carbono será aquel que logre atributos de sostenibilidad ambiental a la mayor eficiencia posible. En definitiva, es lo que maximiza la reducción neta de emisiones a un mínimo costo energético y un mínimo costo económico, que sería resultado de un proceso de máxima eficiencia energética a lo largo de un ciclo de vida dado. (2018).



Dado todo lo mencionado, el presente trabajo analiza las factibilidades técnicas, económicas y financieras para la instalación de una planta piloto para la generación, adecuación (principalmente compresión) y provisión de Hidrógeno en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires orientada al transporte público de la misma, a ser instalada en una cabecera de una terminal de colectivos, con una capacidad máxima para alimentar un total de 10 buses con tecnología a base de Celdas de Combustible, considerando que estos poseen un gran potencial con relación al impacto ambiental, consumo, autonomía, tiempos de recarga y costos por kilómetro recorrido. El mismo define el correspondiente plan de negocio para el potencial inversor, así como también analiza las variables más relevantes como el mercado y la demanda, con el objetivo de tener un panorama claro y necesario dentro del contexto actual para la implementación de un sistema de transporte público más sustentable.

### 3. Marco de Referencia

Todos los años, las emisiones de CO<sub>2</sub>eq son medidas en la mayoría de los países del mundo. Estas emisiones se fueron incrementando durante el transcurso de los años. De acuerdo con estudios publicados en *ourworldindata.org*, en el año 1900, el mundo emitía un total de dos billones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. En los últimos años, el mundo emite más de 36 billones de toneladas de toneladas de CO<sub>2</sub>eq de GEI (Gases de Efecto Invernadero).

Particularmente en Argentina y de acuerdo con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, en 2016 se emitieron un total de 364 Millones de Toneladas de CO<sub>2</sub>eq. (MtCO<sub>2</sub>eq). Sobre el total, el 13,8% está relacionado al Transporte, habiendo generado en el mismo año 50,22 MtCO<sub>2</sub>eq. (según la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). De acuerdo con el Plan Nacional de Transporte y Cambio Climático de 2017 de la Presidencia de la Nación, Argentina tiene una meta absoluta asumida de no exceder la emisión neta de 483 MtCO<sub>2</sub>eq en el año 2030. Se incluyeron además medidas sujetas a condiciones de disponibilidad y costos de tecnología y de financiamiento para no exceder las 369 MtCO<sub>2</sub>eq al 2030.

#### 3.1. Hidrógeno En Reemplazo del Petróleo como Combustible

El Hidrógeno puede ser producido utilizando una variedad de métodos y fuentes de energía.

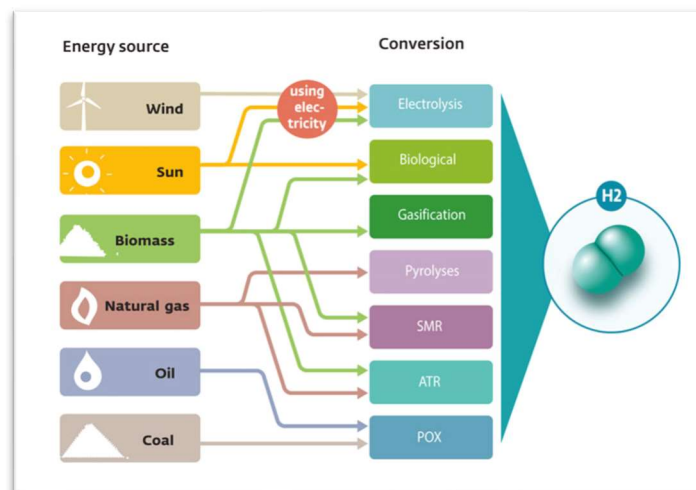


Ilustración 2 - Fuentes de Energía y Métodos de Conversión. Fuente: *What is Hydrogen from Gasuine NL*

Actualmente, la mayoría del Hidrógeno producido proviene de recursos fósiles. En este caso se lo denomina “Hidrógeno Gris”. No obstante, existe la posibilidad de

contar con un proceso por el cual se capten las emisiones de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  producto la obtención con el objetivo de mitigar la contaminación que aporten al efecto invernadero, convirtiendo al combustible en el llamado “Hidrógeno Azul”. Por otro lado, también es viable producirlo con fuentes de energía más sustentables como lo permitiría el caso de la electrólisis del agua, en caso de que su fuente de energía eléctrica proviniera de recursos renovables. Al hidrógeno producido mediante recursos 100% renovables se lo llama “Hidrógeno Verde”.

Considerando que los países del mundo van proyectando una reducción de las emisiones, es de esperar que a futuro podamos producir mayormente un Hidrógeno Verde.

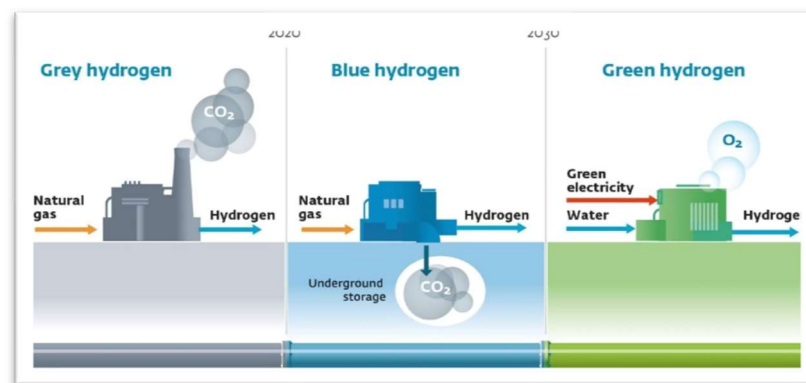


Ilustración 3 - Evolución de los Tipos de Hidrógeno. Fuente: What is Hydrogen from Gasunie NL

El hidrógeno es considerado un Vector Energético ya que no es una fuente de energía primaria, como el caso del gas natural o el carbón, sino que requiere de un consumo energético para su obtención, siendo entonces un portador de energía como el caso de la nafta o mismo, la electricidad. Hoy en día, es el vector energético que más está llamando la atención debido a los últimos desarrollos tecnológicos y estrategias a nivel mundial basadas en objetivos de descarbonización de la economía que lo ubican como posible candidato para la sustitución del petróleo como combustible.

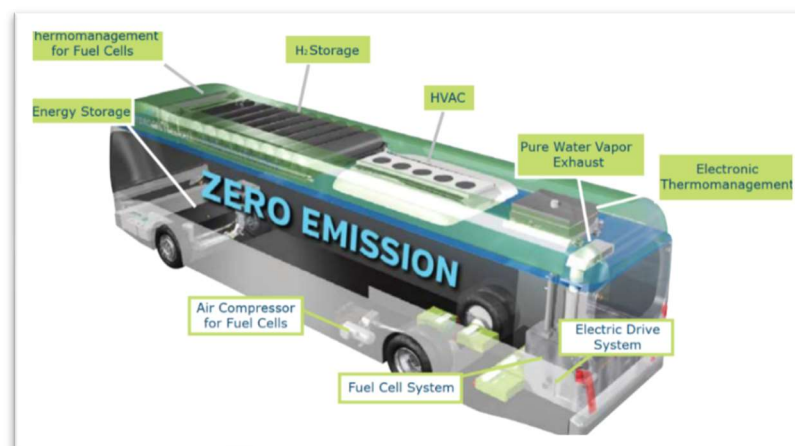
### 3.2. Buses con Celdas de Combustible (Fuel Cell Buses) y la Obtención del Hidrógeno

A continuación, se detalla una breve descripción de las tecnologías existentes que se consideran en el presente trabajo para el funcionamiento de los

correspondientes buses como también el tipo de generación de Hidrógeno seleccionado para el presente plan de negocios.

### 3.2.1. Buses de Combustible a Base de Hidrógeno

Un Bus de Combustible a Base de Hidrógeno, llamado internacionalmente en inglés como Fuel Cell Bus con sus siglas FCB, es propulsado gracias a un motor eléctrico que, a su vez, es alimentado por pilas o celdas de combustible (Fuel Cell en inglés) a base de Hidrógeno. Estas pilas son fundamentales ya que son las encargadas de producir la electricidad necesaria para el mencionado motor a partir de una reacción química entre el Hidrógeno almacenado en los buses y el Oxígeno del aire ambiente, mediante membranas de intercambio protónico, en un proceso inverso a la electrólisis del agua. Su funcionamiento es similar al de las baterías tradicionales, dado que alimentan un motor eléctrico, pero las membranas de intercambio de protones de las celdas de combustible están compuestas por un cátodo y un ánodo divididas por una membrana central. Cuando el hidrógeno llega a la membrana, se produce la reacción química, generando así una corriente eléctrica que es lo que hace impulsar al motor. Por último, el proceso químico termina emitiendo solo calor y vapor de agua.



*Ilustración 4 - Anatomía de un Bus con Celdas de Combustible a base Hidrógeno (Fuel Cell Bus, FCB) - Fuente: Ballard Power Systems Inc.*

“La particularidad de diseño de dichos buses es que en casos de emergencia pública cada bus podrá ser usado también como unidades de generación de energía eléctrica con una potencia nominal de 2x120 KW”. (Iannuzzi, L., 2019, p.43).

Al día de la fecha, un típico FCB urbano para el transporte de pasajeros tiene un consumo promedio de 9 Kg de Hidrógeno por cada 100 Kilómetros recorridos. A su

vez, almacenan hasta 45 Kg de Hidrogeno, por lo que cuentan con una autonomía de hasta 400 Kilómetros.

<b>Fuel cell dominant electric buses (FCEBs)<sup>1</sup></b>	
Key components	Fuel cell module, tank, balance of plant and periphery, battery, e-motor and inverter, mechanical drive line
Output	>100 kW
Efficiency; consumption; range	51-58%; 8-14 kg H <sub>2</sub> /100 km; 250-400 km
Fuel	Hydrogen, 350 bar, ca. 45 kg tank (e.g. total of 3 tanks)
Passenger capacity	Ca. 75-105 (dep. on size and layout)
Approximate unit cost	Approx. EUR 620,000 (upper limit, FCH2 JU JIVE2) <sup>1</sup>
OEMs (selection)	Daimler EvoBus, Van Hool, VDL, Solaris, Toyota, Wrightbus
Fuel cell suppliers (selection)	Ballard, Hydrogenics, UTC Power, NuCellSys (selection)
Typical customers	Municipal public transport operators, (public or private) bus service operators

*Ilustración 5 – Características de un FCB – Fuente: FCH - Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities*

### **3.2.2. Proceso de Obtención y Abastecimiento del Hidrógeno**

Para la debida provisión de Hidrógeno para este tipo de vehículos, es necesario producirlo en forma apropiada en términos de cantidad y calidad, en cumplimiento con las correspondientes especificaciones técnicas, como por ejemplo la Norma ISO 14687-Parte 2. Como ya se mencionó anteriormente, existen diferentes tecnologías para la obtención del Hidrógeno. De la misma forma, también existen dos estrategias diferentes: La obtención del Hidrógeno en sitio (internacionalmente definido como “On-Site”) y la obtención fuera del sitio (internacionalmente definido como “Off-Site”).

De acuerdo con lo detallado en el artículo realizado por el Dr. B. Reuter titulado “New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling”, En la estrategia “On-Site”, el Hidrógeno se obtiene en el mismo sitio en donde se provee. En la estrategia “Off-Site”, el Hidrógeno se obtiene en una planta dedicada para este fin y es transportado hacia el sitio para el abastecimiento. Esta última está orientada a la provisión a gran escala, por lo que adicionalmente debe considerarse el transporte del combustible hacia la estación de carga. A su vez, para las soluciones “On-site”, en general se utilizan dos tipos de tecnología: Obtención mediante la Electrólisis del Agua o mediante el Reformado de Gas Natural. (2017, p.22).

Fue seleccionado como objeto de estudio para el presente plan de negocios la obtención del Hidrógeno mediante el proceso de la electrólisis del agua, considerando

la estrategia “On-Site”. La estrategia “Off-Site” requiere otro tipo de análisis que implican mayores inversiones para otra escala de negocios, el cual no es objeto de estudio en el presente trabajo.

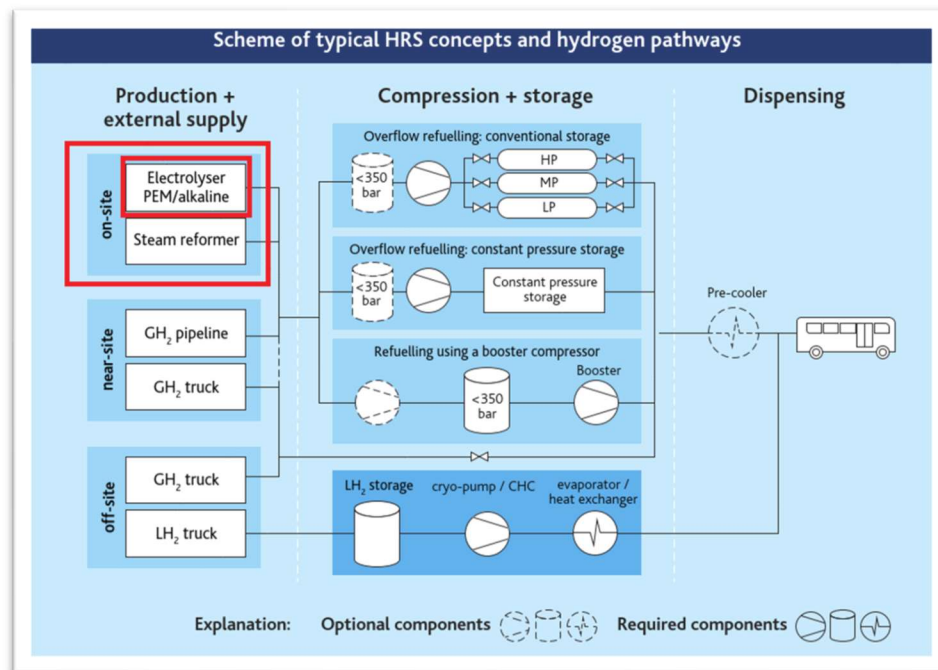


Ilustración 6 - Esquema de un proceso típico para la obtención y provisión de Hidrógeno. Fuente: New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling

En el tipo de proceso seleccionado, la electricidad es utilizada para producir Hidrógeno, el cual se extrae disociando la molécula del agua. Para esto, se utiliza un equipo llamando Electrolizador, el cual se encarga de hacer circular una corriente continua a través del agua con la presencia de una membrana (llamada electrolizadora) y un catalizador los cuales tienen el objetivo de dividir el agua entre Hidrógeno y Oxígeno. Una vez generado el Hidrógeno, es necesario comprimir el mismo a fin de almacenarlo en los tanques necesarios para el reabastecimiento a los vehículos. Por ello es necesaria la instalación de un compresor que asegure su almacenamiento del Hidrógeno a una presión de 350 bar, presión demandada por los buses en circulación, producto de una relación de compromiso entre autonomía y espacio que ocupan los tanques dentro de los buses.

Por último, a fin de realizar el reabastecimiento se debe contar con la correspondiente dispensadora. Actualmente existen estándares como las normas ISO 17268:2012, y SAE J2600, los cuales definen todas las características técnicas a considerar para el conector asociado a la dispensadora, así como también todo lo relacionado a la carga de vehículos de gran porte, con abastecimientos mayores a los 10 Kg. (B. Reuter, op.cit, p. 37).

El consumo de energía para el proceso de obtención corresponde a 60 kWh por cada Kg de Hidrógeno obtenido. A su vez, necesita un total de 0,048 m<sup>2</sup> como espacio necesario para la producción por KW (Kilo Watt) de potencia instalada.

En resumen, los elementos principales y necesarios para la obtención del Hidrógeno mediante el proceso de la electrólisis del agua son los siguientes:

- Electrolizador (PEM)
- Compresor
- Tanques de Almacenamiento
- Dispensadora
- Lugar Físico

### 3.3. Antecedentes en el Mundo

La industria automotriz de **Japón** es una de las grandes impulsoras de dicha tecnología. Este país introdujo desde el año 2017, 100 autobuses en el transporte público de pasajeros, principalmente en la ciudad de Tokio, como preparación para los Juegos Olímpicos y Paraolímpicos del año 2020 y como demostración del potencial del país en tecnologías de movilidad urbana más sustentable. (L. Iannuzzi, op.cit, p.42).

Desde el año 2017, **China** tiene proyectos de fabricación de buses con celdas de hidrógeno a gran escala en el Distrito de Sanshui, Ciudad de Foshan, Provincia de Guangdong,

Actualmente, en las calles de California en **Estados Unidos** puede verse circular el auto llamado Mirai de Toyota, a base de Hidrógeno. Existe actualmente un total de 8.363 vehículos de Hidrógeno entre buses y autos en Estados Unidos, 48 buses operando solo en California y un total de 41 estaciones proveedoras de Hidrógeno. Toyota logró penetrar en el mercado en Estados Unidos realizando acuerdos con el gobierno a fin de invertir en la instalación de las mencionadas estaciones.

En **12 ciudades europeas** existen antecedentes a escala piloto para la provisión de Hidrógeno alimentados por celdas de combustible tipo PEM (Protonic Exchange Membrane, por sus siglas en inglés). Particularmente cuentan con el proyecto llamando **CHIC**, por sus siglas en inglés “Clean Hydrogen in European Cities”,

cuyo objetivo es lograr una movilidad urbana de “Cero Emisiones” en el proceso de transporte público de pasajeros.

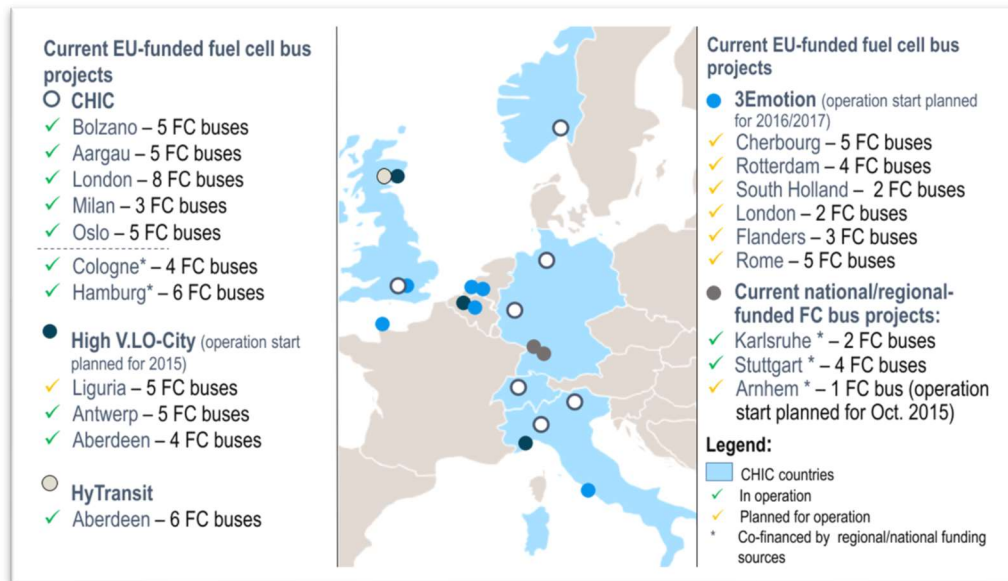
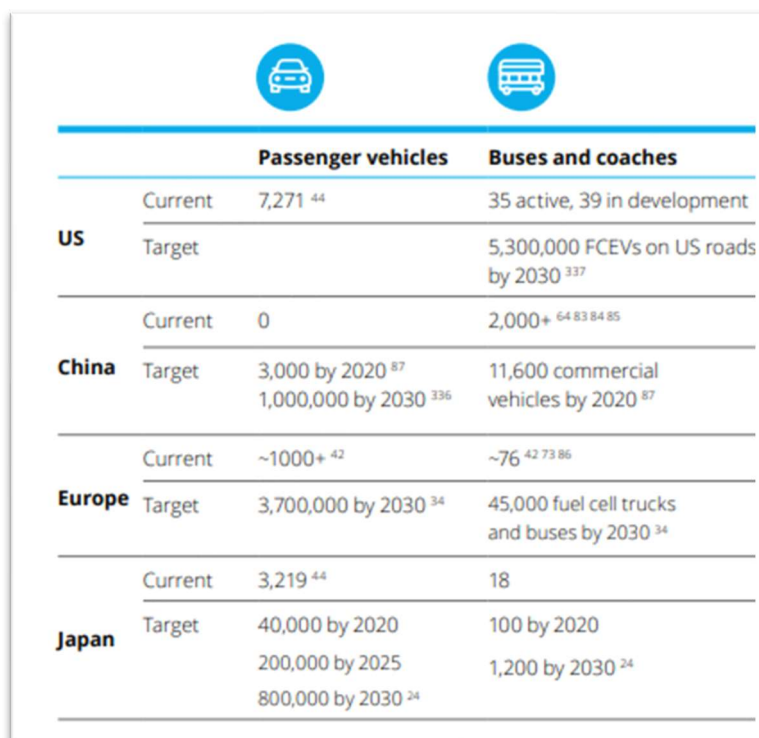




Ilustración 7 - Base instalada del proyecto CHIC – Fuente: CHIC Project – Element Energy - <https://hydrogeneurope.eu/project/chic>

En resumen, cada uno de los países o en el caso de la Comunidad Europea, cuenta con una actual base instalada, la cual se está desarrollando año tras año en función de sus objetivos.





		 Passenger vehicles	 Buses and coaches
<b>US</b>	Current	7,271 <sup>44</sup>	35 active, 39 in development
	Target		5,300,000 FCEVs on US roads by 2030 <sup>337</sup>
<b>China</b>	Current	0	2,000+ <sup>64 83 84 85</sup>
	Target	3,000 by 2020 <sup>87</sup> 1,000,000 by 2030 <sup>336</sup>	11,600 commercial vehicles by 2020 <sup>87</sup>
<b>Europe</b>	Current	~1000+ <sup>42</sup>	~76 <sup>42 73 86</sup>
	Target	3,700,000 by 2030 <sup>34</sup>	45,000 fuel cell trucks and buses by 2030 <sup>34</sup>
<b>Japan</b>	Current	3,219 <sup>44</sup>	18
	Target	40,000 by 2020	100 by 2020
		200,000 by 2025 800,000 by 2030 <sup>24</sup>	1,200 by 2030 <sup>24</sup>

*Ilustración 8 - Base instalada y proyecciones para este tipo de tecnologías – Fuente: Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Volume 1, Deloitte & Ballard Power Systems Inc*

Sin ir muy lejos, según ANCAP (<https://www.ancap.com.uy>), **Uruguay** cuenta con un proyecto piloto para la producción de hidrógeno verde por electrólisis a partir de la red eléctrica, aumentando la participación de renovables en el abastecimiento primario de energía, donde el 38% es todavía de origen fósil, aprovechando la matriz de generación eléctrica renovable, con una estación de recarga en Montevideo para un total de 10 vehículos pesados (ómnibus inter-urbanos en líneas de alta frecuencia con radio de 250 km con centro en Montevideo, con autonomía de 500 km y camiones carreteros en líneas de alta frecuencia con radio de 450 km con centro en Montevideo, con autonomía de 900 Kilómetros), con un consumo de hidrógeno aproximado de entre 6 y 9 Kg. de Hidrógeno por cada 100 Kilómetros recorridos, recorriendo un total de 1000 Kilómetros al día y, por lo tanto, consumiendo un total de entre 600 y 900 Kg de Hidrógeno al día, con un consumo eléctrico anual de 20 GWh.

## **4. Formulación del Proyecto**

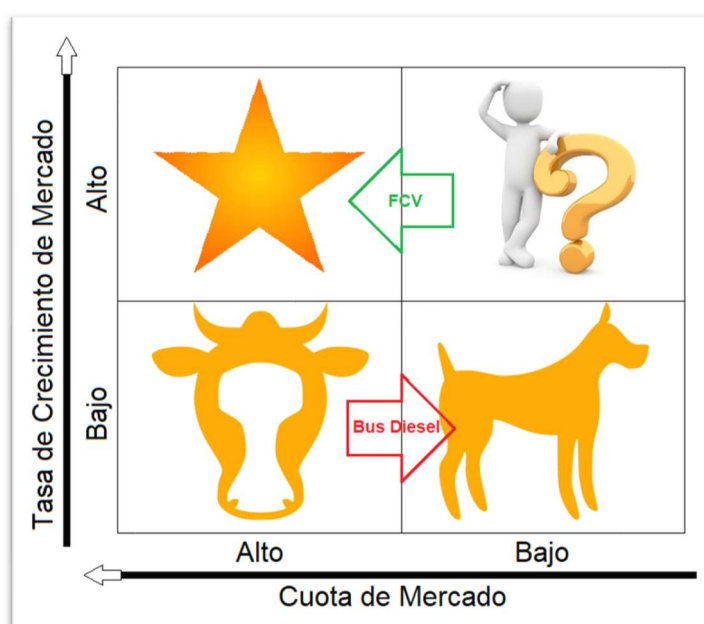
### **4.1. Diagnóstico de la situación actual**

En 2015 se promulgó en nuestro país la Ley Nro. 27.191, que fomenta la generación de energías renovables y establece que todos los usuarios deben abastecer una parte de su demanda con energía eléctrica proveniente de fuentes limpias. Esta ley tiene como objetivo alcanzar el 8% del consumo eléctrico total con fuentes renovables para el 2018, el 12 % para el 2020 y el 20% para 2025. Por otro lado, particularmente la Ciudad de Buenos Aires cuenta con un Plan de Movilidad Limpia de acuerdo con el Ministerio de Transporte, Presidencia de la Nación, el cual tiene como objetivos la reducción del 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero, reducción del 50% a aquellas que inciden en la calidad del aire incorporando tecnologías y combustibles limpios en Colectivos, Taxis y Utilitarios Livianos, un escalamiento de las tecnologías y combustibles más limpios, promoviendo la producción de vehículos más sustentables e implementación de incentivos que alienten el recambio a flotas más limpias, determinando las líneas de colectivos más propensas a ser “electrificadas” y el tipo de tecnología más adecuado.

### **4.2. Análisis de Mercado**

Históricamente el petróleo fue evolucionando con un crecimiento constante en términos de producción de barriles por día. Por otro lado, los buses a base de combustible fósil llevan muchos años ya instalados en todos los países que cuentan con este sistema de transporte, con lo cual, corresponden a una tecnología muy madura. Si bien todos los años surgen mejoras sobre la misma, los avances no son altamente significativos, sino que corresponden a avances para hacerla cada vez más eficiente. Con este panorama, se deduce que estos buses pueden verse como un producto “vaca” (en términos de matriz de Boston – BCG), (más allá de los problemas políticos de aplicación de tarifas en nuestro país que no permiten materializar la liquidez que genera ese tipo de producto), ya que no se perciben grandes saltos en su crecimiento y a su vez, cuenta con una alta participación del mercado actual. Por otro lado, en la tecnología a base de celdas de combustible (Fuel Cells), se percibe un crecimiento constante cada año, pero al momento con una baja participación de mercado actual, producto de una incertidumbre tecnológica que va mejorando día tras día. Por ello, estaría ubicado como un producto con “signo de pregunta” en el esquema de la misma Matriz BCG. Con los nuevos objetivos sustentables, las políticas de descarbonización y las ventajas asociadas a los FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles) que se mencionan en el presente trabajo, es de esperar que la tecnología a base de

combustible fósil vaya realizando una transición hasta convertirse en “Perro”, o sea, cada vez con una menor participación del mercado sin mucho crecimiento y, por el contrario, los FCEVs vayan evolucionando hasta posicionarse como un producto “Estrella”. Los vaivenes de los precios internacionales, las reservas de combustibles fósiles y la necesidad de recuperar nuestro planeta serán factores que determinarán la velocidad de ocurrencia de estos hechos.



*Ilustración 9 - Transiciones de Tecnología Diesel y Tecnología de Vehículos de Celdas de Combustible a Hidrógeno (FCVs) en el Mercado – Fuente: Elaboración Propia, basado en el esquema de la Matriz del del BCG.*

En lo que hace a Argentina particularmente, actualmente y solo en el ámbito del AMBA, existe un total de 137 líneas con un total de 10.000 buses. Esto equivale, en promedio, a un total de 73 buses por línea. El recorrido promedio por ramal es de 10 Kms. La velocidad promedio es de 10 Kms/h, lo que significa que el recorrido completo por cada ramal se realiza en 1 hora. Los buses circulan con una frecuencia promedio de 15 minutos durante prácticamente las 24 hs. y, por lo tanto, esto implica que cada ramal necesite un total de 8 buses.

#### 4.3. Análisis FODA

Como se describe en la obra de Kotler sobre los Fundamentos de marketing, se debe realizar un diagnóstico sobre la situación actual a fin de tomar una correcta decisión de inversión mediante un análisis de FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). (Kotler, P., 2013).

Sobre este análisis, se describen las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas detectadas y más relevantes en relación con la planta generadora, adecuadora y proveedora de Hidrógeno a buses urbanos, tomando en consideración la tecnología elegida mediante el proceso de la electrólisis del agua.

## **Fortalezas**

### **1 – Hidrógeno como Recurso Abundante:**

En primer lugar, debemos tener en cuenta que el Hidrógeno es el elemento más abundante en la naturaleza, el cual forma parte de, prácticamente, el 75% de la materia visible del universo.

### **2 – Hidrógeno como combustible limpio:**

Además, el Hidrógeno tiene el potencial para ser un combustible limpio ya que, durante su utilización, emite solamente vapor de agua, logrando así cero emisiones que afecten al medio ambiente.

### **3 – Procesos fáciles para su obtención:**

Como se ha indicado en el presente trabajo, es posible obtener el Hidrógeno mediante una variedad de procesos. Para el caso de la generación de Hidrógeno mediante el proceso de la electrólisis del agua, ya existe un gran desarrollo relacionado a esta tecnología con una variedad de empresas la cuales ya ofrecen soluciones estandarizadas, modularizadas y seguras para la obtención on-site, las cuales a su vez son prácticamente automáticas con bajos costos de mantenimiento, sin requerir grandes dimensiones de espacio.

## **Oportunidades**

### **1 - Reducción en las emisiones:**

Por otro lado, como se vio en el capítulo “4.1- *Diagnóstico de la situación actual*” del presente trabajo, en Argentina existen compromisos asumidos para la reducción de emisiones, lo que potenciará el desarrollo e inversión de tecnologías menos contaminantes que aporten a los objetivos asumidos. De esta manera, se lograría una reducción en los costos actuales del proceso. En línea con las estrategias existentes en Argentina, es posible contar con contratos directos de energía que estén vinculados a generación de energías 100% renovables, como es el caso de los servicios brindados por YPF Luz, quien actualmente brinda este

tipo de servicios a empresas como Coca Cola, Nestlé y Toyota. Esto reduciría drásticamente las emisiones de CO<sub>2eq</sub> derivado del consumo de energía para la obtención de un Hidrógeno más verde.

**2 - Ventajas de los Buses FCB (Buses con Celdas de combustible alimentadas a Hidrógeno) por sobre los buses BEB (Buses impulsados a Batería):**

Dentro de un contexto de movilidad limpia, otra oportunidad radica en los distintos atributos superiores que tienen los buses basados en Fuel Cells alimentadas a Hidrógeno (FCBs) en comparación a los Buses impulsados a batería (BEBs). A continuación, se detallan las comparaciones sobre los conceptos más relevantes de ambas tecnologías:

<b>Característica</b>	<b>BEB (Batería)</b>	<b>FCB (Hidrógeno)</b>
Autonomía	80 Kms	240 Kms
Tiempo de Carga	6 Hs.	5 minutos
Costo Aprox. del Bus	USD 500.000.-	USD 600.000.-
Temperaturas	El rango de duración de las baterías disminuye un <b>37,8%</b> a muy bajas temperaturas de ambiente.	El rango de duración de las baterías disminuye un <b>23 %</b> a muy bajas temperaturas de ambiente.

*Tabla 1 - Comparativa entre FCBs y BEBs – Fuente: - Fuente: Ballard Power Systems Inc.*

Si bien los precios de los buses de celdas de combustible a base a Hidrógeno son un 20% más caros que los Buses a Baterías, cabe destacar que el espacio que ocupan las baterías de los Buses Eléctricos (BEBs) es mayor que la utilizada por los buses con celdas de combustible basadas en Hidrógeno (FCBs), lo que disminuye la capacidad de transporte de pasajeros, necesidad imperiosa al momento de brindar el servicio en horas pico. Por esta razón, los buses eléctricos llevan la necesidad de contar con mayor cantidad de unidades con su correspondiente gasto asociado en equipamiento, mantenimiento y mano de obra. En resumen, los Buses con Celdas de Combustible a base de Hidrógeno (FCBs) tienen una mayor capacidad de carga de pasajeros, cuentan con una mayor autonomía que los buses a batería, un menor tiempo para su recarga y son ideales para rutas más extensas y con servicios de alta frecuencia.

Fabricantes de vehículos de primera línea como Toyota se encuentran realizando acuerdos con los gobiernos que acompañen a su estrategia de posicionar sus vehículos a base de Fuel Cell, como el caso de la solución

implementada en California, Estados Unidos. Mediante acuerdos de financiamiento logran reducir los costos de la inversión para la Cía. de buses y así lograr penetrar en el mercado logrando un transporte público más sustentable en reemplazo de los buses a combustión interna actuales.

### **3 - Bajos Niveles de Ruido:**

El ruido es considerado como otro factor importante de contaminación, principalmente en las grandes ciudades. Los niveles de ruido de los FCBs (al igual que los BEBs, son muy bajos en comparación a los buses de combustión interna, lo que nos permite encontrar una oportunidad en poder satisfacer la necesidad de reducir la cantidad de decibeles en el medio ambiente.

## **Debilidades**

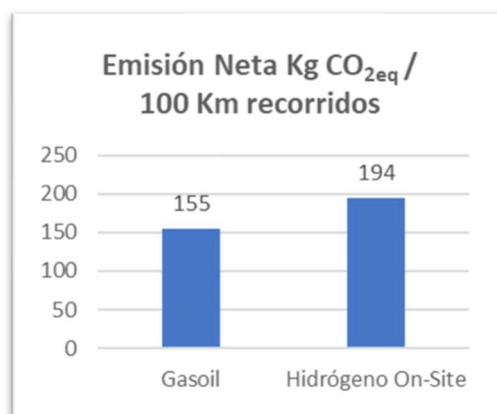
### **1 - Sobre el proceso y sus costos de Energía:**

El proceso de la Electrólisis del agua se caracteriza por un consumo intensivo de energía eléctrica y de consumo de agua. Tal como se indica en el artículo “Estimating the Carbon Footprint of Hydrogen Production”, la energía consumida en el proceso termina siendo mayor que la energía producida, lo que obliga a definir un precio de venta elevado respecto a otras fuentes de energía. No obstante, si se contara con una energía de menor precio, como en los casos en los que existe un exceso de electricidad de la red en ciertos momentos del día, podría producirse Hidrógeno de una manera más económica (R. Rapier, 2020).

### **2 - Emisiones en el ciclo de vida:**

En el estudio de Análisis del Ciclo de Vida de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs buses a motores diésel, se compara un total de ocho alternativas tecnológicas de combustible para el transporte público de pasajeros, dentro de las cuales se incluyen los buses alimentados a Gasoil (mezcla 90/10) y los buses a base de celdas de combustible (Fuel Cells) con producción de hidrógeno “On-site”, mediante el proceso de la electrólisis del agua (L. Iannuzzi, op.cit, p.24).

De este estudio se desprende la siguiente comparación de emisiones en todo su ciclo de vida sobre las alternativas mencionadas:



*Ilustración 10 - Comparativa de Emisiones – Obtención del Gasoil vs. Obtención del Hidrógeno On-Site mediante el proceso de Electrólisis del Agua – Fuente: ACV de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina, L. Iannuzzi - 2018*

Se percibe un valor de CO<sub>2</sub>eq mucho mayor sobre la tecnología del Hidrógeno respecto a la tecnología del Gasoil convencional. Esto se debe a que el análisis incluye al CO<sub>2</sub>eq emitido por la red eléctrica actual, la cual cuenta con una componente importante de generación mediante recursos no renovables.

En el caso de la Argentina, el Factor de Emisión de la Red en términos de GEI (Gases de Efecto Invernadero) equivalentes medidos en kilogramos de CO<sub>2</sub>eq por cada Kilowatt hora generados y entregados en un punto de consumo para uso industrial, en promedio, entre los años 2014 a 2017 es del orden de 0,4 Kg CO<sub>2</sub>eq/kwh". (L. Iannuzzi, op.cit, p.24).

### **3 – Costo por cada 100 Kms:**

Otra debilidad actual, es que el costo del Hidrógeno por cada 100 Km, todavía es muy elevado en comparación al Gasoil tradicional. Esto se presentará con mayor detalle en el Capítulo 5.3 - *Evaluación económica y Flujos de beneficios netos*.

## **Amenazas**

### **1 - Incentivos relacionados al Gasoil:**

Actualmente la Argentina cuenta con incentivos para la explotación de combustibles fósiles. Este punto, genera que la transición a energías más sustentables como las del Hidrógeno se vea retardada, ya que atenta contra la

idea de contar con un precio competitivo en el mercado sobre la venta por Kg. de Hidrógeno en comparación al Gasoil.

## **2 – Precio del Petróleo:**

Además de los incentivos que pueden recibir los combustibles fósiles como consecuencia de políticas energéticas de Argentina, la tendencia actual a la baja del precio del petróleo constituye una amenaza para la instalación de la tecnología del hidrógeno.

## **3 – Situación Macroeconómica de la Argentina:**

Nuestro país presenta una crisis macroeconómica importante con altos niveles de inflación, oscilaciones bruscas del valor del tipo de cambio y un panorama general institucional que no alienta a nuevas inversiones, necesarias para la instalación de la nueva tecnología.

## **4 – Seguridad del Hidrógeno:**

Otro tema relevante, es que el público en general piensa que el Hidrógeno NO es seguro. La mala prensa que siempre tuvo el Hidrógeno en el transcurso de los años es un factor cultural negativo. Para desterrar estas ideas, es muy importante establecer formas de comunicación que rompan con los mitos y destaque sus beneficios ambientales a los que se encuentra asociado. Pero por otro lado será necesario trabajar con los distintos organismos de Normas Técnicas Argentina como el IRAM, el INTI para implementar la utilización de normas internacionales que garanticen la seguridad y el establecimiento de laboratorio de ensayos que permitan corroborar y lograr que las empresas certifiquen bajo dichas normas.

## **5 – Planes de Descarbonización en Tiempos de Pandemia:**

Por último, la situación actual sobre la crisis de salud que el mundo se encuentra atravesando a causa de la pandemia del COVID-19, sumado al impacto económico y principalmente en Argentina, genera un cambio en las prioridades sobre los asuntos en dónde poner el mayor foco, por lo que se espera una ralentización en vías del cumplimiento de objetivos medioambientales.

A continuación, se detalla la matriz FODA que, en definitiva, resume todos los puntos mencionados:



<b>Interno</b>	<b>Externo</b>
<p style="text-align: center;"><b>Fortalezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrógeno: Recurso Abundante</li> <li>• Hidrógeno: Combustible Limpio</li> <li>• Procesos Fáciles de Obtención</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad de Reducir Emisiones de CO<sub>2eq</sub> mediante la utilización de energías renovables</li> <li>• Tecnología de Buses superior contra las alternativas existentes</li> <li>• Bajo Niveles de Ruido en relación con el vehículo para transporte público de pasajeros.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Debilidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor emisión de CO<sub>2</sub> que el Diesel en su ciclo de vida*</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Amenazas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentivos existentes para la explotación de combustibles fósiles</li> <li>• Valor del Precio del Petróleo</li> </ul>

Tabla 2 –Matriz FODA.

*\*La tecnología seleccionada para el proceso de obtención del Hidrógeno mediante la electrólisis del agua, emitirá mayores emisiones en comparación con el Diesel analizándolo en su ciclo de vida que va desde el proceso de obtención hasta su utilización, siempre que se considere la utilización de la red actual de energía existente en nuestro país, sin tener en cuenta opciones de energías renovables. Este escenario en particular es el que se presenta como una debilidad.*

#### 4.4. Análisis de la Demanda

El presente plan de negocios se enmarca en un caso particular por el cual, tanto la oferta como la demanda deben evolucionar en conjunto. Del lado de la oferta se deberá considerar todas las variables detalladas en el presente trabajo, las cuales convergirán en un costo por cada 100 Km de recorrido. Del lado de la demanda, la empresa de buses será quien tome la decisión del cambio de tecnología y lo hará en

función a los precios de la oferta, sumado a los costos directos y/o indirectos asociados al cambio de la misma.

El costo del combustible por cada 100 Kilómetros recorridos es solo una componente que influye para un análisis del lado de la demanda. Este elemento, junto a otros factores importantes como son el costo del Bus, el mantenimiento y las correspondientes emisiones (por mencionar algunos ejemplos), influirán en el denominado Costo Total de Propiedad (Total Cost of Ownership – TCO) que, en función de las variables mencionadas, se establece un costo por cada 100 Kilómetros recorridos.

A continuación, se detalla una comparación de las principales variables que, sumado al costo por cada 100 Km de la oferta, definen el mencionado TCO, tanto para la tecnología del Bus a Gasoil como para los Buses con Celdas de Hidrógeno (Fuel Cell). Si bien no es objeto del presente estudio, cabe destacar que este concepto es el que los usuarios tendrán en cuenta a fin de decidir sobre el cambio tecnológico.

<b>Concepto</b>	<b>Gasoil</b>	<b>Fuel Cell</b>
Precio Promedio del Bus	USD 300.000.-	USD 600.000.-
Autonomía (Kms entre cargas)	1000	240-400
Mantenimiento	100%	30%
Emisiones	100%	0%

*Tabla 3 - Comparación de las principales componentes que influyen sobre el TCO – Fuente: Mision Cavendish, Chile, 2020.*

Como se puede apreciar, actualmente el costo de los buses a celdas de combustible es mayor, pero requieren un 70% menos de mantenimiento (en términos de costos) que los buses de Gasoil, y cuentan con 0 emisiones medido en el punto de combustión (sin considerar el análisis del ciclo de vida, tema que se describe en los capítulos subsiguientes).

Cabe aclarar que la influencia del Estado, Nacional, Provincial o Municipal, promoviendo a través de reducciones impositivas, planes de financiación o premios a la compañía de buses por la disminución en la emisión de CO<sub>2</sub>, serán determinantes a la hora de decidir una inversión.

## 5. Definición del Proyecto

La instalación de una estación de servicio para la provisión de Hidrógeno es muy sencilla, a la vez que es fácilmente escalable. El presente trabajo presenta el correspondiente análisis económico para la instalación de la Planta piloto, con una capacidad de producción máxima de 200 Kg. de Hidrógeno al día, estimando un proceso habitual y en régimen de 160 Kg. de Hidrógeno por día, lo que equivale a una eficiencia de planta del 80%, brindando la posibilidad de mantener en movimiento una flota de un total de 8 buses con celdas de combustible a base de Hidrógeno (FCBs) durante las 24 hs. y los 365 días del año.

Para la inversión necesaria se consideran valores económicos actuales (año 2020) y un precio estimado de venta por unidad de Hidrógeno producido para que el proyecto sea rentable. Por último, se detallan todas las oportunidades y variables que deben considerarse a fin de que en un futuro próximo se cuente con precios de mercado competitivos en una solución altamente sustentable.

### 5.1. Beneficios del Proyecto

El mayor beneficio que tiene el presente proyecto es la reducción de la huella de carbono que proporciona la tecnología elegida para la obtención del Hidrógeno mediante el proceso de electrólisis del agua con energía eléctrica renovable. Este proyecto considera la celebración de un contrato de energía 100 % renovable, como se indicó en las Oportunidades en el *capítulo 4.3 - Análisis FODA*. Considerando lo mencionado, se analiza el impacto ambiental que se produce en el correspondiente ciclo de vida hasta el punto de consumo, o sea, desde la generación de la energía hasta el bus en movimiento. Este estudio no considera el impacto ambiental proveniente de la fabricación e importación de los buses ni de las celdas de combustible.

Se sabe que, en la Ciudad de Buenos Aires y en promedio, los buses tardan 1 hora en recorrer un ramal desde un extremo hacia el final del recorrido. Cada ramal cuenta con una longitud promedio de 10 Kms. Considerando que la velocidad promedio de un bus es de 10 Km/h, al vehículo le llevará 1 hora en recorrer dicho ramal. Considerando que el presente proyecto corresponde a un piloto para el abastecimiento de un total de 8 buses, es posible estimar las emisiones producidas anualmente, como se detalla a continuación:

Iannuzzi en su tesis de Análisis del Ciclo de Vida de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina describe que buses de combustión interna emiten un total

de **3,52 Kg CO<sub>2eq</sub>** por Litro de gasoil mezcla (90% fósil y 10% biodiesel) en el ciclo de vida analizado.

Tomando en cuenta este valor y asumiendo que los 8 buses estarán en movimiento las 24 hs., luego de un año habrán recorrido un total de 700.800 Km y, por ende, habrán emitido un total de **1.085,40 TonCO<sub>2eq</sub> al año**.

En contraste, haciendo un análisis del ciclo de vida hasta el punto del consumo equivalente en relación con el consumo del Hidrógeno, asumiendo que la fuente de energía es renovable (mediante un contrato con YPF Luz), es posible asumir entonces que su factor de emisión de CO<sub>2eq</sub>/KWh es de 0 para la generación. Luego se deberá considerar el factor de emisión producto del transporte y la distribución de la energía eléctrica. Se estima factor de emisión de 0,1 kg de CO<sub>2eq</sub>/KWh, asumiendo que esta energía no es renovable o bien, una combinación de los tipos de generación que existen en el país, dada la red actual. Se podría pensar que dicha emisión podría ser menor, pero se adopta este número en un escenario conservador ya que actualmente la Argentina no cuenta con datos reales calculados y provistos por la empresa aludida.

Por último, un FCB consume 9 Kg de Hidrógeno cada 100 Km. Si se tiene en cuenta los mismos kilómetros de circulación por día ya mencionados, se logra un consumo diario de alrededor de 21,60 Kg de Hidrógeno. Por ende, se estarán consumiendo 172,80 Kg de H<sub>2</sub> para los 8 buses en un día, lo que equivale a 62.208 Kg de H<sub>2</sub> por año. Actualmente, para obtener un Kg de Hidrógeno se consume alrededor de 60 KWh de electricidad. Por consiguiente, al año se habrán consumido un total de 3,73 GWh de la red eléctrica.

Se concluye la siguiente ecuación para el cálculo de emisión del ciclo de vida en el punto de consumo:

$$\left[ 0 \text{ Kg} \frac{\text{CO}_{2eq}}{\text{KWh}} + 0,1 \text{ Kg} \frac{\text{CO}_{2eq}}{\text{KWh}} \right] \cdot 60 \frac{\text{KWh}}{\text{KgH}_2} \cdot \frac{0,09 \text{ KgH}_2}{\text{Km}} \cdot 8 \text{ Buses} \cdot 240 \frac{\text{km}}{\text{día}} \cdot 356 \text{ días}$$

Teniendo en cuenta los factores de emisión descriptos, se habrán emitido un total de **373,25 TonCO<sub>2eq</sub>** al año para los 8 buses versus las 1.085,4 **TonCO<sub>2eq</sub>** calculadas para los buses de gasoil.

Finalmente se concluye que, con el presente proyecto, la Argentina habrá ahorrado un total de **712,15 Ton CO<sub>2eq</sub>**, anuales, o sea, tendrá una reducción aproximada del **65%** en comparación a las emisiones producidas por los buses a combustión interna en su ciclo de vida hasta el punto de consumo. Cabe destacar que este valor es por 8 buses. Si consideramos, por ejemplo, el total de 10.000 buses que actualmente circulan

en el área de AMBA aproximadamente, el ahorro anual sería de **890.187 Ton CO<sub>2eq</sub>**. Dicho total permitiría cumplir sobre el área mencionada, con el compromiso del Plan de Acción Nacional de Transporte y Cambio Climático emitido en 2017 como parte de los compromisos del Acuerdo de París para el año 2030 para el Subsector Transporte Automotor, mediante vehículos de bajo nivel de emisiones.

## 5.2. Análisis de Inversión y Costos

A continuación, se detallan los costos para la inversión y operación de la Estación de Servicio de Hidrógeno:

### Costo de la Inversión:

**Unidad Electrolizadora:** Esta unidad cumplirá la función de generar Hidrógeno mediante el proceso de la Electrólisis del Agua. Estos equipos actualmente son modulares, los cuales tienen la posibilidad de ampliarse durante el crecimiento de la base instalada. Con la tecnología actual, se estima que se necesita contar con una potencia de 2,5 kW por cada Kg. de Hidrógeno a producir. Para el presente caso, será necesario contar con un equipo electrolizador de 525 kW de potencia con el objetivo de entregar 200 Kg. de Hidrógeno por día como capacidad máxima de planta.

De acuerdo con el artículo “Cost approach for Hydrogen production by Electrolysis (PEM Technology)”, a nivel mundial, actualmente se calcula que sus costos se encuentran alrededor de USD 1.389.- por Kilowatt de potencia (A. Hernández Torres, 2019).

Para una producción de máxima capacidad de planta para el abastecimiento de 10 buses, será necesario contar con un equipo de 525 KW de potencia. Como consecuencia, un equipo electrolizador tendrá un costo de **USD 729.225.-**

**Equipo Compresor:** Producido el Hidrógeno, será necesario comprimirlo a 350 bar, presión necesaria para la carga de este en un bus de celdas de combustible (Fuel Cells). Se estima que se necesita contar con una potencia de 0,10 kW por cada Kg. de Hidrógeno a producir. Para el presente caso, será necesario contar con un equipo compresor con una potencia de 21,73 kW.

A nivel mundial, actualmente se calcula que sus costos se encuentran alrededor de USD 5.818.- por Kilowatt de potencia. (ídem, 2019)

Como consecuencia, un equipo compresor tendrá un costo de **USD 126.403,00.-**

**Tanque de Almacenamiento:** Será necesario contar con un tanque de almacenamiento de 2.360,40 Nm<sup>3</sup> (Normal metro cúbico).

A nivel mundial, actualmente se calcula que sus costos se encuentran alrededor de USD 56.- por Nm<sup>3</sup> de almacenamiento. (Ibidem, 2019)

Como consecuencia, un tanque de almacenamiento tendrá un costo de **USD 132.182,40.-**

**Dispensadora:** Será necesario contar con un equipo encargado de abastecer de Hidrógeno al FCB. A nivel mundial, actualmente se calcula que sus costos se encuentran alrededor de **USD 16.050.-** por unidad. (Ibidem, 2019)

**Costos de Importación:** En términos de equipamiento, será necesario realizar la importación de todo el equipamiento, el cual, si bien está exento de aranceles, deberá considerarse el transporte, el cual se considera un orden de magnitud de **USD 5.000.-** Los equipos se despachan íntegramente en un contenedor de 40 pies. Las averiguaciones realizadas para el transporte terrestre en Europa hasta el puerto de Amberes (equipos de origen belga), el flete marítimo y el transporte desde el Puerto de Buenos Aires, nos permiten estimar esta cifra por contenedor.

**Costos del proyecto:** El objetivo de la Planta Piloto será instalarlo en una cabecera de buses existente, con lo cual no será necesario invertir en términos de construcción civil. No obstante, será necesario contar el debido espacio disponible para su proceso, el cual se calcula en unos 25,2 metros cuadrados. A su vez, será necesario contar con un servicio de Ingeniería el cual se encargue de su instalación y Puesta en Marcha cuyo valor estimado es de alrededor de **USD 220.200.-** con un plazo de ejecución de alrededor de 7 meses.

Por último, a la inversión deberá sumarse un costo para riesgos y contingencias. Para esto, se calculó el 10% sobre el total de la inversión, considerando equipamiento y servicios y por ende, se estima un valor de **USD 128.107,00.-**

En resumen, será necesario para la inversión inicial contar con un capital de **USD 1.359.667,40.-**

#### **Costos Operativos:**

##### **Energía:**

Actualmente en Argentina, el costo de la energía se encuentra en un valor aproximado de 0,06 centavos de dólar por KW, según las tarifas publicadas sobre el consumo Eléctrico de: EDESUR - May2020 - En Pesos Argentinos – Tarifas para

potencias mayores a 300KW BT y teniendo en consideración un dólar con un valor de \$ 69.- pesos argentinos. Por otro lado, se debe sumar los impuestos correspondientes del 40% (estimado) que se desprenden de considerar impuestos provinciales, municipales y fondo de energía. Como conclusión se estima un costo total de 0,08 centavos de dólar por KWh., denominado comúnmente como 80 milésimos (mils) de us\$. Teniendo en cuenta que la cantidad a producir por día estará en el orden de los 172,80 Kg de Hidrógeno y que para producir 1 Kg. de Hidrógeno se consumen 60 KWh, se estima que el costo final diario de la energía será de **USD 854,32.-**, concluyendo que la energía será la mayor componente relacionada a los costos operativos.

#### **Mano de Obra:**

Otro costo operativo para considerar es el de la mano de obra. Se estima que para este proyecto es necesario la atención permanente de un operario que, al trabajar la planta todos los días y las 24 horas, se convierte en la necesidad de contar con una dotación de 4 personas en régimen de trabajo denominado 6 x 2, con turnos rotativos. A los efectos de la cuenta económica se consideró un valor unitario en dólares, teniendo en cuenta los salarios actuales en pesos y el tipo de cambio indicado. Con relación a los gastos de estructura no se considera personal jerárquico afectado para esta prueba piloto de 10 buses y se estima tercerizados los servicios administrativos contables y de mantenimiento.

#### **Costos de Mantenimiento:**

El mantenimiento requerido es mínimo, el cual corresponde a equipos que tienen una vida útil de aproximadamente 12 años. Si al promediar los mismos se realiza un revamping estimado en USD 250.000.- se alarga la vida útil del bien, inversión que fue incluida en el cash flow. Para este caso, se estima que los costos de mantenimiento representan un orden de magnitud de 1 % respecto a la inversión del equipamiento adquirido.

### **5.3. Evaluación económica y Flujos de beneficios netos**

En base a los costos anteriormente mencionados, a continuación, se realiza una evaluación económica, analizando el VAN y la TIR, a fin de determinar la viabilidad del proyecto expresado en miles de dólares.

De acuerdo con la obra “Fundamentos de Finanzas Corporativas”, el VAN corresponde al Valor Actual Neto (o valor presente), con el objetivo de utilizar el mismo

como indicador financiero a fin de determinar la viabilidad del presente proyecto. Se sabe que, si el valor es mayor a cero, será un proyecto viable y, por el contrario, no lo será si su valor es negativo. A su vez, si su resultado fuese cero, el proyecto no generará ni pérdidas ni ganancias siendo en principio, su realización indiferente. Por último, la Tasa Interna de Retorno, indicará que tan rentable será el proyecto. (S. Ross, 2010).

Cabe la aclaración, ya que ante esta situación se decidió considerar como variable con incógnita el precio del proyecto y considerar **el monto al que debería venderse el insumo para lograr una tasa de rentabilidad en dólares del 15%**. Así, con una TIR del 15% el VAN se igualará a cero al considerar ese valor como tasa de descuento.

Es importante destacar que la variable más importante de todo el proyecto que es el precio de venta del hidrógeno a la compañía de buses hoy no se encuentra disponible, ya que no existe un mercado de este producto. La lógica indica que para este caso debería considerarse el precio de gasoil equivalente al consumo y la autonomía lograda con el hidrógeno. Al realizar estos cálculos el proyecto resulta inviable económicamente.

Por lo tanto, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor de los equipos puestos e instalados en el punto de fraccionamiento se calculó en us\$ 1.359.667,40.- según lo indicado en el punto anterior. La depreciación de los mencionados equipos se consideró en 10 años a los efectos contables e impositivos.
- Se consideró una Tasa de Descuento del 15 %.
- En base a la tasa de descuento, que significa una TIR del 15%, el precio de venta por unidad de Hidrógeno deberá ser de **USD 10,19.-**
- Capital de Trabajo: Con relación al mismo, el presente proyecto no requiere de cifras significativas ya que el valor del hidrógeno despachado se cobrará a los 30 días. Por otro lado, se considera que los salarios se pagarán por quincena y la energía eléctrica se pagará mensualmente. A los clientes se les cobrará a 30 días, así como también se le pagará de la misma forma a la energía y los costos de mantenimiento. Se considera el llenado de los tanques antes del inicio de la operación, por lo tanto, el capital de trabajo será el equivalente a 2 sueldos (las quincenas que se les paga a los cuatro operarios) solo en el primer año. El impuesto a las ganancias se pagará a mitad del



segundo año, donde se iniciará un régimen de anticipos por lo que no se considera esta sutileza que podría generar un capital de trabajo a favor durante el primer año. Por esta razón, la magnitud del concepto de Capital de Trabajo es muy poco significativa para influir en el objetivo de llegar a una TIR del 15%.

Luego del análisis realizado se acompaña a continuación, el correspondiente Estado de Resultados y Flujo de Fondos expresado en Miles de dólares.

Es importante destacar nuevamente que al no existir un precio de mercado se calculó el precio objetivo a alcanzar (USD 10,19.- por Kilogramo de H<sub>2</sub>) para lograr un proyecto sustentable y tentador para un inversor con una rentabilidad del 15% en dólares.

<b>Datos del Plan de Negocio</b>					
Inversión del Capital Requerido	\$ 1.360	<b>En Miles de Dólares</b>			
Depreciación lineal	10	<b>Años</b>			
Tasa Impuesto a las Ganancias	25%				
Unidades vendidas al año	62.208	<b>Kg H<sub>2</sub></b>			
Tasa de Descuento	15%				
<b>Resumen de Ingresos Netos - En Miles de Dólares</b>					
Concepto	Año				
	Startup	1	2	3	4 ... 10
<b>Ventas</b>	634	634	634	634	634
<b>Gross Margin</b>	250	250	250	250	250
<b>% GM</b>	39%	39%	39%	39%	39%
Otros Gastos		0	0	0	0
<b>EBITDA</b>	250	250	250	250	250
<b>% EBITDA</b>	39%	39%	39%	39%	39%
Depreciaciones	-136	-136	-136	-136	-136
<b>EBIT</b>	114	114	114	114	114
<b>% EBIT</b>	18%	18%	18%	18%	18%
Impuestos	-28	-28	-28	-28	-28
<b>Resultado Neto</b>	85	85	85	85	85
<b>% RN</b>	13%	13%	13%	13%	13%
<b>Flujo de Fondos</b>					
Ingreso Neto	85	85	85	85	85
Ajuste de Depreciación	136	136	136	136	136
<b>Generación Operativa</b>	221	221	221	221	221
Inversión Productiva	-1.360				-250
Capital de Trabajo	-15				
<b>FF Neto</b>	-1.360	221	221	221	1.226
<b>FF Acum</b>	-1.360	-1.138	-917	-695	1.859

Tabla 4 - Estado de Resultados y Flujo de Fondos del Proyecto Expresado en Miles de Dólares - Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, con un precio de USD 10,19.- / Kg de H<sub>2</sub> la **TIR es de 15%**, el proyecto cuenta con un período de repago aproximado de 6 años y medio y el **VAN es 0**.

El proyecto considera una proyección de 9 años y una Perpetuity al final del ejercicio. Por ende, siguiendo el cálculo de una Perpetuity, se divide el último flujo por la tasa de corte preestablecida. Al mismo tiempo, como se mencionó en el capítulo referido a mantenimiento, se prevé una inversión de unos USD 250.000.- necesaria para el recambio de las membranas del Electrolizador y, con ese revamping, lograr la continuidad de la operación.

$$P = \frac{A}{r} = \frac{221}{15\%} - 250 = USD 1.226. -$$

Sobre este análisis se deduce la estructura de costos sobre el precio de venta por unidad, en base a las componentes de CAPEX, OPEX, impuestos y utilidades.

<b>Estructura de Costos por Unidad de Hidrógeno</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Contribución</b>	<b>%</b>
CAPEX	USD 2,19	21%
OPEX	USD 5,87	58%
Impuestos	USD 0,76	7%
Costo Total / Kg	<b>USD 8,82</b>	<b>87%</b>
Utilidad / Kg	USD 1,37	13%
<b>Precio Final / Kg</b>	<b>USD 10,19</b>	<b>100%</b>

Tabla 5 - Estructura de Costos por Unidad de Hidrógeno. Fuente: Elaboración Propia

De aquí se concluye que, considerando que un FCB consume en promedio un total de 9 Kg. de Hidrógeno por cada 100 Km recorridos, el costo por este recorrido será de USD 85,51.- contra USD 31,88.- de un Bus de combustión interna, si se tiene en cuenta un precio de Gasoil equivalente a \$ 50.- por litro (pesos argentinos), un valor del dólar a \$ 69.- y un consumo promedio del Bus de 44 litros.

Como conclusión, el Break Even entre el precio de venta unitario del Hidrógeno (Kg) y los precios del Gasoil actuales deberá ser de **USD 3,54 por Kg de Hidrógeno** lo que equivaldría finalmente a un costo para el usuario de **USD 31,88.-** por cada 100 Kilómetros.

<b>Valores por Tecnología y Punto de Equilibrio</b>				
	<b>Valores Hidrógeno</b>		<b>Valores Diesel</b>	
<b>Unidad de Medida</b>		<b>Kg</b>		<b>Lts.</b>
Consumo Promedio	9	KgH <sub>2</sub> / 100 Km	44	Lts. / 100 Km
Capacidad	21,6	Kg	440	Lts.
Km operativos entre cargas	240	Km	1000	Km
Consumo Diario por Bus	21,60	KgH <sub>2</sub> /d	5,45	Lts./d
<b>Análisis de Break Even</b>				
<b>Precio Break Even por Unidad</b>	<b>USD 3,54</b>	<b>po KgH<sub>2</sub></b>	<b>USD 0,72</b>	<b>por Litro</b>
<b>Precio Break Even por cada 100Km</b>	<b>USD 31,88</b>	<b>c/100 Km</b>	<b>USD 31,88</b>	<b>c/100 Km</b>

*Tabla 6 - Análisis de Break Even – Fuente: Elaboración Propia*

A continuación, se muestra el VAN actual al 15% considerando el precio de USD 3,54.- por Kg. de Hidrógeno. Por consiguiente, el Valor Actual del proyecto en las actuales condiciones y con una rentabilidad del 15% es **negativo en 1.9 millones de dólares**, lo que refleja la inviabilidad económica en las actuales condiciones.

<b>Datos del Plan de Negocio</b>						
Inversión del Capital Requerido	\$ 1.360	En Miles de Dólares				
Depreciación lineal	10	Años				
Tasa Impuesto a las Ganancias	25%	Kg H2				
Unidades vendidas al año	62.208					
Tasa de Descuento	15%					
<b>Resumen de Ingresos Netos - En Miles de Dólares</b>						
Concepto	Año					
	Startup	1	2	3	4 ...	10
Ventas	220	220	220	220	220	220
Gross Margin	-152	-152	-152	-152	-152	-152
% GM	-69%	-69%	-69%	-69%	-69%	-69%
Otros Gastos		0	0	0	0	0
EBITDA	-152	-152	-152	-152	-152	-152
% EBITDA	-69%	-69%	-69%	-69%	-69%	-69%
Depreciaciones	-136	-136	-136	-136	-136	-136
EBIT	-287	-287	-287	-287	-287	-287
% EBIT	-131%	-131%	-131%	-131%	-131%	-131%
Impuestos	72	72	72	72	72	72
Resultado Neto	-216	-216	-216	-216	-216	-216
% RN	-98%	-98%	-98%	-98%	-98%	-98%
<b>Flujo de Fondos</b>						
Ingreso Neto	-216	-216	-216	-216	-216	-216
Ajuste de Depreciación	136	136	136	136	136	136
<b>Generación Operativa</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>
Inversión Productiva	-1.360					-250
Capital de Trabajo	-15					
<b>FF Neto</b>	<b>-1.360</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-781</b>
<b>FF Acum</b>	<b>-1.360</b>	<b>-1.439</b>	<b>-1.519</b>	<b>-1.599</b>	<b>-1.678</b>	<b>-2.858</b>

Tabla 7 - Estado de Resultados y Flujo de Fondos del Proyecto considerando el Precio de venta del Break Even actual de USD 3,54.- por Kg de Hidrógeno Expresado en Miles de Dólares – Fuente: Elaboración Propia

## **6. Diagnóstico del Proyecto**

### **6.1. Análisis de Sensibilidad**

El proyecto será factible de implementación cuando la tecnología baje los costos de producción del hidrógeno y logre un valor competitivo al actual valor del Diesel por cada 100 Kilómetros recorridos, o bien que se produzca un aumento significativo del precio del petróleo, cosa que parece no ser la tendencia actual. Para esto, será necesario trabajar sobre las variables más significativas, las cuales están relacionadas con las principales componentes que hacen al precio del Hidrógeno, como los costos de la tecnología utilizada, costos de la energía necesaria para la obtención del mismo y fundamentalmente, como sucede en todos los países donde se está implementando, los incentivos fiscales y beneficios que podrán otorgar los estados municipales, provinciales y/o nacionales a este tipo de “proyectos verdes”.

El presente trabajo presenta con mayor detalle estas consideraciones, las cuales pueden encontrarse en el capítulo que sigue a continuación.

### **6.2. Análisis de Sensibilidades para Alcanzar la Sustentabilidad del Proyecto**

Es importante considerar aquellos factores críticos que potencien al Hidrógeno como la alternativa más sustentable y de menor costo, logrando posicionarlo como la principal fuente de energía en materia de transporte.

En el mundo se proyecta que, en el futuro, el Costo Total de Propiedad (TCO), concepto explicado en el presente trabajo, relacionado a las tecnologías basadas en Hidrógeno como fuente de energía, se verá reducido significativamente, llegando a equiparar los costos por Km de los vehículos tradicionales, siendo el precio del Hidrógeno una de las componentes fundamentales del mencionado TCO. Se cree que para el año 2026 el TCO relacionado a los vehículos con tecnología Fuel Cell, llegará al punto de equilibrio respecto al vehículo de combustión interna y en el año 2027, llegará a equiparar al vehículo a batería.

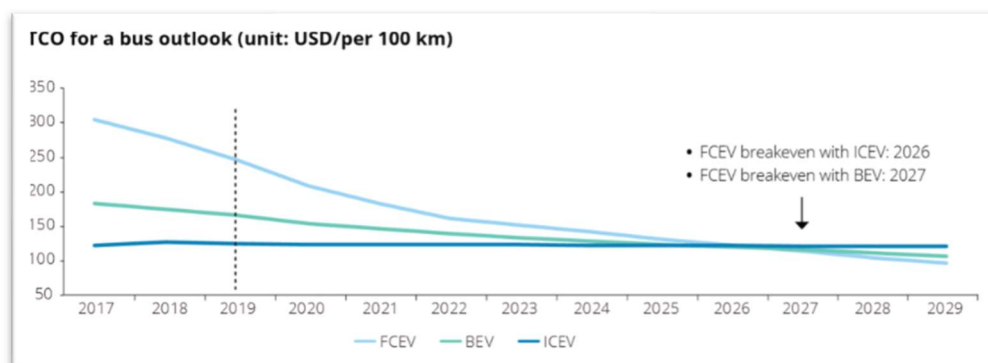


Ilustración 11 - Proyección del Costo Total de Propiedad (TCO) y Análisis del Break Even. Fuente: *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Volume 1, Deloitte & Ballard Power Systems Inc.*

A continuación, se enumeran los principales factores que podrían influir significativamente para la reducción del precio del Hidrógeno en particular, logrando así un TCO competitivo y un mejor posicionamiento para la demanda en Argentina.

### 6.2.1. Reducción en los Costos de Energía y Mayor Eficiencia en la Producción de Hidrógeno

En primer lugar, la energía es la principal componente para la obtención del Hidrógeno del presente trabajo. Por esta razón, es la principal variable sobre la cual debe hacerse foco para contar con una importante reducción en los costos. Una manera de reducirlos es contar con una tecnología más eficiente y que, por consiguiente, me permita obtener una mayor cantidad de Hidrógeno ante un mismo consumo energético. Las tecnologías para el proceso elegido en este trabajo continúan en constante evolución, logrando ser cada vez más productivas.

El escenario estimado al año 2025 para la Unión Europea, plantea que en el caso de descender significativamente el costo de la energía eléctrica en un orden del 50% (hidrógeno producido mediante la electrólisis del agua) y mejorar la eficiencia de los electrolizadores para producir hidrógeno en el orden del 15%, se produciría un ahorro aproximado de 45% respecto del consumo de buses a gas oil, utilizando hidrógeno en buses (L. Iannuzzi, 2018, p.95).

Para el presente proyecto, si consideráramos una reducción significativa del costo de la energía, por ejemplo, en un orden del 40%, lograríamos contar con una TIR del 23,47 %, sin modificar el precio estipulado. Ahora, bien, a fin de contar con un precio más competitivo, si redujéramos el mismo gracias a la reducción de los costos de energía mencionado, alcanzaríamos un costo de **USD 73,39.- por cada 100 Kilómetros**, volviendo a una TIR del 15% pero logrando reducir la brecha entre el costo actual y su valor de Break Even.

### **6.2.2. Reducción en el costo de los Buses Basados en Fuel Cell**

La decisión de reemplazo de los buses convencionales para la demanda debe ser atractivo, no sólo por el costo del combustible, sino también por los costos asociados a los buses en sí. Hoy en día, los buses de celdas de combustible a base de Hidrógeno (FCBs) son más caros que los Buses actuales y convencionales. No obstante, es una tecnología que va madurando con los años, debido a los avances tecnológicos y por supuesto la escala de producción.

De acuerdo con el artículo “Fuel Cell Electric Buses: An Attractive Value for Zero Emission Buses in the United Kingdom”, desde los primeros desarrollos, los buses basados en celdas de combustible han reducido los precios en un 76% entre los años 90 y el año 2015. Actualmente, se está proyectando una curva descendiente sobre los precios de estos vehículos. Hoy en día, si se considera una producción de buses a escala, en Europa podrían conseguirse buses en un orden de magnitud de 600.000 Euros. Se prevé que, para los próximos 10 años, la curva continúe descendiendo y logren adquirirse buses a valores aproximados de 400.000 Euros. Si a su vez se lograra algún tipo de incentivo, lograrían aproximarse a los valores de los buses convencionales. La reducción de los costos está principalmente determinada por el desarrollo tecnológico de las celdas, volumen de producción, evolución del tren motriz eléctrico, reducción en los costos de las partes que integran al bus y competencia.

La baja en los costos de los buses ayudaría a reducir el TCO asociado a la demanda, el cual en conjunto con los costos del combustible por cada 100 Kms., lograría acercarse cada vez mas al cambio de tecnología. (N. Pocard, 2016, p. 8).

### **6.2.3. Aumento del Costo Total de Propiedad (TCO) con Buses de Combustión Interna**

Si la demanda no cambia su tecnología, ya hay estudios de Europa como el caso del “Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe”, en donde se prevé que para los próximos 10 años el TCO aumentará alrededor de un 16% (R. Berger, 2015, p.21).

Esto se debe, principalmente al aumento del combustible fósil, producto de impuestos a las emisiones de carbono que buscan desalentar este tipo de combustibles. Como ejemplo, en Alemania, las plantas de generación de energía basadas en carbón ya cuentan con este impuesto, el cual es de USD 20.- por tonelada de CO<sub>2eq</sub> emitida. Con este tipo de políticas, se lograría acortar aún más la diferencia de costos TCO entre una tecnología y otra, del lado de la demanda.

#### **6.2.4. Reducción de los Costos de la Tecnología Utilizada Para la Obtención del Hidrógeno Mediante el Proceso de la Electrólisis del Agua**

De acuerdo con el artículo “Cost approach for Hydrogen production by Electrolysis (PEM Technology)”, se estima que para los próximos 15 a 20 años, el equipo Electrolizador, pieza fundamental para la obtención del Hidrógeno mediante el proceso de la electrólisis del agua, se reducirá a valores del USD 200.- por KW (cuando actualmente su costo es de USD 1.300.- como se indicó en el análisis de costos), lo que reduciría significativamente los costos de inversión para la infraestructura necesaria para la obtención del Hidrógeno. (A. Hernández Torres, 2019).

Si esto sucediera, la inversión del presente proyecto se reduciría un 51%. De ser así, se reduciría el CAPEX y el proyecto actual lograría, o bien contar con una TIR de 31,9%, o ante una misma TIR de 15%, contar con un precio de venta de USD 8,10.- por Kg. de Hidrógeno. Como conclusión, la demanda contaría con un costo de **USD 72,92.- por cada 100 Kilómetros recorridos.**

Por otro lado, el desarrollo de tecnología local para fabricación de equipos nacionales para el proceso de la electrólisis del agua podría reducir los costos relacionados a la inversión mencionada y así lograr un precio más competitivo. Este es un punto que, si bien no forma parte del presente estudio, es importante se tenga en cuenta para un análisis más profundo analizando la posibilidad de lograr la reducción de costos por KW de potencia.

#### **6.2.5. Mayor impulso Nacional para el Desarrollo de Tecnologías más Sustentables**

Tarde o temprano, la Argentina deberá decidir por una tecnología más sustentable en términos de transporte. A continuación, se detallan conceptos que pudieran de alguna manera, formar parte de una estrategia nacional en vías hacia un transporte más sustentable.

- En primer lugar y actualmente, la Ciudad de Buenos Aires cuenta con la Ley Nro. 1356, de acuerdo con el Ministerio de Transporte, Presidencia de la Nación, la cual tiene como objeto la preservación del recurso aire y prevención y control de la contaminación atmosférica. A su vez, la Ciudad de Buenos Aires ya cuenta con un Plan de Movilidad Limpia y está realizando pruebas piloto con Buses Eléctricos, mediante los cuales cuentan con incentivos para los proyectos como una inversión a cargo de la Ciudad, a nivel nacional tasa del 0% de arancel en las importaciones y un subsidio a la demanda durante el piloto.



- En Argentina se encuentra promulgada la Ley del Hidrógeno (Ley Nro. 26.123) desde el año 2005. Dado el auge que este combustible está teniendo en los últimos años en el mundo, es importante que Argentina logre actualizar la misma y desarrollar normativas y regulaciones, incentivos mediante la reducción de cargas impositivas que favorezcan al valor de venta del Hidrógeno, tales como impuesto a los sellos, ingresos brutos, etc.
- Actualmente la Argentina cuenta con leyes de incentivos para la movilidad eléctrica. Por ejemplo, en la ciudad de Buenos Aires, las patentes por automóviles híbridos tienen una tasa del 0%. A su vez y en línea con los objetivos de desarrollo sustentable, también es importante que Argentina cuente con fomentos dirigidos a la demanda con el fin de subsidiar los costos del Hidrógeno y la inversión necesaria para el cambio de flotas en términos de contar con una reducción en el Costo Total de Propiedad (TCO: Total Cost Ownership), medido en costo por Kilómetro.
- Posibilidad que Argentina en algún momento y dentro de su estrategia para la reducción de emisiones, cuente con un plan concreto de descarbonización con leyes que desalientan el consumo de combustibles fósiles, yendo a la disminución de la exploración y/o explotación. Esto generaría el incremento sobre el valor de los combustibles fósiles, logrando llegar más rápido al break-even. No obstante, este punto está lejos de materializarse por el momento, ya que contrariamente todavía cuenta con incentivos para dicha explotación.
  - Incentivos gubernamentales para energías renovables. En Argentina, el programa RenovAr, fruto de la ley 27.191, define las bases y condiciones sobre una convocatoria abierta nacional e internacional a fin de fomentar la generación de energías renovables para sumarlas a la oferta eléctrica del país, con el objetivo de instalar hasta 10.000 Mw hacia el 2025 en el Mercado Eléctrico Mayorista.
  - Por último, existe interés de otras naciones y/o empresas internacionales para la inversión y desarrollo de estas nuevas tecnologías. Países como Japón, está buscando otros países donde invertir en pos de su estrategia relacionada a un transporte más sustentable a base de Hidrógeno como principal fuente de energía. Empresas como Toyota que buscan penetrar en nuevos mercados con relación a sus soluciones basadas en Hidrógeno, lo que podría celebrarse algún acuerdo con Argentina.

### **6.2.6. Bonos de Carbono – Upsize Actual del Proyecto**

Por las averiguaciones realizadas el presente proyecto aplica para la obtención de bonos del carbono, que permitirían mejorar la rentabilidad del proyecto. Los Bonos del Carbono son emitidos por Naciones Unidas y nacen en el Tratado de Kyoto, como un instrumento financiero para incentivar la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Las empresas o sujetos pueden presentar un proyecto ante consultoras certificadas que revisan y presentan el mismo. Una vez aprobado el proyecto, mediante mecanismos de auditoría se emite 1 bono del carbono por cada tonelada de CO<sub>2</sub> que se deja de emitir, considerando el balance entre ambos sistemas. La cotización de los bonos es variable, ya sea que se logren colocar a través de Naciones Unidas o en mercados privados, donde el precio es acordado con la parte compradora. Estas son empresas preocupadas por el medio ambiente y que emiten CO<sub>2</sub> y no tienen posibilidad de reducir el mismo. Ante esto compensan voluntariamente o para el cumplimiento de alguna legislación, la no reducción de CO<sub>2</sub> con la compra de Bonos del Carbono obtenidos por proyectos como el presente. El precio estimado en la actualidad oscila entre USD 20.- y USD 40.-, amplio rango de precios al no contar con un mercado bursátil de cotización. Los proyectos aprobados se otorgan por 7 años con posibilidad de renovarlos por dos períodos, lo que equivale a 21 años de otorgamiento de bonos. Según nuestro cálculo realizado en el capítulo 5.1 - *Beneficios del Proyecto*, el presente proyecto cuenta con un ahorro de emisiones de aproximadamente **712,15 Ton CO<sub>2eq</sub>** por año, lo que equivale a **USD 14.243,02.-** por año, considerando la cotización piso mencionada y lograría aumentar su TIR en 1 punto. Si bien en este caso la diferencia no sería muy significativa, es interesante si se analiza en una solución de mayor escala.

### **6.2.7. Economía de Escala**

Otro factor importante tiene que ver con la economía de escala, la cual está relacionada a la cantidad de Hidrógeno que sería necesario producir diariamente. Es de esperar que, a mayor demanda, será mayor la escala de producción y de esta forma se lograría un menor costo unitario del Hidrógeno. Debido a que el presente proyecto establece las condiciones necesarias para la instalación de una prueba piloto, no es objeto de estudio el análisis de escala mencionado, pero es un tema que debe considerarse como un posible Upsize.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo no sólo es un estudio de factibilidad técnica y económica para la venta de Hidrógeno con una determinada tecnología a fin de proveer este combustible a una demanda potencial, sino que también corresponde a un proyecto de reducción de emisiones, buscando a su vez, los valores de break-even para una transición energética más sustentable. De la misma forma, el mundo está pagando un costo muy elevado por el simple hecho de depender del petróleo, generando conflictos a nivel mundial y, por consiguiente, grandes impactos en la estabilidad económica de los países.

En cuanto a la Argentina, se debe tomar una decisión sobre dicha transición mediante un sólido plan estratégico con una visión orientada a los objetivos de las Naciones Unidas logrando promover leyes, reglamentaciones, planes e incentivos que potencien el desarrollo de combustibles más sustentables en reemplazo de los fósiles, desalentando la utilización de tecnologías “sucias”. Por esta razón, es necesario se realicen estudios que aporten al análisis para la implementación de nuevas soluciones y con tecnologías que actualmente cuentan con un gran avance a nivel mundial. En términos de transporte de pasajeros y a partir de este contexto, se requerirá analizar cuáles de todas las alternativas será la más indicada, teniendo en cuenta sus costos, no sólo directos, sino también en conjunto al impacto ambiental. Con relación a este punto, queda abierta la incógnita sobre cómo sería un escenario similar, pero mediante el proceso de Reformado de Gas como tecnología elegida, en reemplazo de la electrólisis del agua. No se analizó en este trabajo ya que significaría consumir “hidrógeno gris” y no se cubriría el objetivo ambiental buscado en conjunto con el económico.

En cuanto al Hidrógeno, está demostrado que sus costos se van reduciendo año tras año, producto de los avances tecnológicos y las economías de escala. Si bien se indicaron las debilidades detectadas, todas cuentan un potencial de transformarse en oportunidades a largo plazo, postulando al Hidrógeno como una alternativa con un gran potencial y con un óptimo punto de equilibrio entre costos, eficiencia e impacto ambiental en todo su ciclo de vida. Por otro lado, actualmente en el país existe una ley del Hidrógeno, pero la misma debe ser revisada, actualizada y reglamentada.

Considerando todo lo expuesto en el presente trabajo, se concluye que el Hidrógeno renovable es posible en la Argentina.

## 8. Bibliografía y Fuentes de Información General

- Berger, R. (2015). Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. FCH JU. Munich, Alemania.
- Contestabile, M. (2011). Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner? Imperial College Centre for Energy Policy and Technology. Reino Unido.
- Deloitte & Ballard Power Systems Inc (2020). Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Volume 1.
- Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/>
- European Commission. <https://ec.europa.eu>
- Dr. Reuter, B. (2017). New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling. Alemania. Recuperado de <https://www.fuelcellbuses.eu/>.
- Hernandez Torres, A. (2019). Cost approach for Hydrogen production by Electrolysis (PEM Technology). Recuperado de <https://www.linkedin.com/>
- Iannuzzi, L. (2019). Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs. buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina. (Tesis de Maestría). International Journal of Hydrogen Energy Code: HE-D-20-01069. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario.
- Iannuzzi, L. (2020). Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs. buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina. (Tesis de Maestría). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario. Congreso WECH 2020, Istanbul, Turquía.
- IEA (2019). The Future of hydrogen Sising opportunities - Report prepared by the IEA for the G20. Japón. Recuperado de <http://www.iea.org>
- Misión Cavendish (2020). Chile. – Recuperado de <https://clubdeinnovacion.com/>
- Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe, (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

- Prof. Capros, P. (2014). EU Energy, Transport and GHG Emissions. Trend to 2050. Luxemburgo. Recuperado de <https://ec.europa.eu>
- Pocard, N. (2016). Fuel Cell Electric Buses: An Attractive Value for Zero Emission Buses in the United Kingdom. Ballard Power Systems Inc, British Columbia, Canadá.
- Rapier R. (2020). Estimating the Carbon Footprint of Hydrogen Production. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.forbes.com/>
- Ross, S. (2010). Fundamentos de Finanzas Corporativas. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019). McGraw-Hill, Méjico.
- Kotler, P. (2013). Fundamentos de marketing. Pearson Education. Méjico.
- Williams, J. (2015). Pathways to Deep Decarbonization in the United States. San Francisco, Estados Unidos.

## 9. Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 - Emisiones de CO2 y resultados probabilísticos de temperatura basado en los anuncios gubernamentales asociados con el período previo a la conferencia climática de París. Fuente: U.S. Global Change Research Program: Climate Science Special Report, Fourth National Climate Assessment (NCA4), Volume I, chapter 14.2 .....	6
Ilustración 2 - Fuentes de Energía y Métodos de Conversión. Fuente: What is Hydrogen from Gasuine NL .....	9
Ilustración 3 - Evolución de los Tipos de Hidrógeno. Fuente: What is Hydrogen from Gasuine NL .....	10
Ilustración 4 - Anatomía de un Bus con Celdas de Combustible a base Hidrógeno (Fuel Cell Bus, FCB) - Fuente: Ballard Power Systems Inc. ....	11
Ilustración 5 – Características de un FCB – Fuente: FCH - Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities .....	12
Ilustración 6 - Esquema de un proceso Típico para la obtención y provisión de Hidrógeno. Fuente: New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling .....	13
Ilustración 7 - Base instalada del proyecto CHIC – Fuente: CHIC Project – Element Energy - <a href="https://hydrogeneurope.eu/project/chic">https://hydrogeneurope.eu/project/chic</a> .....	15
Ilustración 8 - Base instalada y proyecciones para este tipo de tecnologías – Fuente: Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Volume 1, Deloitte & Ballard Power Systems Inc .....	16
Ilustración 9 - Transiciones de Tecnología Diesel y Tecnología de Vehículos de Celdas de Combustible a Hidrógeno (FCVs) en el Mercado – Fuente: Elaboración Propia, basado en el esquema de la Matriz del del BCG. ....	18
Ilustración 10 - Comparativa de Emisiones – Obtención del Gasoil vs. Obtención del Hidrógeno On-Site mediante el proceso de Electrólisis del Agua – Fuente: ACV de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina, L. Iannuzzi - 2018.....	22
Ilustración 11 - Proyección del Costo Total de Propiedad (TCO) y Análisis del Break Even. Fuente: Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Volume 1, Deloitte & Ballard Power Systems Inc.....	37

## 10. Lista de Tablas

Tabla 1 - Comparativa entre FCBs y BEBs – Fuente: - Fuente: Ballard Power Systems Inc.	20
Tabla 2 –Matriz FODA.....	24
Tabla 3 - Comparación de las principales componentes que influyen sobre el TCO – Fuente: Mision Cavendish, Chile, 2020. ....	25
Tabla 4 - Estado de Resultados y Flujo de Fondos del Proyecto Expresado en Miles de Dólares - Fuente: Elaboración Propia .....	33
Tabla 5 - Estructura de Costos por Unidad de Hidrógeno. Fuente: Elaboración Propia .....	33
Tabla 6 - Análisis de Break Even – Fuente: Elaboración Propia .....	34
Tabla 7 - Estado de Resultados y Flujo de Fondos del Proyecto considerando el Precio de venta del Break Even actual de USD 3,54.- por Kg de Hidrógeno Expresado en Miles de Dólares – Fuente: Elaboración Propia .....	35