



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**Evaluación ambiental y económica del cambio de matriz
energética considerando como alternativa el hidrógeno
verde en el transporte público. Caso de estudio línea 102
de Expreso Rancagua**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: AYLEEN XIOMARA NEGUIMAN CARRASCO

PROFESOR GUÍA: JAIRO VALENCIA MUÑOZ

VALPARAÍSO, 2022

Agradecimientos

Antes de los agradecimientos académicos, quisiera agradecer primero a mi familia, a mi padre Adolfo Neguiman y mi madre Ruth Carrasco, a quienes amo y admiro, sin sus enseñanzas no sería la persona que soy hoy, y sobre todo por la paciencia que me han tenido a lo largo de estos años, de igual manera quiero agradecer a mis hermanos que sin su apoyo emocional no podría haber superado las dificultades de estos años en la universidad.

A mis amigos más cercanos que forjé en la Universidad Valparaíso, Catalina Cortés Loyola, Ignacio Valdés y Erik Gamboa Palominos, quienes me apoyaron en muchos momentos donde quería rendirme y siempre estuvieron conmigo para alegrarme los días y hacer más ameno el paso por la universidad.

Agradecer también a Valeria Vargas Mansilla y Yirian Calderón Cáceres, amigas que conocí en mi paso por una primera carrera en el año 2014, quienes me dieron el valor para buscar lo que realmente me gusta, gracias a su apoyo incondicional pude dar el paso para estudiar Ingeniería Ambiental.

Un agradecimiento especial a Giannina Bonta Sepúlveda, Aiara Anahel Becche Dina, Manuel Guerra, Ulises Daniel Castellanos Fernández, Ramón Polo, Mayco Breitenbucher y Jarah Wolf, quienes, a pesar de no tener un contacto físico, siempre estuvieron para mí en los buenos y malos momentos, además me demostraron que no se necesita un contacto físico frecuente para querer a las personas, y sobre todo son quienes más me animaron en esta última etapa de la carrera.

Especial reconocimiento a mi profesor guía Jairo Valencia Muñoz, a quien agradezco la paciencia, la buena disposición y la ayuda para realizar el presente trabajo, además de los ánimos que me brindaba en cada reunión para seguir adelante con mi proyecto de título.

A todos los mencionados, quiero darles mis infinitas gracias ya que, sin ellos, este proceso hubiese sido más difícil.

Resumen

Chile ha publicado diversas estrategias para reducir las emisiones de contaminantes en el país, entre estas se encuentra cambiar la matriz energética en el transporte, donde el gobierno presenta la opción de la electromovilidad con combustibles de baja o nula emisión en operación, dando énfasis en el uso de hidrógeno verde como alternativa de combustible.

La comuna de Rancagua en la actualidad tiene un número significativo de vehículos circulando lo cual contribuye a la contaminación atmosférica de la región de O'Higgins en donde la mayor parte de las emisiones provienen del transporte terrestre. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar ambiental y económicamente la implementación de hidrógeno verde en el transporte público urbano, basándose principalmente en estimaciones teóricas y recopilación bibliográfica sobre el uso de esta tecnología como combustible.

Los cálculos teóricos se centraron en demostrar que es factible el uso de electromovilidad en el recorrido 102 de la línea Expreso Rancagua, según la zona en donde se mueve esta línea, además encaja dentro de los parámetros energéticos de diversos buses con celda de hidrógeno verde incorporada, debido a la baja pendiente que existe en la ciudad. Sin embargo, aún no es viable para la empresa la implementación de esta tecnología debido a su alto costo de inversión.

Índice

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Antecedentes generales..... | 1 |
| 1.2 | Gases de efecto invernadero | 3 |
| 1.3 | Combustible fósil..... | 5 |
| 1.4 | Huella de Carbono..... | 8 |
| 1.5 | Electromovilidad | 11 |
| 1.6 | Hidrógeno verde..... | 13 |
| 2 | Problema | 15 |
| 3 | Objetivos | 16 |
| 3.1 | Objetivo General | 16 |
| 3.2 | Objetivos específicos..... | 16 |
| 4 | Metodología | 17 |
| 4.1 | Recopilación de antecedentes de la línea 102 de Expreso Rancagua..... | 17 |
| 4.2 | Estimación huella de carbono | 17 |
| 4.2.1 | Emisiones de CO ₂ | 18 |
| 4.2.2 | Emisiones de CH ₄ y N ₂ O..... | 19 |
| 4.2.3 | Elección de los factores de emisión | 20 |
| 4.3 | Analizar alternativa de hidrógeno verde y requerimiento de energía que se necesita para movilizar el microbús | 21 |
| 4.4 | Estimación costos de implementación..... | 23 |
| 5 | Resultados | 25 |
| 5.1 | Recopilación de antecedentes de la línea 102 de Expreso Rancagua..... | 25 |
| 5.2 | Estimación huella de carbono | 27 |
| 5.3 | Analizar alternativa de hidrógeno verde y requerimiento de energía que se necesita para movilizar el microbús | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.3.1 | Buses eléctricos | 29 |
| 5.3.2 | Buses con hidrógeno verde | 30 |
| 5.3.3 | Proyección en Chile de ambos tipos de buses | 30 |
| 5.3.4 | Cálculo requerimiento de energía..... | 32 |
| 5.4 | Estimación costos de implementación..... | 37 |
| 6 | Discusión | 44 |
| 7 | Conclusión | 46 |
| 8 | Bibliografía | 48 |
| 9 | Anexos | 54 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 4.1: Factores de emisión de CO ₂ del transporte terrestre | 20 |
| Tabla 4.2: Factores de emisión de CH ₄ y N ₂ O del transporte terrestre | 21 |
| Tabla 5.1: Datos del trayecto ida y regreso del caso de estudio. | 26 |
| Tabla 5.2: Tabla resumen de resultados de emisiones en un año calendario de la línea 102. | 28 |
| Tabla 5.3: Comparación características de autobuses con sistema de carga lenta o rápida. | 30 |
| Tabla 5.4: Características principales bus eléctrico BYD K7..... | 32 |
| Tabla 5.5: Pendiente máxima del trayecto línea 102. | 33 |
| Tabla 5.6: Resultados cálculos de fuerza. | 34 |
| Tabla 5.7: Resumen consumo bus BYD K7..... | 37 |
| Tabla 5.8: Buses de hidrógeno verde y sus características principales. | 38 |
| Tabla 5.9: Valor aproximados de buses diésel e hidrógeno verde. | 39 |
| Tabla 5.10: VAC hipotético del caso de estudio. | 41 |
| Tabla 5.11: Resumen resultados consumo de hidrógeno. | 42 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Formación del Carbón..... | 7 |
| Figura 1.2: Formación del Petróleo y Gas Natural | 7 |
| Figura 1.3: Vehículo eléctrico a baterías..... | 12 |
| Figura 1.4: Vehículo Híbrido Enchufable..... | 12 |
| Figura 1.5: Celda de hidrógeno verde..... | 14 |
| Figura 4.1: Árbol de decisión para emisiones de CO ₂ | 18 |
| Figura 4.2: Árbol de decisión para emisiones de CH ₄ y N ₂ O | 19 |
| Figura 5.1: Recorrido ida (línea azul) y regreso (línea roja) de la línea 102..... | 26 |
| Figura 5.2: Bus eléctrico marca BYD K7. | 33 |
| Figura 5.3: (A) Bus hidrógeno verde 70 pasajeros. | 42 |
| Figura 5.4: (B) Bus diésel 70 pasajeros. | 43 |
| Figura 5.5: (C) Microbus diésel 30 pasajeros. | 43 |

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

La contaminación atmosférica es la presencia de elementos en el aire los cuales pueden impactar negativamente en el medio ambiente y en el ser humano, estos elementos pueden ser de origen natural o producidos por el ser humano directa o indirectamente (MMA, s.f.). La constante exposición a la contaminación atmosférica en el ser humano puede traer problemas a la salud, especialmente a ancianos, niños, mujeres embarazadas y personas con enfermedades crónicas, siendo principalmente enfermedades respiratorias y cardiovasculares las que son ocasionadas por este tipo de contaminación. Sin embargo, no sólo existen consecuencias en el ser humano, ya que, el medio ambiente también se ve afectado negativamente por el aire contaminado, debido a que éste es arrastrado por el viento y la lluvia, factores que ayudan a que la contaminación abarque grandes distancias. La contaminación atmosférica ocasiona que las plantas no puedan realizar la fotosíntesis de manera efectiva lo que perjudica la incorporación de oxígeno (O_2) al aire, asimismo la contaminación contribuye a la formación de lluvia ácida la cual daña el agua dulce y los suelos. Por otro lado, una de las consecuencias ambientales más conocidas es la acumulación de gases en la atmósfera, generando problemas como el calentamiento global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), de los cuales el gas que más se concentra en la atmósfera es el dióxido de carbono (CO_2), concentración que aumenta aproximadamente un 1% al año (MINAM, s.f.).

La industria, el transporte y la energía son los principales sectores contribuyentes al aumento de gases en la atmósfera a nivel mundial y nacional. El sector transporte es responsable de 20% aproximadamente de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), de este valor el 75% pertenece al transporte terrestre o de carretera, siendo una de las áreas más importantes a cambiar para la descarbonización a nivel nacional (MinEnergía, 2021), debido a que actualmente la fuente principal de combustible que se utiliza en el transporte terrestre es el petróleo.

El combustible fósil es denominado un recurso no renovable debido a que es limitado, es decir, que una vez consumido se agota el abastecimiento y por lo general, el ritmo de uso es mayor a su regeneración. Se trata de biomasa de tiempos milenarios sometida a procesos de transformación por presión y temperatura. Son combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas natural y licuado

del petróleo (Vivanco, 2020). Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y a nivel nacional (ONU, s.f.).

Debido a que el transporte es algo imprescindible en la actualidad para el ser humano, es necesario establecer nuevas tecnologías para facilitar la movilización de las comunidades, por esto es necesario investigar energías renovables no convencionales (ERNC), este tipo de energía se caracteriza en no consumir ni agotar la fuente de la cual proviene, es decir, es ilimitada. Dos ejemplos importantes de energía ERNC son la eólica y la solar, las cuales ya tienen un desarrollo grande dentro de la industria de la energía, se caracterizan en las formas únicas de generación eléctrica, debido a que su producción depende netamente de la disponibilidad del recurso además de considerarse un tipo de combustible limpio (Mainstream, 2016). En la actualidad el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) suministra energía al 97% de la población chilena. El 57,1% de la capacidad instalada del SEN proviene de energía renovable, en donde dentro de este valor 31,5% se origina en plantas eólicas y solares (Generadoras Chile, 2022).

Como el desarrollo de las energías renovables no convencionales (ERNC) va aumentando esto ha impulsado a investigar la movilidad con tecnologías que produzcan cero emisiones, para poder combatir el calentamiento mundial además de poder descarbonizar la matriz energética del sector transporte, lo cual es una tendencia mundial actualmente. Como resultados de estas investigaciones se ha llegado a las celdas de combustible de hidrógeno verde (FCEV, en inglés) (MinEnergía, 2021). El hidrógeno verde se obtiene a través de la aplicación de electricidad en el agua (H_2O) para separar el hidrógeno (H_2) del oxígeno (O_2), este proceso se llama electrólisis, la cual es esencial que provenga de una fuente renovable y limpia como puede ser la eólica o la solar, además de que el agua para esta reacción puede ser obtenida desde el mar (Fundación Chile, s.f.).

Uno de los mayores beneficios de utilizar hidrógeno verde como combustible es que este elemento posee una alta densidad energética, lo que le permite acumular una gran cantidad de energía por cada kilogramo de hidrógeno (H_2), como también, no producir emisiones de gases ni partículas al ambiente y tener bajo niveles de ruido. Por otro lado, el país geográficamente es favorable a esta nueva industria debido a que a lo largo del territorio nacional cuenta con fuentes renovables con las cuales se puede generar electricidad limpia y a bajo costo (MinEnergía, 2021).

1.2 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) están presentes en la atmósfera de manera natural, estos gases absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes (Centro UC Cambio Global, s.f.). La superficie terrestre absorbe naturalmente el 70% de la radiación solar mientras que el resto es reflejado de vuelta al espacio por reverberación. La radiación solar absorbida se transforma en radiación infrarroja y regresa a la atmósfera. Parte de esta radiación infrarroja es entonces reflejada de vuelta al espacio, mientras que la otra parte es retenida por los gases de efecto invernadero en la atmósfera, incrementando la temperatura global del planeta. Esto es el efecto invernadero (Climate Consulting, s.f.).

La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico. De 2000 a 2010 las emisiones registraron un máximo histórico, el cual ha hecho que las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) alcancen niveles sin precedentes en al menos los últimos 800 000 años, lo que ha dado lugar a un secuestro de energía por el sistema climático. (IPCC, 2014)

Se describen cuatro gases de efecto invernadero, los cuales son (EPA, 2022):

- Dióxido de carbono (CO_2): este gas ingresa al ambiente debido a la quema de combustible fósil. Una de las formas con que este gas se puede eliminar de la atmósfera es a través del proceso de fotosíntesis de las plantas.
- Metano (CH_4): este gas se emite en actividades ganaderas y/o agrícolas debido a la descomposición de residuos orgánicos, también se emite durante la producción y transporte del combustible fósil.
- Óxido nitroso (N_2O): se emite durante la combustión del combustible fósil y de residuos sólidos, también durante el tratamiento de aguas residuales y en actividades agrícolas e industriales.

- Gases fluorados: en este tipo de gas entran los componentes hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y trifluoruro de nitrógeno, los cuales se emiten en diversos procesos industriales, a pesar de que se emiten en pocas cantidades son conocidos como gases de alto potencial de calentamiento global.

Los gases permanecen en la atmósfera durante diferentes periodos de tiempo, puede ser desde pocos años hasta miles de años. Cabe destacar que estos gases permanecen en la atmósfera el tiempo suficiente para que puedan mezclarse bien, lo cual significa que la cantidad que se mide de gases de efecto invernadero es aproximadamente igual en todo el mundo, independiente de la fuente de las emisiones. (EPA, 2022)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) establece que para disminuir las consecuencias del efecto invernadero en el medio y sobre todo en la salud humana es esencial limitar el aumento de temperatura global a 1,5°C (IPCC, 2020). Lamentablemente las emisiones que se produjeron en el pasado han hecho inevitable el aumento de temperatura a nivel mundial, sin embargo, aún hay esperanzas de que si en el presente se hacen arreglos en las fuentes principales de energía se podría llegar a combatir de alguna manera el cambio climático (OMS, 2021).

Las consecuencias del efecto invernadero alteran de manera significativa el medio ambiente, como también la salud humana, las principales consecuencias en el medio ambiente son (Climate Consulting, s.f.):

- Deshielo de masas glaciares
- Inundaciones de islas y ciudades costeras
- Huracanes más devastadores
- Migraciones de especies
- Impacto en la agricultura y la ganadería
- Desertificación de zonas fértiles

Además el cambio climático ya está afectando a la salud humana de muchas maneras, por ejemplo, provocando muertes y enfermedades por fenómenos meteorológicos extremos cada vez más

frecuentes, como olas de calor, tormentas e inundaciones, la alteración de los sistemas alimentarios, el aumento de las zoonosis y las enfermedades. (OMS, 2021)

1.3 Combustible fósil

El combustible fósil es la principal fuente de energía en el mundo, su formación se produjo hace millones de años, a partir de materia orgánica proveniente de animales y vegetales muertos. Durante los millones de años de evolución de nuestro planeta, diversas capas de lodo y sedimentos fueron cubriendo estos restos orgánicos, los que sin oxígeno se fueron descomponiendo, transformándose paulatinamente en moléculas de hidrocarburos las que, de acuerdo con la profundidad y presión, fueron dando origen a diferentes tipos de combustible fósil los cuales son el carbón, petróleo y gas. (MinEduc Chile, 2012)

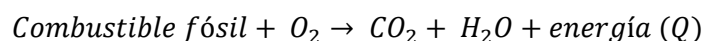
- Carbón: El origen del carbón se debe a una progresiva carbonización de las materias vegetales mediante procesos anaeróbicos (en ausencia de oxígeno). Tras quedar sepultados los restos vegetales en cuencas, las bacterias anaerobias producen reacciones que transforman sus componentes en ácidos húmicos; posteriormente se produce una compactación por presión en capas sucesivas, que junto con la temperatura culmina en la carbonización. Existen 4 tipos de carbón: (Subsecretaría de Minería y Subsecretaría de Economía, 2017)
 - Turba: contiene entre un 45% y 60% de carbono, es el carbón más reciente en cuanto a formación.
 - Lignito: contiene entre un 60% y 75% de carbono, en simples palabras se trata de una turba fosilizada, pero de una calidad superior a esta.
 - Hulla: contiene entre un 80% y 90% de carbono, en forma seca se utiliza como combustible, es un carbón natural negro y brillante.
 - Antracita: contiene un 95% de carbono, se trata de un carbón que arde con dificultad, pero desprende mucho calor, se puede diferenciar de la hulla ya que es más brillante que esta.
- Petróleo: la teoría de Engler sobre la formación del petróleo es la más aceptada en la actualidad, la cual establece que el origen del petróleo es en depósitos de organismos de

origen vegetal y animal que se acumulan en el fondo de aguas marinas. Las bacterias son las encargadas de descomponer estos organismos (SGM, 2017).

- Gas natural: es un combustible fósil de tipo gaseoso, tiene la ventaja de presentar una combustión muy limpia comparada con el carbón y el petróleo (MinEduc Chile, 2012). La teoría de mayor aceptación en la actualidad en cuanto a su formación es que es el resultado de la transformación de la materia orgánica, por acción bacteriana en un comienzo, luego por las transformaciones debidas al incremento de la temperatura por enterramiento junto con los sedimentos en las Cuencas Sedimentarias (ENAP, s.f.).

En la figura 1.1, se visualiza el ciclo de formación de carbono identificando los tipos de carbón existentes según el nivel del sedimento, mientras que en la figura 1.2 se visualiza el proceso de manera simple de formación de petróleo y gas natural.

La combustión o quema de cualquier combustible como leña, papel o plásticos, genera calor; sin embargo, en el caso de los combustibles fósiles, la cantidad de calor es mucho mayor. Esto se debe a que los hidrocarburos, en general, almacenan una gran cantidad de energía en sus enlaces, la que se libera en forma de calor cuando se rompen en el proceso de combustión. Cuando se quema cualquier combustible fósil en presencia de oxígeno, se produce dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y se libera energía en forma de calor (Q). Para iniciar esta reacción (ecuación 1.1) se requiere un iniciador, es decir, un poco de calor (Q) que aumente la temperatura del combustible. (MinEduc Chile, 2012)



Ecuación 1.1: Reacción de combustión de un combustible fósil.

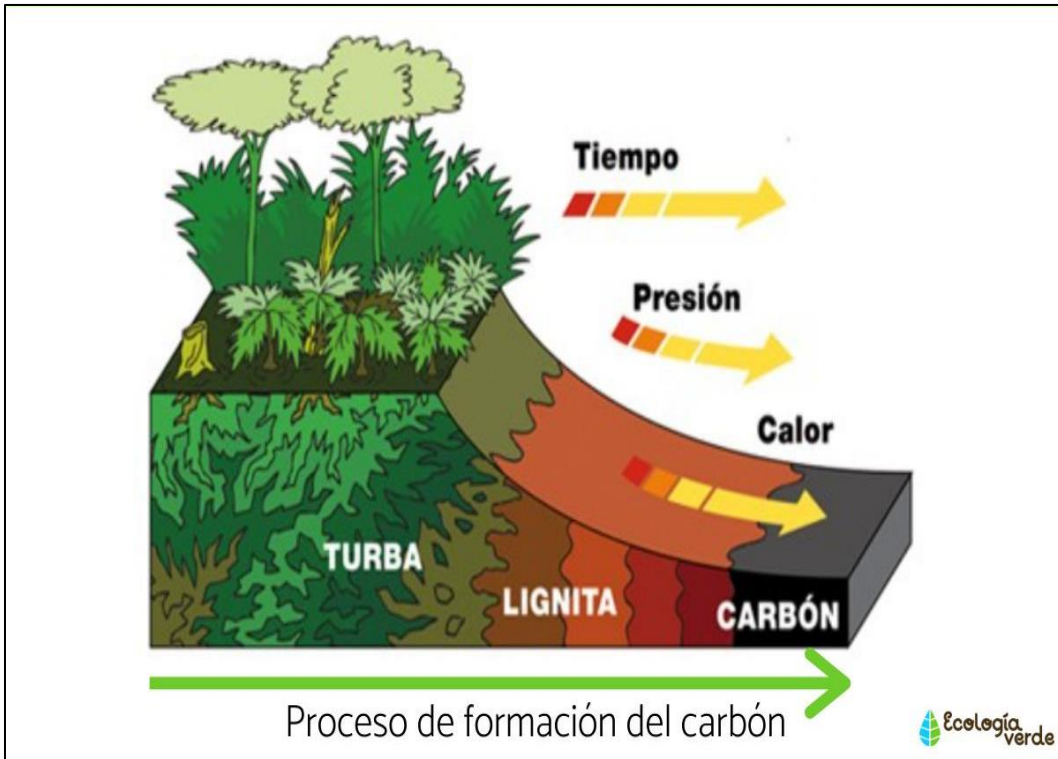


Figura 1.1: Formación del Carbón
(Fuente: Ecología Verde, 2020).

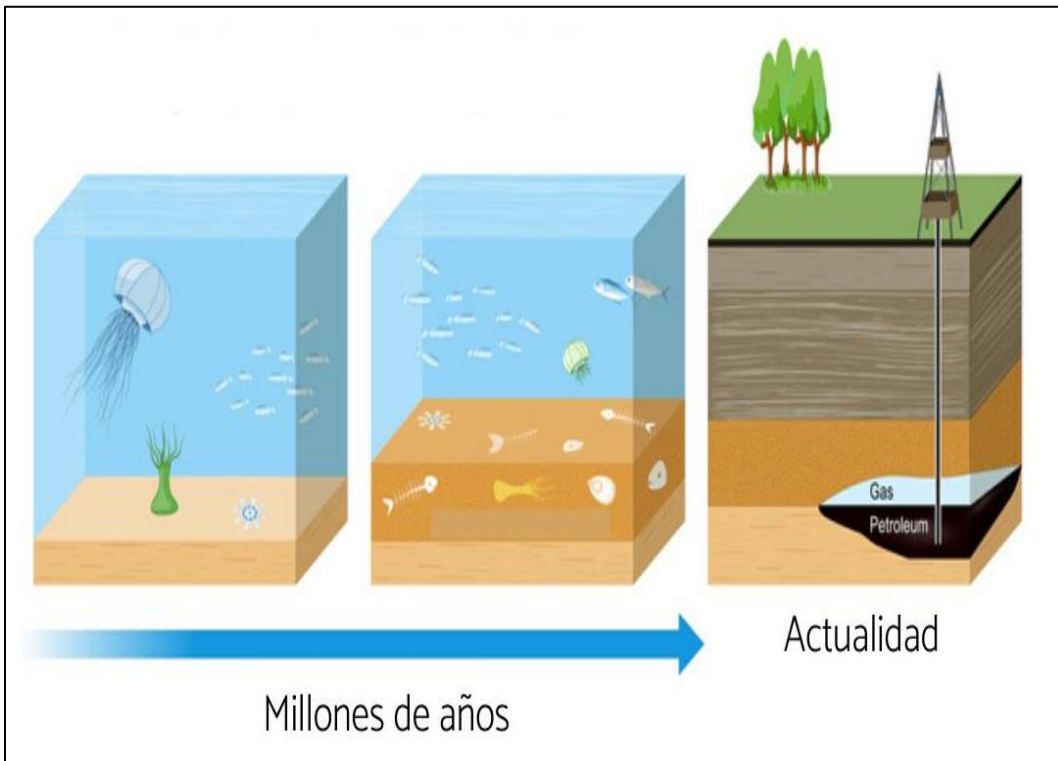


Figura 1.2: Formación del Petróleo y Gas Natural
(Fuente: Ecología Verde, 2020).

1.4 Huella de Carbono

La huella de carbono es una cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de personas, organizaciones y/o productos, sirve como herramienta para poder gestionar nuestras emisiones de manera eficiente para reducir los GEI. Tiene distintos enfoques según el alcance que se quiera llegar (MMA, s.f.):

- a) Enfoque corporativo: Se realiza una evaluación durante un tiempo establecido en alguna organización, generalmente este tiempo es de un año calendario. Para una mejor gestión, el enfoque corporativo agrupa las emisiones según su alcance.
 - i. Alcance 1 o Emisiones directas: son aquellas emisiones provenientes de propiedad de las organizaciones, es decir, emisiones liberadas *in situ* en donde se produce la actividad.
 - ii. Alcance 2 o Emisiones indirectas por consumo y distribución de energía: como su nombre lo indica, corresponden a las emisiones producidas por el consumo de electricidad y/o vapores generados por terceros.
 - iii. Alcance 3 u otras emisiones indirectas: emisiones GEI que no son propiedad de la empresa ni están controladas por ella.
- b) Enfoque de ciclo de vida de un producto o servicio: Evalúa las emisiones de bienes y/o servicios, en su consumo y termino de vida útil.
- c) Enfoque personal: Evalúa las emisiones GEI de una persona en un período de tiempo establecido.
- d) Enfoque en eventos: Como su nombre lo indica, evalúa las emisiones producidas debido al uso de electricidad, transporte, preparación de alimentos, entre otros, durante la preparación y realización de un evento.
- e) Enfoque territorial: Se realiza una evaluación en un área geográfica específica.
- f) Enfoques específicos por industria: Se determina un sector productivo evaluar las emisiones GEI que efectúa para así determinar su impacto en el ambiente.

La base metodológica para realizar el cálculo de la huella de carbono tiene como resultado la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), y está dada por la ecuación 1.2:

$$\text{Huella de Carbono} = \text{Dato Actividad} * \text{Factor de Emisión}$$

Ecuación 1.2: Ecuación Huella de Carbono.

Donde:

- Dato de actividad: nivel de la actividad generadora de GEI.
- Factor de emisión: Cantidad de GEI emitido por cada unidad de la variable “dato de actividad”.

El dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero que mayor influye en el calentamiento global, por este motivo, las emisiones de GEI se miden según este gas. Sin embargo, también hay otros gases que influyen en el efecto invernadero, según el protocolo de Kyoto estos gases son: el metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) hexafluoruro de azufre (SF₆) (ONU, 1998), y desde el año 2012 se suma a la lista el trifluoruro de nitrógeno (NF₃).

Existen numerosas metodologías a nivel internacional para calcular la huella de carbono de organizaciones, estas metodologías están basadas en los principios de relevancia, integridad consistencia, exactitud y transparencia (MITECO, 2019), se detallarán a continuación estas metodologías:

- **Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol):** Desarrollado por World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiales) y World Business Council for Sustainable Development (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible), es uno de los protocolos más utilizados a escala internacional para cuantificar y gestionar las emisiones de GEI.
- **UNE-ISO 14064-1:** se desarrolla en el 2006 la norma ISO 14064 la cual se estructura en 3 partes. La 14064-1 especifica los principios y requisitos, a nivel de organización, para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de GEI. Las otras partes de esta norma se dirigen, por un lado, a proyectos sobre GEI específicamente diseñados para reducir las emisiones de GEI o aumentar la remoción de GEI (ISO 14064-2) y, por otro lado, a la validación y la verificación de los GEI declarados (ISO 14064-3).

- **UNE-ISO 14065:** Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación u otras formas de reconocimiento.
- **UNE-ISO 14069:** Cuantificación e informe de GEI para organizaciones. Constituye la guía para la aplicación de la ISO 14064-1.
- **IPCC 2006 GHG Workbook:** Una completa guía para calcular GEI provenientes de diferentes fuentes y sectores, y que incluye una detallada lista de factores de emisión. Esta guía se creó con el fin de servir de orientación para cuantificar las emisiones de GEI de los inventarios nacionales, pero puede ser de gran utilidad a la hora de calcular la huella de carbono de las organizaciones. Si no se dispone de factores de emisión específicos, el IPCC 2006 GHG Workbook proporciona factores de emisión genéricos que pueden servir para calcular la HC de una organización.
- **Bilan Carbone (Francia):** La Agence d'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Agencia Francesa del Medio Ambiente y Gestión de la Energía), elaboró e implementó a partir de 2004 esta herramienta metodológica dedicada a la medición de emisiones de GEI. Se basa en los contenidos de GHG Protocol e ISO 14064.
- **Indicadores GRI (Global Reporting Initiative):** Iniciativa internacional en la que participan entidades de diversos ámbitos, incluyendo empresas, gobiernos y diferentes organizaciones civiles. Su objetivo es establecer un marco de trabajo común a nivel mundial, con un lenguaje uniforme y parámetros comunes que sirvan para comunicar de una forma clara y transparente las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad a través de las denominadas Memorias de Sostenibilidad. Las mencionadas Memorias comprenden información de diversa índole entre la que se encuentran los Indicadores de desempeño: indicadores que permiten disponer de información comparable respecto al desempeño económico, ambiental y social de la organización.
- **Recomendación de la comisión:** uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida (2013/179/UE).
- **ISAE 3410:** norma internacional aprobada por el Consejo de Normas Internacionales de Auditoría y Aseguramiento (IAASB) en marzo de 2012 sobre Contratos de Aseguramiento de Informes de Gases de Efecto Invernadero.

1.5 Electromovilidad

El concepto de electromovilidad hace referencia al uso de vehículos que utilizan como fuente principal de energía la electricidad. Los automóviles eléctricos tienen múltiples ventajas como por ejemplo ser silenciosos, eficientes y de bajas emisiones. Existen vehículos eléctricos a baterías (BEV) que funcionan exclusivamente con electricidad (figura 1.3) y otros que son híbridos (PHEV) (figura 1.4), es decir, que funcionan con electricidad y combustible fósil, estos últimos son considerados como una tecnología de “transición” hasta que se pueda utilizar completamente vehículos eléctricos. (MinEnergía, 2020)

Un vehículo eléctrico es cero emisiones, es decir, mientras está en movimiento no produce emisiones de gases ni partículas, lo que impacta directamente en mejorar la calidad de aire en las ciudades pues se disminuye la contaminación local. En Chile, 12 ciudades han sido declaradas zonas saturadas en Material Particulado, siendo el sector transporte una de las principales preocupaciones para las autoridades. Mejorando la calidad del aire, se generan beneficios directos en salud y enfermedades respiratorias, principalmente en la población infanto-juvenil y en adultos mayores. Además, en la electromovilidad no ocurre combustión fósil (gasolina, diésel, gas) y por tanto no se producen emisiones directas de CO₂ mientras un vehículo eléctrico se mueve. Este beneficio se logra maximizar cuando la electricidad es generada también con tecnologías de cero emisiones, como lo son las energías renovables. En la actualidad se sabe que un vehículo eléctrico emite hasta 3 veces menos GEI que uno a combustión equivalente. Por estos beneficios que contribuyen a combatir el cambio climático se hace cada vez más importante la electromovilidad a nivel nacional y mundial. (PortalMovilidad, s.f.)

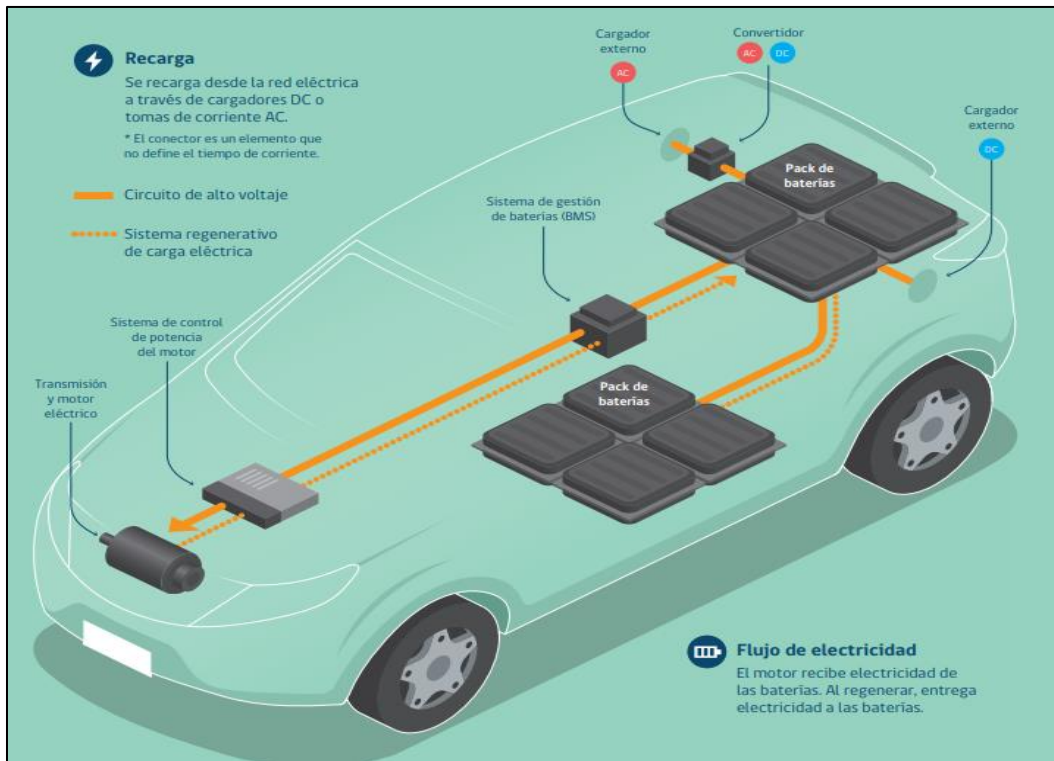


Figura 1.3: Vehículo eléctrico a baterías
 (Fuente: MinEnergía, 2020).

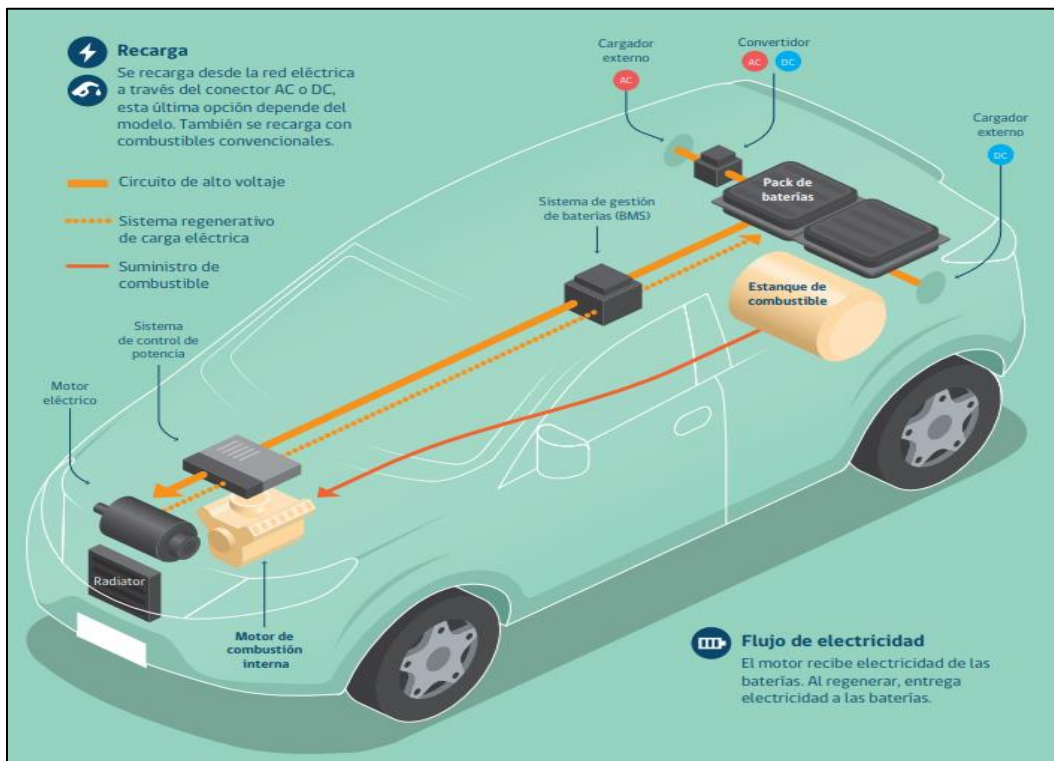
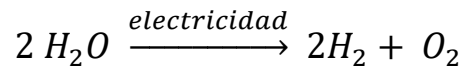


Figura 1.4: Vehículo Híbrido Enchufable
 (Fuente: MinEnergía, 2020).

1.6 Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se produce a partir de la electrolisis del agua. La electrólisis del agua corresponde a la circulación de corriente continua a través de dos electrodos (ánodo y cátodo) en contacto con agua, lo que permite separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno (ecuación 1.3). Es una tecnología madura siendo el método más conocido y limpio para obtener hidrógeno a partir del agua mediante el uso de fuentes renovables (MinEnergía, 2019). Chile a través de la estrategia nacional de hidrógeno da a conocer el potencial que existe en el país para su producción y utilización, estableciendo un potencial de 160 Mton por año de producción (MinEnergía, 2020).



Ecuación 1.3: Reacción del agua al aplicar electricidad.

Recientemente como resultado de múltiples investigaciones a las energías renovables para su uso como fuente de energía en el transporte terrestre, se establecen las celdas de combustible de hidrógeno verde, en donde dentro de la celda existe un proceso electroquímico para generar la electricidad necesaria que necesita un vehículo para funcionar. En la celda de hidrógeno verde (figura 1.5) ingresa hidrógeno proveniente de un estanque dentro del vehículo, los protones del hidrógeno (H_2) atraviesan una membrana PEM, luego de esto, reaccionan con oxígeno (O_2) proveniente del aire ambiente y se libera agua (H_2O) a una temperatura de 100-120°C. Los electrones que no pueden atravesar la membrana se movilizan a un circuito eléctrico externo, en donde se genera la electricidad para el motor. El mayor beneficio de esta celda es que funciona de manera continua mientras se le proporcione hidrógeno (H_2), es decir, no disminuye el flujo eléctrico aún si el tanque se está vaciando. (MinEnergía,2021)

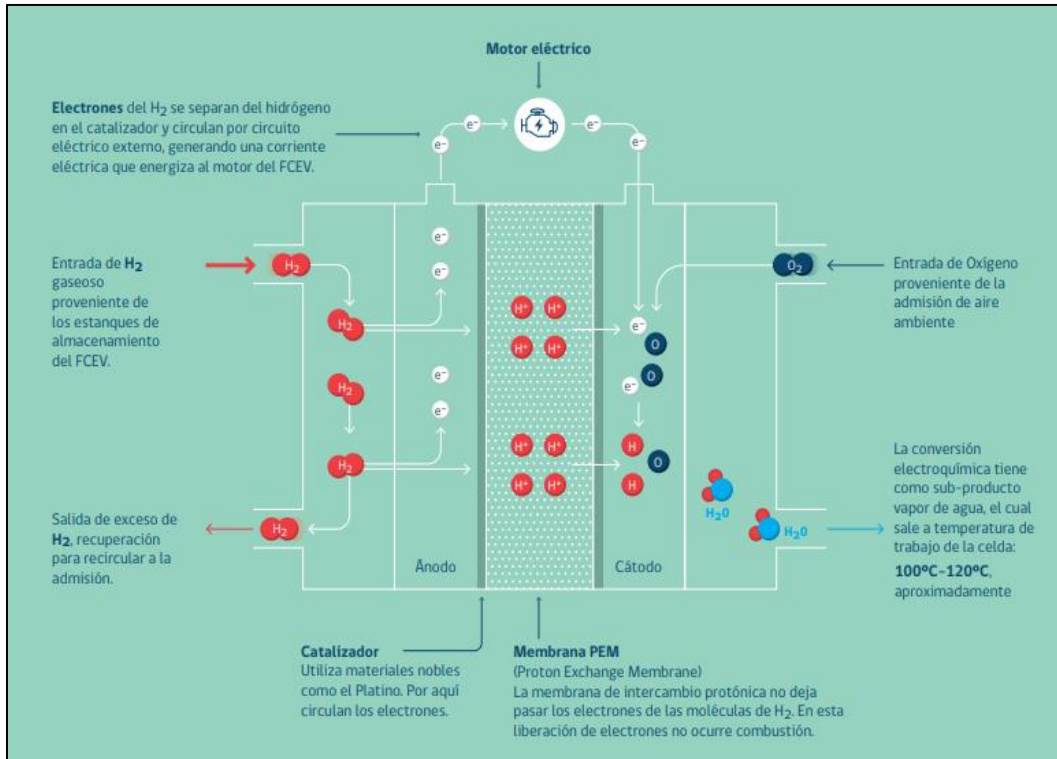


Figura 1.5: Celda de hidrógeno verde
(Fuente: MinEnergía, 2020).

En el año 2020 los modelos de buses de hidrógeno verde ofrecían una autonomía de 400 km por recarga completa, otra ventaja de los buses de hidrógeno verde es el tiempo de recargar, ya que esta tiene una duración de 8-9 minutos (MinEnergía, 2020) a diferencia de otros buses eléctricos los cuales tienen una duración 30 minutos si son de carga rápida, ya que existen vehículos eléctricos de carga lenta que pueden tardar hasta 5 horas (PortalMovilidad, 2021).

2 Problema

Chile establece una política energética de descarbonización, en donde el objetivo para el año 2035 es que el sector de grandes consumidores, minero, industrial y de transporte, hagan uso eficiente de la energía, con activos sistemas de gestión energética y la implementación de activas mejoras de eficiencia energética.

Rancagua es una de las 33 comunas pertenecientes a la región de O'Higgins, Chile. Tiene una superficie de 260,3 km² y un total de 241.774 habitantes según el censo 2017 (BCN, s.f.). Durante el año 2021 el número de vehículos en circulación en la región alcanzó un total de 384.668 en donde 375.735 pertenecen a vehículos motorizados (INE, 2021).

En el año 2018 la región de O'Higgins emitió directamente 3.928 ktCO₂ eq (sin considerar el sector del uso de la tierra, cambio del uso de la tierra y silvicultura), lo cual representa un 3,5% del total de emisiones a nivel nacional. El sector de transporte fue el principal emisor con un valor de 24% del total regional, el cual considera la quema de combustibles para transporte terrestre, ferroviario marítimo y aéreo. (SNI Chile, 2021)

Por este motivo se hace esencial el cambio de la matriz energética en el transporte público para reducir las emisiones atmosféricas, sin embargo, en la actualidad, a pesar de que existen investigaciones sobre la implementación de la electromovilidad en el transporte público, no hay suficientes estudios sobre el uso de hidrógeno verde como combustible debido a que recientemente en el año 2020 se planteó en Chile la idea de utilizar este combustible renovable en el transporte.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar ambiental y económicamente el cambio de matriz energética considerando como alternativa el hidrógeno verde en el transporte público, caso de estudio Línea 102 de Expreso Rancagua.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos de combustible consumido en la línea 102 de Expreso Rancagua.
- Estimar la huella de carbono en base al combustible consumido de línea 102 de Expreso Rancagua.
- Analizar alternativa de hidrógeno verde y requerimiento de energía que se necesita para movilizar el microbús.
- Estimar costos de implementación del combustible de hidrógeno verde en línea 102 de Expreso Rancagua.

4 Metodología

4.1 Recopilación de antecedentes de la línea 102 de Expreso Rancagua

Primeramente, se procedió a recopilar información de la línea 102 de Expreso Rancagua, para poder determinar el requerimiento de combustible fósil actual en el microbús, para esto se acudió a la empresa en donde se consultó por antecedentes de la línea 102 para poder realizar una evaluación ambiental y económica, estos datos son:

- 1) Distancia recorrida (ida y vuelta) del microbús: esta información se puede obtener a través de la página web de la empresa Expreso Rancagua.
- 2) Combustible consumido por vehículo durante el trayecto (ida y vuelta): Dato de importancia que permitirá estimar la huella de carbono de la empresa.
- 3) Cantidad de microbuses que posee el establecimiento: información que permitirá conocer cuántos microbuses de hidrógeno verde habría que cotizar.
- 4) Detalles de los vehículos: año de adquisición, marca, modelo y motor.

La información n°4 permite estimar las emisiones de CH₄ y N₂O lo más cercano a la realidad, sin embargo, si la empresa no posee y/o no puede dar esta información de igual modo se puede realizar la estimación de emisión de estos gases, destacando que habría un mayor margen de error en su valor.

4.2 Estimación huella de carbono

El método escogido es *IPCC 2006 GHG Workbook*, debido a su detallada lista de factores de emisiones, este método permite estimar la huella de carbono de transporte terrestre. Cabe mencionar que para este estudio se estimó la huella de carbono con un enfoque corporativo de alcance 1, debido al uso de combustible fósil ya que solo se considera la operación del transporte, y no las dependencias administrativas de la línea, ya que si estas se tuvieran en cuenta se debería realizar la huella de carbono analizando el alcance 2 debido al uso de energía eléctrica en las oficinas, por ejemplo. Tampoco se considerará el alcance 3 debido a que no se tomarán en cuenta, por ejemplo, el transporte de los funcionarios desde sus hogares hasta las dependencias de la empresa.

Se estimaron las emisiones a partir del combustible consumido lo cual sirve para calcular las emisiones de CO₂, y a partir de la distancia recorrida del vehículo se calculó las emisiones de CH₄ y N₂O.

4.2.1 Emisiones de CO₂

Como se mencionó en el párrafo anterior, estas emisiones se estimaron en base a la cantidad y tipo de combustible consumido y el contenido de carbono en este. En la figura 4.1, se observa el árbol de decisión para la ecuación de emisiones de CO₂.

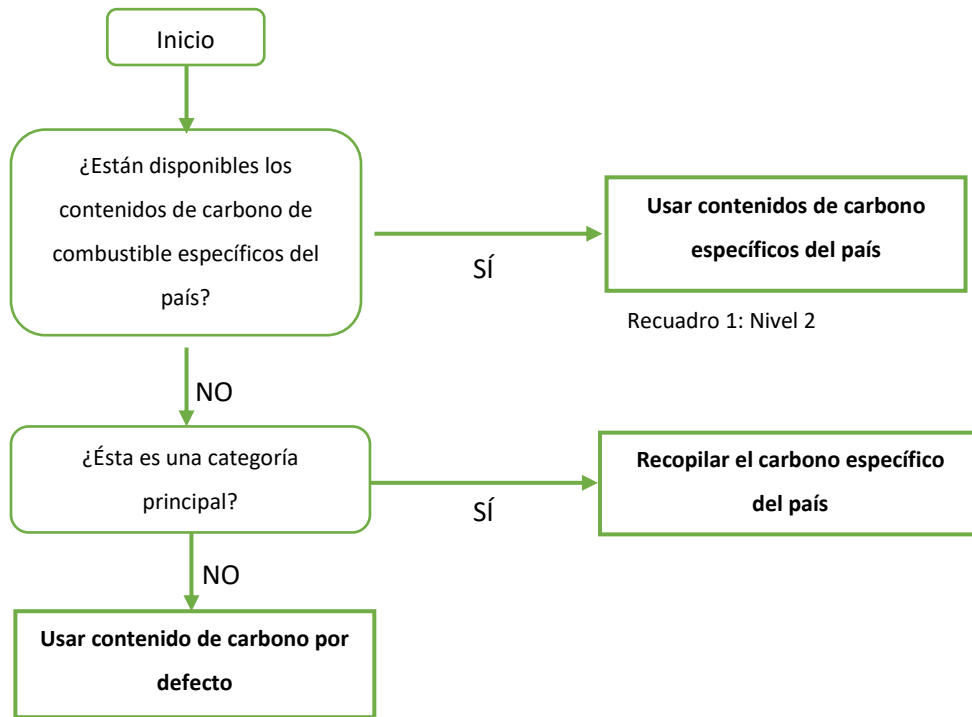


Figura 4.1: Árbol de decisión para emisiones de CO₂
(Fuente: IPCC, 2006).

El método de cálculo que se empleó es el de nivel 2 a través de la multiplicación del combustible estimado que se vende por un factor de emisión de CO₂. La ecuación que se utilizará es la siguiente:

$$Emisión = \sum_a Combustible_a * Factor\ de\ Emisión_a$$

Ecuación 4.1: Fórmula para emisión de CO₂ nivel 2.

Datos:

- Combustible_a: combustible vendido (TJ)
- a: tipo de combustible (gasolina, diésel, gas natural, GLP, etc).

4.2.2 Emisiones de CH₄ y N₂O

Estas emisiones son más difíciles de estimar con exactitud debido a que los factores de emisión dependen de la tecnología del vehículo, del combustible y condiciones de uso. En la figura 4.2, se muestra el árbol de decisión para la ecuación de las emisiones de CH₄ y N₂O.

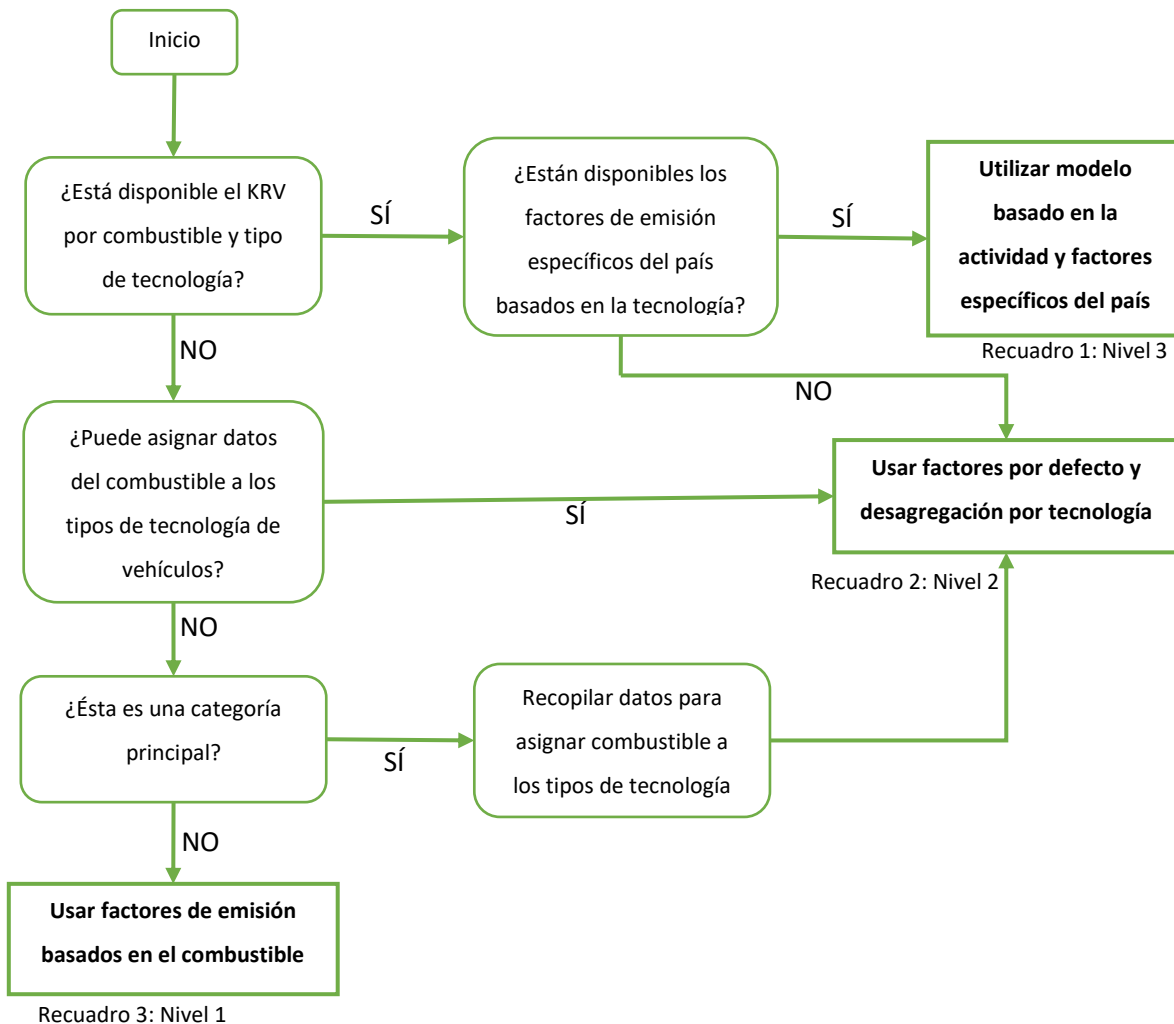


Figura 4.2: Árbol de decisión para emisiones de CH₄ y N₂O
(Fuente: IPCC, 2006).

Como en este caso, no existe en Chile factores de emisión por tecnología, es imposible calcular las emisiones de CH₄ y N₂O en el nivel 3, por ende, tampoco fue necesario calcular las emisiones en frío del vehículo, ya que, estas se aplican solo en la ecuación de nivel 3. Como se mencionó anteriormente, es una categoría principal. Teniendo esto en cuenta, se aplicó según el árbol de decisiones (figura 4.2) la ecuación de nivel 2.

$$Emisión = \sum_{a,b,c} Combustible_{a,b,c} * Factor\ de\ Emisión_{a,b,c}$$

Ecuación 4.2: Fórmula para emisión de CH₄ y N₂O nivel 2.

Donde

- Combustible_{a,b,c}: combustible vendido (TJ)
- a: tipo de combustible
- b: tipo de vehículo
- c: tecnología de control de emisiones (convertor catalítico no controlado, etc)

4.2.3 Elección de los factores de emisión

4.2.3.1 Emisiones de CO₂

Los factores de emisión de este gas se basan en el contenido de carbono del combustible y representan el 100% de oxidación del carbono combustible, para el uso de esta investigación se utilizarán los factores de emisión propuestos por la página Huella Chile, en la tabla 4.1 se detallan los valores.

Tabla 4.1: Factores de emisión de CO₂ del transporte terrestre
(Fuente: Huella Chile, 2019).

| Tipo de fuente | Medio | Contaminante | Combustible | Incertidumbre | Valor del FE | Unidad |
|----------------|-----------|--------------------|-------------|---------------|--------------|---|
| Móvil | Terrestre | Dióxido de carbono | Diésel | Baja | 2.698,5459 | kgCO ₂ eq/ m ³ |

4.2.3.2 Emisiones de CH₄ y N₂O

Las emisiones de estos gases dependen netamente de la combustión y tecnología de control de emisiones en los vehículos, por lo que, los factores de emisiones sin especificar la tecnología son muy inciertos. En la tabla 4.2 se detallan los valores de los factores de emisión obtenidos de la página Huella Chile.

Tabla 4.2: Factores de emisión de CH₄ y N₂O del transporte terrestre
(Fuente: Huella Chile, 2019).

| Tipo de fuente | Medio | Contaminante | Combustible | Incertidumbre | Valor del FE | Unidad |
|----------------|-----------|---------------|-------------|---------------|--------------|-------------------------------------|
| Móvil | Terrestre | Metano | Diésel | Baja | 3,9768 | kgCO ₂ eq/m ³ |
| Móvil | Terrestre | Óxido nitroso | Diésel | Baja | 37,6376 | kgCO ₂ eq/m ³ |

4.3 Analizar alternativa de hidrógeno verde y requerimiento de energía que se necesita para movilizar el microbús

Para analizar por qué el hidrógeno verde es una buena alternativa se procedió a recopilar información de fuentes bibliográficas en donde se comparó las distintas alternativas de electromovilidad, esta comparación se realizó en cuanto a tiempo de carga del vehículo, debido a que es importante que los microbuses carguen rápido para seguir su funcionamiento, y proyección en Chile, ya que es importante conocer si la tecnología podrá tener un buen futuro en el país.

En cuanto al cálculo de requerimiento de energía que necesita el vehículo para su funcionamiento, se aplicaron las siguientes fórmulas descritas por el Ministerio de Energía y Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones del año 2021:

- Trabajo para movilizar el microbús

$$E = F * d$$

Ecuación 4.3: Fórmula para el Trabajo de movilización.

Donde:

- E: energía que se debe realizar en las ruedas

- F: sumatoria fuerza de resistencia a la rodadura, fuerza de tracción en subida y resistencia aerodinámica (Anexo 1).
- d: distancia recorrida por el bus
- Salida de energía que debe suministrar el motor eléctrico

$$E_{ms} = \frac{1}{\eta T} * E$$

Ecuación 4.4: Fórmula para salida de energía en el motor eléctrico.

Donde:

- ηT : eficiencia asociada a la transmisión desde el motor eléctrico hasta las ruedas
- Energía del motor eléctrico

$$E_m = \frac{1}{\eta_{motor}} * E_{ms}$$

Ecuación 4.5: Fórmula energía motor eléctrico.

Donde:

- η_{motor} : eficiencia del motor

La energía requerida por el motor eléctrico puede ser suministrada tanto por la celda de hidrógeno verde como por la batería, por lo que la energía de este sistema considerará las eficiencias de estas. Se determinará través de las siguientes ecuaciones:

$$E_{batería} = \frac{1}{\eta_{batería}} * E_m$$

Ecuación 4.6: Fórmula energía de la batería.

$$E_{celda\ hidrógeno\ verde} = \frac{1}{\eta_{celda\ hidrógeno\ verde}} * E_m$$

Ecuación 4.7: Fórmula energía de la celda de hidrógeno verde.

- Potencia requerida por el sistema:

$$P = \frac{(E + E_{ms} + E_m + E_{batería} + E_{celda\ hidrógeno\ verde})}{\Delta t}$$

Ecuación 4.8: Fórmula potencia requerida por el microbús.

Donde:

- Δt : tiempo del trayecto del vehículo.

Además, cuando el microbús frena, puede haber una recuperación de la energía cinética la cual se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$E_{recuperada} = \eta_{batería} * \eta_{motor} * \eta_{recuperación} * \eta_T * \left(\frac{1}{2} * m * v_1^2 - \frac{1}{2} * m * v_0^2 \right)$$

Ecuación 4.9: Fórmula energía recuperada al frenar.

Donde:

- $\eta_{recuperación}$: eficiencia de la energía recuperada
- v_1 : velocidad final posterior al frenado [km/h]
- v_0 : velocidad inicial en el momento que se aplica el frenado [km/h]

4.4 Estimación costos de implementación

Para la estimación de los costos de implementación se procedió a cotizar el valor de los buses que tienen implementada la celda de hidrógeno verde, es decir, que vienen con el sistema de hidrógeno verde inserto, ya que actualmente no existen estudios para el recambio de piezas de motores de combustible fósil a hidrógeno verde. Además, se revisó fuentes bibliográficas sobre las características técnicas de los microbuses con celda de hidrógeno verde, para poder seleccionar la mejor opción en base a los requerimientos de energía.

Finalmente se calculó el costo del combustible. Según la estrategia de hidrógeno verde por cada 100 km recorridos se consumen 8 kg de hidrógeno verde en los buses, y cada kg de hidrógeno se estima que tendrá un valor de 3,5 USD (Bernal *et al*, 2020), por lo que para conocer el costo aproximado de

combustible primero hay que saber cuánto kg de hidrogeno verde se consume en el recorrido de la línea 102, para esto se utilizó la ecuación 4.10.

$$\text{Consumo } H_2 = \text{Recorrido total} * \frac{8 \text{ kg}}{100 \text{ km}}$$

Ecuación 4.10: Fórmula consumo de H2.

Posterior a esto se utilizó la ecuación 4.11 para conocer el costo aproximado de combustible.

$$\text{Costo combustible} = \text{Consumo } H_2 * \frac{3,5 \text{ USD}}{1 \text{ kg de } H_2V}$$

Ecuación 4.11: Fórmula costo de combustible para el recorrido total de la línea 102.

Donde:

- Litros de combustible: la suma de litros utilizados en el total del recorrido (ida y regreso)
- H₂V: abreviatura de hidrógeno verde

Como el valor del combustible se encuentra en USD, cuando se realizó la estimación se buscó información de conversión de USD a CLP para tener los costos de un recorrido (ida y regreso).

Finalmente, se procedió a calcular el VAC (Valor Actual de Costos) en Excel, a través de la recopilación información de costos de inversión y de combustible (operación) de microbuses diésel, realizando una comparación con el bus a hidrógeno verde en cuanto a estos parámetros, para así escoger la mejor opción en cuanto a costo-beneficio de las distintas alternativas antes mencionadas.

5 Resultados

5.1 Recopilación de antecedentes de la línea 102 de Expreso Rancagua

El día viernes 17 de junio de 2022 se acudió a las dependencias de la empresa Expreso Rancagua, en donde se habló con el Gerente de la empresa para obtener la información necesaria.

El recorrido tiene un total de 126 paradas, en un día normal la línea 102 funciona desde las 7:00 hasta 22:00 hrs, con una frecuencia de 10 minutos de salida, por lo que, en 1 hora salen 6 microbuses a realizar el recorrido. En la actualidad cada microbús realiza un total de 2 recorridos completos, es decir, 2 viajes de ida y 2 viajes de vuelta en promedio. Además, según lo informado el rendimiento de combustible es de 4,2 km/L de diésel, es decir que por cada 4,2 km recorrido se gasta 1 litro de combustible. Se obtuvo los litros que se consumen en el total del recorrido de la ecuación 5.1.

$$\text{Combustible consumido} = \text{distancia del trayecto} * \frac{1 \text{ Litro de combustible}}{4,2 \text{ km}}$$

Ecuación 5.1: Ecuación para obtener combustible consumido en cada trayecto.

- Ida:

$$\text{Combustible consumido} = 20,5 \text{ km} * \frac{1 \text{ Litro de combustible}}{4,2 \text{ km}} = 4,88 \text{ L}$$

- Regreso:

$$\text{Combustible consumido} = 21,5 \text{ km} * \frac{1 \text{ Litro de combustible}}{4,2 \text{ km}} = 5,11 \text{ L}$$

En la tabla 5.1 se presentan los datos duros obtenidos por la empresa, cabe mencionar que el tiempo total del trayecto puede cambiar, sin embargo, en este trabajo se utilizará el tiempo informado en la tabla.

Tabla 5.1: Datos del trayecto ida y regreso del caso de estudio.

| Recorrido | Distancia total | Gasto de combustible | Tiempo total |
|-----------|-----------------|----------------------|--------------|
| Ida | 20,5 [km] | 4,88 L | 70 min |
| Regreso | 21,5 [km] | 5,11 L | 80 min |

En la figura 5.1 se distingue el camino recorrido de ida y regreso del microbús diferenciando por los colores azul y rojo respectivamente. La empresa tiene destinado 30 microbuses en promedio para realizar el recorrido de la línea 102, sin embargo, esto puede fluctuar debido a que algunos microbuses pueden cambiar de línea.

Además, la empresa a la fecha mencionada anteriormente no proporcionó información sobre los detalles de los vehículos, como, por ejemplo, año de adquisición, marca, modelo y motor, debido a que se están realizando cambios en los vehículos, sin embargo, como se mencionó en el capítulo 4.1 del presente trabajo, no es totalmente necesaria esta información para la estimación de la huella de carbono en los gases de CH₄ y N₂O, por lo que, no poseer esta información no interfiere con la continuación del trabajo.

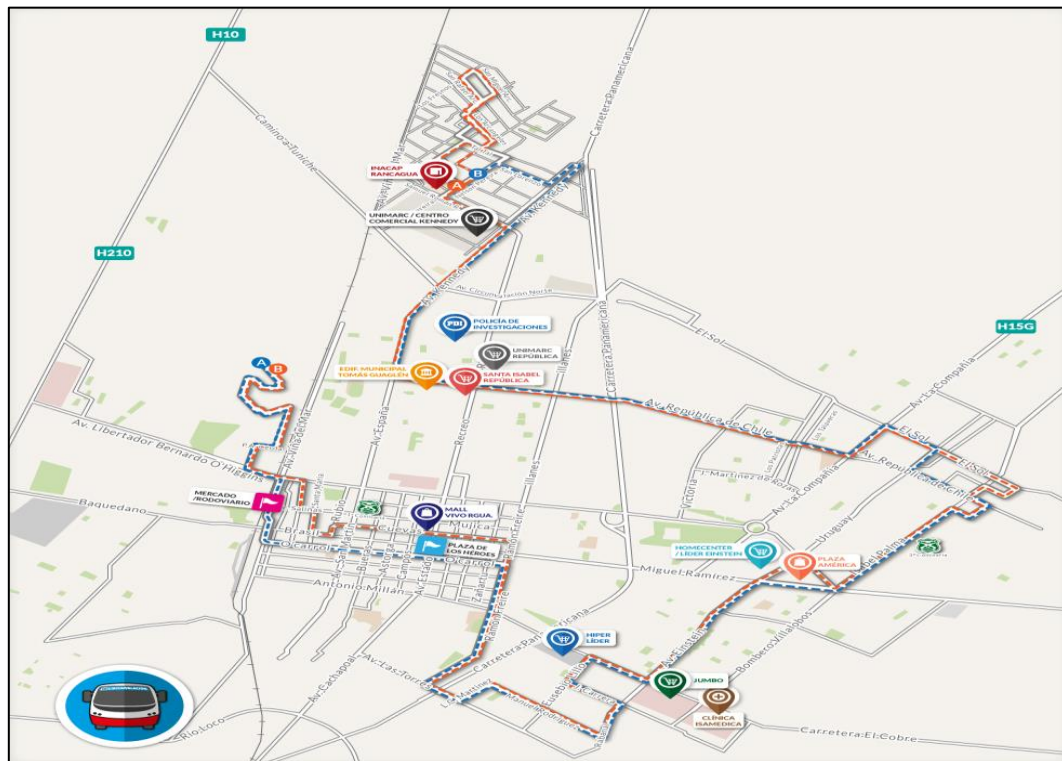


Figura 5.1: Recorrido ida (línea azul) y regreso (línea roja) de la línea 102.
(Fuente: Expreso Rancagua, s.f.)

5.2 Estimación huella de carbono

Para la estimación de la huella de carbono, esta se realizó para un año calendario, por lo que se estimó el gasto de combustible diésel anual, esto se hizo con los datos proporcionados por la empresa los cuales se mencionan anteriormente, en donde en 1 hora salen 6 microbuses a realizar el recorrido, y cada microbús realiza un total de 2 recorridos al día (2 viajes de ida y 2 viajes de vuelta) en un horario de 7:00 a 22:00. Se va a suponer que los 365 días del año se realiza el recorrido con esta frecuencia, dado que los casos especiales donde la frecuencia baja, son insignificantes para el resultado total.

Suposiciones para realizar una aproximación al gasto anual de combustible:

- Se tomarán 14 horas de funcionamiento, es decir, de 7:00 a 21:00 debido a que el microbús demora 80 minutos en volver al terminar en el recorrido de regreso.
- Como un microbús realiza un total de 2 recorridos completos quiere decir que sale 2 veces por día por lo que para calcular cuantos microbuses trabajan al día se hizo un cálculo por 7 horas (la mitad de las horas totales), posteriormente se multiplicó este valor por la cantidad de litros de combustibles gastados en los 2 recorridos, la siguiente manera:

$$\text{Microbuses por día} = \frac{6 \text{ microbuses}}{1 \text{ hora}} * \frac{7 \text{ horas trabajadas}}{1 \text{ día}} = 42 \text{ microbuses/día}$$

Por la información mencionada anteriormente 1 recorrido equivale a 10 litros de combustible utilizado, por lo que, al realizar 2 recorridos, se asumen 20 litros de combustible.

$$\text{Combustible diario} = \frac{42 \text{ microbuses}}{\text{día}} * \frac{20 \text{ litros}}{1 \text{ microbus}} = 840 \text{ litros/día}$$

Por último, para conocer un valor estimado del combustible consumido anualmente, se multiplica el valor obtenido por 1 año calendario.

$$\text{Combustible anual} = \frac{840 \text{ litros}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 306.600 \text{ litros/año}$$

Finalmente se aplicó la ecuación 4.1 y el factor de emisión de la tabla 4.1 para estimar la huella de carbono del contaminante dióxido de carbono (CO₂).

$$\begin{aligned} \text{Emisión CO}_2 &= 306.600 \text{ litros} * \text{kg CO}_2 \text{ eq} \frac{2.698,5459 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} \\ &= 827.374,2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \end{aligned}$$

Mientras que para conocer la emisión respecto al metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) se utilizó la ecuación 4.2 y el factor de emisión de la tabla 4.2 respectivo a cada contaminante.

$$\begin{aligned} \text{Emisión CH}_4 &= 306.600 \text{ litros} * \frac{3,9768 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} \\ &= 1.219,3 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisión N}_2\text{O} &= 306.600 \text{ litros} * \frac{37,6376 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} \\ &= 11.539,7 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \end{aligned}$$

En la tabla 5.2 se resume las emisiones CO₂, CH₄ y N₂O anuales del caso de estudio.

Tabla 5.2: Tabla resumen de resultados de emisiones en un año calendario de la línea 102.

| Unidad [kg CO ₂ eq/año] | | | |
|------------------------------------|-----------------|------------------|-----------|
| CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Total |
| 827.374,2 | 1.219,3 | 11.539,7 | 840.133,2 |

5.3 Analizar alternativa de hidrógeno verde y requerimiento de energía que se necesita para movilizar el microbús

5.3.1 Buses eléctricos

Los autobuses eléctricos se mueven gracias a baterías que transforman energía química en energía eléctrica, la energía para recargar estas baterías que es eléctrica proviene de distintas fuentes como, termoeléctricas, hidroeléctricas, plantas solares, etc. En Chile se estima que un vehículo eléctrico emitirá cerca de un tercio de las emisiones de CO₂ de un vehículo convencional (MinEnergía, MTT y MMA, 2017). En la actualidad existen diversos tipos de vehículos eléctricos, estos son: (ONU, 2019)

- Híbridos enchufables: en este tipo de autobuses se combina un motor de combustión interna con un motor eléctrico, sin embargo, se considera dentro de la categoría “vehículos eléctricos” aquellos cuya principal fuente de energía proviene de baterías que se recargan de una alimentación externa.
- Eléctricos de baterías: Poseen un motor eléctrico alimentado por un paquete de baterías recargables, los vehículos eléctricos se diferencian entre si principalmente por el tamaño del paquete de baterías, química de las baterías, estrategia de recarga (lenta o rápida), la arquitectura y componentes de su tren motriz.
- Trolebuses: Los trolebuses modernos son vehículos eléctricos de baterías, lo que distingue al mencionado anteriormente son los “cables” con los que se conecta a la red de energía de forma continua, sin embargo, ya que poseen batería, esta les permite recorrer cierta distancia sin estar conectado a la red.

Las características de las baterías dependen de la estrategia de recarga que posea el vehículo (lenta o rápida), si la batería del vehículo es grande significa que posee una mayor capacidad de almacenamiento y por ende se recarga menos veces en el día (mayormente de noche), sin embargo, si la batería es pequeña significa que tiene poca capacidad de almacenamiento y se recarga más veces a lo largo del día. En la tabla 5.3 se observará una comparación entre ambos sistemas de recarga según tipo de batería.

Tabla 5.3: Comparación características de autobuses con sistema de carga lenta o rápida.
(Fuente: ONU, 2019)

| Autobuses con sistema de baterías de carga lenta | Autobuses con sistemas de batería de carga rápida |
|--|--|
| Mas energía disponible: 200 - 300 kWh | Menor energía disponible: 50 - 150 kWh |
| Permiten recorrer distancias más largas entre recargas | Recorren distancias más cortas entre recargas |
| Los vehículos requieren mayor número de celdas, esto equivale a más peso y por tanto mayor consumo | Menos volumen de baterías (número de celdas), implicando un menor peso, por tanto, menor consumo |
| Recarga total de la batería entre 4 - 5 horas | Recarga total de la batería 20 - 30 minutos |

5.3.2 Buses con hidrógeno verde

Estos buses son impulsados por hidrógeno verde el cual puede ser una fuente de energía prácticamente con cero emisiones de CO₂ desde la producción hasta la operación, debido a que el hidrógeno verde se genera utilizando fuentes de energía renovables (eólica y solar mayormente). Tienen un alcance de 700 - 800 km, por lo que esto los hace adecuados para vehículos que recorren grandes distancias. (ALJ, 2021)

El tiempo de recargar de las baterías con celdas de hidrógeno verde tiene una duración de 8-9 minutos, para una autonomía de 400 km, mientras que para distancias más largas (750 km) tiene una duración de 10 -11 minutos (MinEnergía, 2020), debido que posee una densidad energética alta, es decir que por cada kilogramo de H₂ ofrece mayor potencia eléctrica, necesita 100 - 200 kW para recorrer grandes distancias.

5.3.3 Proyección en Chile de ambos tipos de buses

En Chile desde el año 2017 se ha establecido diversos objetivos en cuanto a la electromovilidad en el país, en la actualidad por cada 15 vehículos a combustión existe 1 vehículo eléctrico (PortalMovilidad, 2022).

Los objetivos se realizarán con el apoyo de distintas iniciativas: (MinEnergía, 2017)

- Estándares de eficiencia para vehículos nuevos, implementado en la Ley sobre Eficiencia Energética.
- Programas de fomento en flotas de alto recorrido.

- Reconversión de vehículos a combustión por eléctricos, cuya reglamentación se publicará en noviembre para consulta pública.
- Nuevo proyecto de Ley de Transición Energética que prontamente ingresaremos al congreso. El proyecto de ley se referirá a cuatro temas: Hidrógeno verde, impulso a las Energías Renovables, impulso a la generación distribuida, y a Electromovilidad. Algunos de los temas que incorporará en electromovilidad son:
 - Rebaja transitoria en el permiso de circulación de vehículos eléctricos (VE) para favorecer la compra de vehículos eléctricos.
 - Modificación a la ley de generación distribuida para habilitar el *vehicle-to-grid* que permite a los vehículos eléctricos inyectar energía y que ésta les sea valorizada.

Con estas iniciativas se estima que, para el año 2035:

- El 100% de las ventas de vehículos livianos y medianos serán cero emisiones.
- El 100% de las ventas de transporte público (buses, taxis y colectivos) serán cero emisiones.
- El 100% de las ventas de maquinaria móvil mayor que incluye camiones de extracción y maquinaria pesada minera, serán cero emisiones.

Para el año 2040:

- El 100% de las ventas de maquinaria móvil menor, que incluye maquinaria de construcción, agrícola y forestal serán cero emisiones

Y para el año 2045:

- El 100% de las ventas de transporte de carga y buses interurbanos serán cero emisiones.

En relación con automóviles con celdas de hidrógeno verde, a nivel global, la cantidad de vehículos eléctricos a hidrógeno existentes son considerablemente menores respecto de los eléctricos a baterías o híbridos enchufables (Plataforma Electromovilidad, s.f.), esto debido a que es una tecnología relativamente nueva y, por lo tanto, aún tiene costos altos en su producción.

Se estima que para el segundo semestre del año 2023 se pondrá en marcha el primer bus a hidrógeno verde, destacando que se trata de un “piloto”, por lo que al traer el bus de hidrógeno

verde lo estudiarán y a partir de esos resultados verán como continuar con el proyecto (Muñoz, 2022). Por este motivo, aun no hay proyecciones verídicas sobre el hidrogeno verde en autobuses, sin embargo, ya que Chile posee una gran potencia en la generación de hidrógeno verde, se tiene previsto que entre los años 2023 – 2028 se añada esta fuente de energía en el sector del transporte terrestre (MinEnergía, 2020).

5.3.4 Cálculo requerimiento de energía

Para el cálculo se realizó un análisis de potencia y de energía considerando el uso de un bus eléctrico a batería en el caso de estudio. El bus utilizado para el análisis corresponde al bus marca BYD modelo K7 (figura 5.2), se realizó el análisis con este modelo debido a que está disponible en el país para su utilización, y además es de la misma marca que se utilizan en la actualidad en Santiago.

Las características de este bus se presentan en la tabla 5.4. Se realizó el análisis en bus eléctrico primeramente para entender como seria la operación de estos tipos de buses en el recorrido del caso de estudio, y como segundo motivo, para establecer un punto comparativo con los buses de hidrógenos que existen actualmente.

Para los cálculos de requerimiento de potencia, se utilizó Google Earth para obtener la pendiente máxima de cada trayecto (tabla 5.5), en el anexo 1 se muestran los perfiles de elevación con más detalle.

Tabla 5.4: Características principales bus eléctrico BYD K7.
(Fuente: BYD, s.f.)

| Características principales | |
|-----------------------------|-------------|
| Capacidad máxima | 45 personas |
| Motor eléctrico | 90 kW |
| Energía baterías | 180 kWh |
| Peso bruto vehicular | 13.400 kg |
| Capacidad de pendiente | 17% |

Tabla 5.5: Pendiente máxima del trayecto línea 102.

| Recorrido | Pendiente Máxima |
|-----------|------------------|
| Ida | 5% |
| Regreso | 5% |



Figura 5.2: Bus eléctrico marca BYD K7.
(Fuente: BYD, s.f.)

Para obtener la Energía total se debió calcular la fuerza que necesita el bus para movilizarse, la cual se calculó a través de las siguientes fórmulas:

- Fuerza de resistencia a la rodadura

$$F_F = m * g * f * \cos(\alpha)$$

Ecuación 5.2: Ecuación fuerza a la resistencia a la rodadura.

En donde:

- m: masa del bus eléctrico (kg)
- g: constante gravitacional (m/s^2)

- f: coeficiente de resistencia a la rodadura
- α : pendiente del camino

- Fuerza de tracción en subida

$$F_i = m * g * \text{sen}(\alpha)$$

Ecuación 5.3: Ecuación fuerza de tracción en subida.

- Fuerza a la resistencia aerodinámica

$$F_w = \frac{C_D * A * v^2 * \rho}{2}$$

Ecuación 5.4: Ecuación fuerza a la resistencia aerodinámica.

En donde:

- C_D : coeficiente de resistencia aerodinámica
- A: área frontal del bus (m^2)
- v: velocidad del vehículo (km/h)
- ρ : Densidad del aire [kg/m^3]

Los resultados se muestran de forma sintetizada en la tabla 5.6, el cálculo de cada fuerza esta detallado en el anexo 2.

Tabla 5.6: Resultados cálculos de fuerza.

| Fuerza | Resultado |
|-------------------------------|------------|
| Resistencia a la rodadura | 1.575,8 N |
| Tracción en subida | 114,6 N |
| Resistencia a la aerodinámica | 78,32 N |
| Total | 1.768,72 N |

Una vez calculada la fuerza, se aplicó la ecuación 4.3, obteniendo:

$$E = 1.768,72 \text{ N} * 42.000 \text{ m} = 74.286.240 \text{ J} = 74.286,24 \text{ kJ}$$

Para el cálculo con eficiencias de las distintas partes del bus eléctrico, se recopiló información referencial de la empresa BYD acerca de sus autobuses para una estimación teórica.

- Salida de energía que debe suministrar el motor eléctrico (ecuación 4.4):

$$E_{ms} = \frac{1}{0,95} * 74.286,24 \text{ kJ}$$
$$= 78.196,04 \text{ kJ}$$

- Energía del motor eléctrico (ecuación 4.5):

$$E_m = \frac{1}{0,95} * 78.196,04 \text{ kJ}$$
$$= 82.311,62 \text{ kJ}$$

- Energía batería (ecuación 4.6):

$$E_{batería} = \frac{1}{0,92} * 82.311,62 \text{ kJ}$$
$$= 89.469,15 \text{ kJ}$$

- Energía Celda de hidrógeno verde (ecuación 4.7):

$$E_{fuel\ cell} = \frac{1}{0,90} * 89.469,15 \text{ kJ}$$
$$= 99.410,16 \text{ kJ}$$

- Finalmente, la potencia requerida por el sistema (ecuación 4.8):

$$P = \frac{(74.286,24 + 78.196,04 + 82.311,62 + 89.469,15 + 99.410,26) \text{ kJ}}{9000 \text{ s}}$$

$$= 47,08 \text{ kW}$$

Este resultado demostró que se necesita mínimo 47,08 kW para recorrer 44 km, la potencia de los buses se realiza en base a 100 km, por lo que se procedió a realizar una proporción para estimar cuanta potencia es necesaria en 100 km y se comparó con la potencia ofrecida por el bus K7.

$$P_{100 \text{ km}} = 100 \text{ km} * \frac{47,08 \text{ kW}}{44 \text{ km}}$$

$$= 107 \text{ kW}$$

Además, con el resultado de la ecuación 4.8, se procedió a calcular cuantos kiloWatts hora se necesitan en 1 km, suponiendo el tiempo total del recorrido y los kilómetros totales de este:

$$P_{hora} = 47,08 \text{ kW} * 2,5 \text{ h}$$

$$= 117,7 \text{ kWh}$$

Luego, se pudo calcular el consumo del bus de la siguiente manera:

$$Consumo = \frac{117,7 \text{ kWh}}{44 \text{ km}}$$

$$= 2,675 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Según los cálculos realizados el microbús consume una cantidad de 2,675 [kWh/km].

Sin embargo, puede recuperarse cierta energía a través del freno de regeneración para un menor gasto, se recalca que no todos los buses poseen este sistema.

- Energía recuperada al frenar (ecuación 4.9):

$$E_{recuperada} = 0,92 * 0,95 * 0,85 * 0,95 * \left(\frac{1}{2} * 13.400 \text{ kg} * (0)^2 - \frac{1}{2} * 13.400 \text{ kg} * (30)^2 \right)$$

$$= -4.255,70 \text{ kJ}$$

En el anexo 3 se muestra una tabla con distintos buses eléctricos en donde se detalla el consumo energético (kWh/km) de cada uno, en el cual se encuentra el bus BYD K7 (tabla 5.7) que se utilizó para obtener de forma teórica la potencia energética que requiere la línea 102 de Rancagua.

Tabla 5.7: Resumen consumo bus BYD K7.
(Fuente: PortalMovilidad, 2022).

| Resultados Consumo / Eficiencia Energética Bus con motor eléctrico | | | | | | | | | | |
|--|--------|-----------|-----------------|----------------------|--------|---------------|-----------------|------------------|----------------|-------------------------------|
| Clase | Marca | Capacidad | Neumáticos | Peso de pruebas (kg) | Modelo | Potencia (kW) | Capacidad (kWh) | Consumo (kWh/km) | Autonomía (km) | Eficiencia energética (MJ/km) |
| A1 | BYD K7 | 45 | 285/70R 19,5 | 10.802,5 | TY90A | 180 | 156,6 | 1,13 | 138,6 | 4,07 |

A través de esto, se puede suponer que el bus BYD K7 puede satisfacer las necesidades de consumo para transitar en la ciudad de Rancagua realizando el recorrido actual de la línea 102 de Expreso Rancagua.

5.4 Estimación costos de implementación



Para realizar una estimación de costos se identificó distintos buses con la celda de hidrógeno verde incorporada (tabla 5.8), sin embargo, algunos aún son prototipos por lo que no tienen un precio fijo

en la actualidad. La capacidad de asientos de estos buses tiene la media de 60 pasajeros, aun no se realizan formatos de microbuses (30 - 40 pasajeros), que son los que se utilizan en Rancagua.

Tabla 5.8: Buses de hidrógeno verde y sus características principales.
(Fuente: MinEnergía,2021).

| Marca | Modelo | Potencia Celda Hidrógeno verde | Tanque de almacenamiento de H ₂ | Batería | Imagen referencial |
|------------|---------------------------|--------------------------------|--|----------|---|
| New Flyer | Xcelsior CHARGE H2 (12 m) | 85 kW | 37,5 kg | 100 kWh |  |
| New Flyer | Xcelsior CHARGE H2 (18 m) | 85 kW | 60 kg | 120 kWh |  |
| CaetanoBus | H2 City Gold (10 m) | 60 kW | 37,5 kg | 29 kWh |  |
| CaetanoBus | H2 City Gold (12 m) | 60 kW | 37,5 kg | 44 kWh |  |
| Safra | Businova H2 (10 m) | 30 kW | 30 kg | 132 kWh |  |
| ENC | Axedd Fuel Cell (12 m) | 150 kW | 50 kg | 11,2 kWh |  |

Continuación Tabla 5.8: Buses de hidrógeno verde y sus características principales.
(Fuente: MinEnergía, 2021).

| Marca | Modelo | Potencia Celda Hidrógeno verde | Tanque de almacenamiento de H ₂ | Batería | Imagen referencial |
|----------|----------------|--------------------------------|--|---------|---|
| Solaris | Urbino | 70 kW | 37,5 kg | 30 kWh |  |
| Van Hool | A330 Fuel Cell | 85 kW | 38 kg | 24 kWh |  |

La media del costo de inversión asociados a los buses con celda de hidrógeno verde en la actualidad es de 1.300.000 dólares por unidad (NREL, 2021), el cual es elevado en comparación a los buses diésel o eléctricos de baterías existentes. Para calcular un aproximado al precio de una unidad de bus hidrógeno de 30 pasajeros, se realizó proporción del precio mencionado anteriormente de bus de hidrógeno verde (A) con respecto al precio de un bus diésel de 70 pasajeros (B) y otro de 30 pasajeros (C) (tabla 5.9) para encontrar el supuesto precio de un microbús de hidrógeno verde con capacidad de 30 pasajeros, el proceso detallado se puede observar en el anexo 4.

Tabla 5.9: Valor aproximados de buses diésel e hidrógeno verde.

| Nomenclatura | Tipo de Bus | Marca | Capacidad promedio de pasajeros | Precio (UF) |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------|
| A | Bus hidrógeno verde | Van Hool A330 | 70 | 34.000 |
| B | Bus diésel | Volvo B7 Caio | 70 | 4.970 |
| C | Microbús diésel | Mercedes Benz Fuso Rosa | 30 | 1.715 |
| - | Microbús de hidrogeno verde | - | 30 | 11.733 |

Según la nomenclatura utilizará en la tabla 5.9 se presentan imágenes referenciales (figuras 5.3, 5.4 y 5.5) de los buses considerados para la estimación del costo de un microbús de hidrógeno verde.

Para los costos aproximados de combustible de hidrógeno verde se utilizará la ecuación 4.10 en donde se calculó el consumo de H₂ por recorrido.

$$\text{Consumo } H_2 = 44 \text{ km} * \frac{8 \text{ kg}}{100 \text{ km}} = 3,52 \text{ kg/recorrido}$$

A continuación, cabe recalcar las suposiciones realizadas en el capítulo 5.2 para obtener los litros de combustibles consumidos en un año en la empresa, por lo que se empleó las mismas suposiciones para obtener el hidrógeno verde consumido en un año si estuviera en operación, y se aplicó la ecuación 4.11 para obtener el costo de combustible anual de hidrógeno verde.

$$\text{Costo combustible} = \frac{107.923,2 \text{ kg de } H_2V}{1 \text{ año}} * \frac{3,5 \text{ USD}}{1 \text{ kg de } H_2V} = 377.731 \text{ USD/año}$$

En la conversión actual a pesos chileno significa que se gastaría 325.981.853 CLP en combustible de hidrógeno verde anuales, mientras que en combustible diésel se gastarían 367.920.000 CLP (considerando que en la actualidad el diésel tiene un valor de 1.200 CLP por litro).

En la tabla 5.10 se muestra el VAC realizado, se consideró la vida útil acelerada de cada vehículo debido a que se asume que funcionarán mucho más que un automóvil privado, además de una tasa de interés de 0% ya que, para la estimación de costos de del presente estudio no se tiene previsto un crédito para la inversión. Para el costo de operación de cada microbús, se calculó lo que gasta un solo microbús en combustible al año, según los datos mencionados anteriormente. Los valores de costo variable, valor actual y valor actual más inversión, se realizaron a través de Excel.

Tabla 5.10: VAC hipotético del caso de estudio.

| Variables | Hidrógeno verde | Diésel |
|--|-----------------|-----------|
| Costo del equipo (UF) | 11.733 | 1.715 |
| Costos operación de cada microbús (UF) | 225 | 254 |
| Unidades | 42 | 42 |
| Vida útil | 3 | 5 |
| Inversión (UF) | -11.733 | -1.715 |
| Costo variable | 9.453,36 | 10.669,68 |
| Valor actual (UF) | 28.360,08 | 53.348,40 |
| VAC (valor actual + inversión) | 16.627,08 | 51.633,40 |

Además, se pudo realizar una estimación sobre el rendimiento del hidrógeno verde y recorridos de autonomía del microbús, a través de las siguientes ecuaciones.

- Rendimiento: el rendimiento se basa en cuanto kg de hidrógeno verde se consumirían en 100 km, se toma como indicador 100 km para medir el rendimiento debido a que diversos estudios desarrollados principalmente en Europa miden el rendimiento del bus de hidrógeno en 100 km (MMA et al., 2021). El rendimiento para este estudio se puede calcular de la siguiente manera:

$$Rendimiento_{100\text{ km}} = \frac{\text{Consumo } H_2, \text{ kg}}{\text{Recorrido}} * \frac{1 \text{ recorrido}}{44 \text{ km}} * \frac{100 \text{ km}}{100 \text{ km}}$$

Ecuación 5.5: Rendimiento por 100 km.

$$Rendimiento_{100\text{ km}} = \frac{2 * 1 * 100}{1 * 44} * \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}} = 4,55 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$$

- Autonomía: Para saber la autonomía se utilizó información sobre el bus con menor capacidad de almacenamiento de hidrógeno expuesto en la tabla 5.8.

$$Autonomía = \frac{\text{Capacidad de almacenamiento (kg)}}{\text{Consumo de } H_2}$$

Ecuación 5.6: Autonomía del autobús.

$$\text{Autonomía} = 30 \text{ kg} * \frac{1 \text{ recorrido}}{3,52 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ vuelta}}{2 \text{ recorridos}}$$

$$= \frac{30 * 1 * 1 \text{ vuelta}}{3,52 * 2} = 4,26 \approx 4 \text{ vueltas}$$

Tabla 5.11: Resumen resultados consumo de hidrógeno.

| Línea caso de estudio | Consumo H ₂ total en el recorrido de la línea 102 | Rendimiento | Vueltas de autonomía |
|-----------------------|---|----------------------------------|----------------------|
| 102 | 3,52 kg | 4,55 kg- H ₂ / 100 km | 4 |



Figura 5.3: (A) Bus hidrógeno verde 70 pasajeros.
(Fuente: SustainableBus, 2020)



Figura 5.4: (B) Bus diésel 70 pasajeros. (Fuente: SUBUS Chile S.A, s.f.)



Figura 5.5: (C) Microbus diésel 30 pasajeros. (Fuente: Kaufmann, s.f.).

6 Discusión

Al realizar el levantamiento de información y recopilación de datos desde el gerente de Expreso Rancagua como también de fuentes bibliográficas fue útil ya que, permitió realizar un estudio teórico sobre la electromovilidad con combustible de hidrógeno verde en el transporte público. La metodología propuesta fue la que se empleó para obtener las estimaciones planteadas en los objetivos.

Sin embargo, al comparar con investigaciones anteriores y su metodología, quedo en manifiesto la necesidad de una investigación en terreno más a fondo para disminuir los errores en los diferentes cálculos realizados, como, por ejemplo, la fuerza que necesita el microbús para su movilización, ya que se necesitan determinados estudios que requieren la presencia del modelo de bus utilizado para obtener un resultado más cercano a la realidad y con un porcentaje de error menor.

Uno de los énfasis de investigaciones anteriores es que el bus de hidrógeno verde sea capaz de satisfacer la necesidad energética, lo cual, en este trabajo se demuestra que, según la velocidad requerida por normativa, los buses de hidrógeno verde propuesto serian útiles para realizar el recorrido de la 102. En el caso del transporte en Rancagua es más factible que diversos buses de hidrógeno verde cumplan con las necesidades energéticas debido a la baja pendiente que existe en la ciudad, en específico, en el recorrido escogido para el caso de estudio.

Otro factor que pudo haber influido en algún error sobre los datos, es que la información obtenida por parte de la empresa Rancagua no consideran atrasos en los viajes en el trayecto (como por congestión vehicular) lo cual puede influir en un mayor consumo de combustible, afectando así a la estimación de la huella de carbono del recorrido, además de que puede significar más tiempo en realizar la totalidad del recorrido afectando las estimaciones de fuerza y energía requerida para movilizar el bus, además, no fue posible obtener información sobre la tecnología que se utiliza (modelo de vehículos, motor, chasis, etc), por lo que las emisiones de N_2O y CH_4 deben realizarse con un estudio más profundo al momento en que se pueda tener acceso a esta información.

En consideración que la tecnología de hidrogeno verde como combustible aun es nueva en el mercado, el valor obtenido a través de fuentes bibliográficas puede variar dependiendo de donde se consulte, por lo que cabe la posibilidad que el uso de este tenga un costo mayor que utilizar combustible fósil si se compara en la actualidad.

El rendimiento de los buses de hidrógeno en este recorrido se encuentra dentro de lo que se reporta a partir de distintos proyectos piloto en el mundo (principalmente desarrollados en Europa), en donde la media de rendimiento es 8-9 kg de hidrogeno verde por 100 km, cuya variación puede ir desde los 6 kg hasta 15 kg de hidrogeno verde por 100 km.

A través del presente estudio, las estimaciones teóricas cumplen con la finalidad de demostrar que es factible utilizar en un futuro hidrógeno verde como combustible, también la recopilación de fuentes bibliografías permitió observar una buena proyección de esta nueva tecnología en el país. En Chile se tiene planeado instalar fábricas de producción de hidrógeno verde, por lo que el precio de inversión y costos de operación en microbuses urbanos podrían ser sustancialmente menores a los valores que se manejan en la actualidad, favoreciendo aún más a este tipo de energía para su uso en el transporte público.

Finalmente, como pasos a tomar, se hace visible la necesidad de más estudios con proyecciones reales sobre el hidrógeno verde como combustible en el transporte terrestre, además de incentivar aún más el uso y producción de esta fuente energética, ya que aún existen diversas opiniones negativas sobre este debido a la falta de información. En tecnologías innovadoras antiguas se ha demostrado que en un inicio eran muy caras y con el tiempo ha disminuido su precio de inversión y producción siendo ahora unas de las tecnologías energéticas más usadas y recomendadas, como por ejemplo la solar y la eólica. No obstante, en el presente existen dudas válidas debido al almacenamiento del hidrogeno verde en los vehículos, ya que hay un peligro inminente si llegase a ocurrir un choque debido a lo explosivo que puede resultar, por lo que surge la inquietud de buscar alternativas para almacenar este combustible de una manera más segura, como, por ejemplo, en baterías, sin embargo, en la actualidad aún no se han iniciado estudios sobre prevenir este tipo de peligro.

7 Conclusión

Producto de la recopilación de información realizada, se identificaron los requerimientos de combustible actuales de la línea en cada recorrido (ida y regreso), la cual se encuentra dentro del promedio de gasto general, es decir, no tienen un consumo alto de combustible.

La estimación de huella de carbono arroja resultados altos considerando que se trata del cálculo de una línea del transporte público, Rancagua al ser una ciudad capital regional, es relativamente grande, por lo que, se puede considerar que el transporte público afecta de manera considerable a la contaminación atmosférica de la ciudad. Si bien, faltaron datos sobre la tecnología de los vehículos utilizados en la empresa que sirven para obtener un cálculo con menos margen de error en los contaminantes metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), los resultados de la estimación realizada en este estudio permiten tener un primer acercamiento a la huella de carbono de la empresa, con la cual ya se obtiene un conocimiento inicial teórico sobre la emisión que tiene los microbuses de la línea 102.

A través de los cálculos se pudo obtener un valor de potencia energética requerida dentro del rango de diversos perfiles de autobuses de hidrógeno verde que se encuentran en el mercado para que la línea 102 pueda realizar su recorrido sin problemas, de tal manera se demuestra que sí es factible utilizar buses eléctrico y/o buses con celda de hidrógeno verde de Rancagua debido a que la ciudad tiene una pendiente máxima muy pequeña, lo que genera facilidades a la hora del funcionamiento de este tipo de buses.

Aunque el valor monetario teórico al utilizar hidrogeno verde como combustible es menor que el valor al utilizar combustible fósil en la actualidad, el gran problema de esta tecnología yace en los elevados costos de inversión, debido a que es una tecnología aun nueva, el precio por unidad de bus con celda de hidrógeno verde es demasiado alto lo que impide que empresas como Expreso Rancagua puedan optar por ahora a esta tecnología, además de que aún no se implementan fábricas de producción y/o puntos de recargas de este tipo de combustible para la funcionalidad de estos buses, lo que significaría un costo adicional debido al traslado. Sin embargo, al calcular el VAC hipotético para este estudio se pudo comprobar que el costo-beneficio del microbús de hidrógeno

verde es bueno en comparación a un microbús diésel, en lo que más hay diferencia entre estos tipos de buses es el costo del combustible, por esto se puede concluir que, a largo plazo, vale la pena invertir en un microbús de hidrógeno verde debido al ahorro que significaría en combustible para la empresa.

Finalmente se cumplió medianamente el objetivo general del estudio sobre realizar una evaluación económica y ambiental del hidrógeno verde en el transporte público de Rancagua, esto debido a que todo se hizo teóricamente, tendría más representatividad si se hubiera podido obtener más información sobre la línea 102, y se hubiera tenido acceso a modelos de buses para realizar experimentos in situ, sin embargo, sirve como antecedente para realizar en un futuro más estudios sobre esta nueva tecnología. Además se recomienda los microbuses de hidrógeno verde para disminuir la contaminación y que la empresa pueda tener una huella de carbono cero, ya que, si bien su precio es mayor a un bus diésel, el precio del combustible por año es menor que un bus tradicional, lo que genera una proyección favorable al hidrógeno verde, cabe mencionar que siendo una tecnología relativamente nueva es entendible los altos costos de inversión que tiene en el presente, sin embargo en base a lo que ha ocurrido con otras tecnologías renovables, no hay dudas de que en un futuro se verán disminuidos estos costos siendo accesible para diversas empresas. Por estos motivos se hace necesario dar continuación a estudios de este tipo de nuevas tecnologías que sirven para disminuir la contaminación atmosférica proveniente del transporte terrestre.

8 Bibliografía

- ALJ. Próxima parada: transporte público impulsado por hidrógeno [en línea] 2021. <<https://alj.com/es/perspective/proxima-parada-transporte-publico-impulsado-por-hidrogeno/>> [Consulta: 22 de octubre 2022]
- Aparicio, F., Vera, C., & Díaz, V. (1995). Teoría de los vehículos automóviles. Madrid: Sección de Publicaciones de la escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.
- BBVA. ¿Puede un coche con una pila de hidrógeno cambiar el futuro de la movilidad sostenible? [en línea]. <<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/puede-un-coche-con-una-pila-de-hidrogeno-cambiar-el-futuro-de-la-movilidad-sostenible/>> [Consulta: 5 de noviembre 2022]
- BCN: Indicadores 2021 de la Región de O'Higgins [en línea] Chile, 2021. <https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=6101> [Consulta: 17 julio 2022]
- Bernal, N., Torres,R., y Vivanco,E. Desarrollo del mercado de Hidrógeno Verde en Chile. [en línea] Chile, 2020. 12p. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29024/1/BCN_Desarrollo_del_mercado_de_H2_verde_en_Chile.pdf> [Consulta: 18 julio 2022]
- Briñon, Maria. Metodología para la implementación de buses eléctricos duales con baterías litio-ferrofosfato en la ruta circular sur 302 de Medellín Colombia. Proyecto para optar a Maestría de Ingeniería. Medellín, Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana, 2018. 82p
- Build Your Dreams BYD. Manual bus modelo K7 [en línea]. <https://en.byd.com/wp-content/uploads/2019/07/4504-byd-transit-cut-sheets_k7-30-lr.pdf> [Consulta: 4 de noviembre 2022]

Centro UC Cambio Global: Gases de Efecto Invernadero (GEI) [en línea] Chile.
<<https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/gas-de-efecto-invernadero-gei>> [Consulta: 15 julio 2022]

Climate Consulting: Efecto invernadero, causas y consecuencias en el clima [en línea] España.
<<https://climate.selectra.com/es/que-es/efecto-invernadero#:~:text=Es%20importante%20entender%20que%20el,como%20la%20Tierra%20o%20Venus>> [Consulta: 6 junio 2022]

Dirección General de Aeronáutica Civil. Servicios Climáticos [en línea]. Chile.
<<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/340045>>
[Consulta: 30 de octubre 2022]

Ecología Verde: Cómo se forma el carbón [en línea] España.
<<https://www.ecologiaverde.com/como-se-forma-el-carbon-2747.html>> [Consulta: 7 junio 2022]

Ecología Verde: Cómo se forma el petróleo [en línea] España.
<<https://www.ecologiaverde.com/como-se-forma-el-petroleo-2814.html>> [Consulta: 7 junio 2022]

ENAP Educa: ¿Cómo se formó? [en línea]. Chile.
<https://www.enap.cl/pag/281/1159/como_se_formo> [Consulta: 15 julio 2022]

Enex: Electromovilidad [en línea] Chile, 2020. <<https://www.enex.cl/electromovilidad/>> [Consulta: 7 junio 2022]

EPA español: Descripción general de los gases de efecto invernadero [en línea] EEUU. <<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>> [Consulta: 6 junio 2022]

INE: Permisos de circulación [en línea] Chile, 2021.
<<https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>> [Consulta: 17 julio 2022]

IPCC. Cambio Climático Informe de Síntesis, 2014. 176p.

IPCC: Metodología para cálculo huella de carbono en combustión móvil, 2006. 78p.

Mainstream Renewable power: ¿Qué es ERNC? [en línea] Chile.
<<https://mainstreamrp.cl/tecnologia/que-es-ernc/#:~:text=ERNC%20es%20la%20sigla%20equivalente,agota%20en%20una%20escala%20humana>> [Consulta: 26 abril 2022]

Minam: Efectos de la contaminación del aire [en línea] Perú.
<<https://infoaireperu.minam.gob.pe/efectos-de-la-contaminacion-del-aire/#:~:text=En%20particular%2C%20la%20contaminaci%C3%B3n%20del,mental%20del%20ni%C3%B1o%2C%20entre%20otros>> [Consulta: 25 abril 2022]

Ministerio de Educación. Materia y Entorno: La materia orgánica y los combustibles fósiles. Chile, 2012. 57p.

Ministerio de Energía. Energía 2050, Política Energética en Chile [en línea] Chile, 2017. 158p.
<https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/611/48_Energia%202050_Politica_Energetica_Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consulta: 17 julio 2022]

Ministerio de Energía, Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. Estrategia Nacional de Electromovilidad. 2020, 56p.

Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Chile, 2020. 33p.

Ministerio de Energía. Tecnologías del Hidrógeno y perspectivas para Chile. Chile, 2019. 135p.

Ministerio de Energía. Uso de Hidrógeno verde en el transporte terrestre [en línea] Chile, 2020. <<https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/16.Hidr%C3%B3geno.pdf>> [Consulta: 17 julio 2022]

Ministerio de Energía: Plataforma Electromovilidad [en línea] Chile. <<https://energia.gob.cl/electromovilidad/hidrogeno-verde>> [consulta: 20 abril 2022]

Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Energía y Unidad de tecnologías del Hidrógeno UC. Evaluación técnico-económica a implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano. Chile, 2021. 43p.

Ministerio del Medio Ambiente. Huella Chile “Factores de emisión” [en línea] 2019. <https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/06/Base-de-Datos_Factores_Emision_HuellaChile_2019.xlsx> [Consulta: 12 de diciembre 2022]

Ministerio del Medio Ambiente: Huella de carbono [en línea] Chile. <<https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>> [Consulta: 2 mayo 2022]

Ministerio del Medio Ambiente: Preguntas frecuentes sobre contaminación atmosférica [en línea] Chile. <<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario#:~:text=Contaminaci%C3%B3n%20Atmosf%C3%A9rica,vida%20silvestre%20y%20la%20propiedad>> [Consulta: 25 abril 2022]

Miteco. Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización. España, 2019. 52p.

Mobilitas. Para el gobierno chileno el costo de invertir en un autobús eléctrico coincidirá con el de los autobuses diésel [en línea] 2019. <<https://mobilitas.lat/es/2019/12/29/para-el-gobierno-chileno-el-coste-de-invertir-en-un-autobus-electrico-coincidira-con-el-de-los-autobuses-diesel-ya-en-2022/>> [Consulta: 7 de noviembre 2022]

Monroy, Cristián., Siachoque, Cristián., Durán-Tovar, Iván y Marulanda, Agustín. Estudio comparativo de un Sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en vehículos eléctricos de batería. 25(3): 305-322, 2020.

NREL. Fuel Cell Buses in US transit fletes: Current Status [en línea] 2020. <<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/75583.pdf>> [Consulta: 3 de noviembre 2022]

Organización de Naciones Unidas (ONU). Protocolo de Kyoto. 1998. 25p.

Organización de Naciones Unidas: El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible [en línea]. <<https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>> [Consulta: 17 julio 2022]

Organización Mundial de la Salud: Cambio climático y salud [en línea] 2021. <<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20ya%20est%C3%A1,las%20zoonosis%20y%20las%20enfermedades>> [Consulta: 8 junio 2022]

PortalMovilidad: ¿Cuánto cuesta cargar un vehículo eléctrico en Chile? [en línea] Chile, 2021. <<https://portalmovilidad.com/la-respuesta-esperada-cuanto-cuesta-cargar-un-vehiculo-electrico-en-chile/>> [Consulta: 7 junio 2022]

PortalMovilidad: Beneficios de la Electromovilidad [en línea] Chile. <<https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion/beneficios-de-la-electromovilidad#arribatitulo>> [Consulta 15 julio 2022]

Servicio Geológico Mexicano (SGM): Origen y Formación [en línea] México, 2017. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Origen-y-formacion.html> [Consulta: 16 julio 2022]

SINCA: Glosario de términos [en línea]. <<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario#:~:text=Contaminaci%C3%B>

[3n%20Atmosf%C3%A9rica,vida%20silvestre%20y%20la%20propiedad](#)> [Consulta: 26 abril 2022]

SNI. Inventarios Regionales de Gases de Efecto Invernadero, serie 1990-2018. Chile, 2021. 54p.

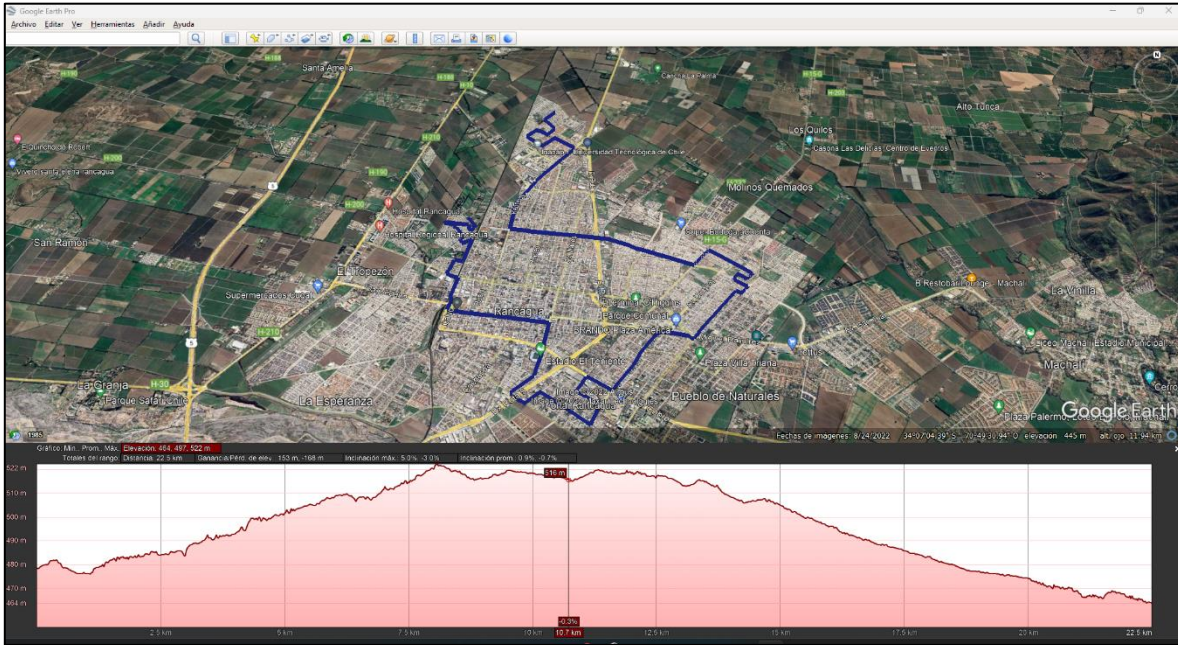
Subsecretaría de Minería y Subsecretaría de Economía. Perfil de Mercado del Carbón [en línea] México, 2017.
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287796/Perfil_Carbon_2017.pdf>
[Consulta: 16 julio 2022]

Vivanco, E. Energías renovables y no renovables. Chile, 2020. 9p.

9 Anexos

Anexo 1: Perfil de elevación

- Trayecto de Ida: Pendiente máxima 5%



- Trayecto de Regreso: Pendiente máxima 5%



Anexo 2: Cálculos de las fuerzas

Para las distintas estimaciones se utilizaron los siguientes supuestos para los trayectos (ida y regreso):

1. Distancia: 42 [km] (sumando ida y regreso)
2. Velocidad promedio: 30 [km/h]
3. Tiempo promedio: 80 [min]

- Fuerza de resistencia a la rodadura:

Se utilizaron valores por defecto para el coeficiente de rodadura, según el tipo de vehículo y tipo de camino, se utilizó tipo de vehículo “camión” ya que según el manual del bus BYD K7 los neumáticos son de este tipo de vehículo, además de que es el que mejor encaja.

| Tipo de vehículo | Superficie | | |
|------------------|--------------------|--------------|-------|
| | Hormigón o Asfalto | Dureza media | Arena |
| Turismos | 0,015 | 0,08 | 0,3 |
| Camiones | 0,012 | 0,06 | 0,25 |
| Tractores | 0,02 | 0,04 | 0,2 |

Una vez escogido el coeficiente de rodadura se aplicó la fórmula para obtener la fuerza para ida y regreso.

$$F_F = 13.400 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,012 * \cos(0,05) = 1.575,8 \text{ N}$$

- Fuerza de tracción en subida:

$$F_i = 13.400 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \text{sen}(0,05) = 114,6 \text{ N}$$

- Fuerza a la resistencia aerodinámica:

Se calculó el área frontal del microbús con la fórmula de área de un rectángulo debido a su semejanza.

$$A_f = b * h$$

$$A_f = 2,43 \text{ m} * 3,36 \text{ m} = 8,17 \text{ m}^2$$

Para la densidad del aire se utilizó la fórmula de gases ideales de la siguiente manera:

$$PV = MRT$$

En donde:

- P = Presión atmosférica [kPa]
- V = volumen [m³]
- T = temperatura en grados kelvin [K]
- R = constante del gas ideal [kJ/kg*K]
- M = masa del gas [kg]

Al anular la densidad que es igual a la masa sobre volumen, la ecuación que se obtiene es:

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

La temperatura promedio de Rancagua es de 26°C y la presión promedio 1018 mbar (Dirección Meteorológica de Chile, s.f.)

$$\rho = \frac{101,8 \text{ kPa}}{0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 299,15 \text{ K}} = 1,186 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Obtener el coeficiente de resistencia aerodinámica se requiere de estudios prácticos con el modelo del autobús, por lo que, en este estudio se utilizó un coeficiente dado por la misma empresa BYD para la estimación de la fuerza aerodinámica.

Finalmente, se aplicó la ecuación para la fuerza:

$$F_w = \frac{1,186 \frac{kg}{m^3} * 0,233 * 8,17 m^2 * (8,33 \frac{m}{s})^2}{2}$$
$$F_w = 78,32 N$$

- Suma total de todas las fuerzas:

$$\sum F = 1.575,8 N + 114,6 N + 78,32 N = 1.768,72 N$$

**Anexo 3: Resultados Consumo/Eficiencia Energética Buses Transporte
Público Urbano Ciudad de Santiago Motor Eléctrico**

| VEHICULO | | | | | MOTOR | | | BATERIA | RESULTADOS |
|----------|-----------------------------|---------------------------|-------------|----------------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|-------------------------------|
| Clase | Marca | Capacidad Total Pasajeros | Neumáticos | Peso de Pruebas (kg) | Potencia [kW] | Capacidad [kWh] | Consumo (kWh/km) | Autonomía (km) | Eficiencia energética (MJ/km) |
| B2 | Yutong ZK6128BEVG | 87 | 295/80R22,5 | 16250 | 215 | 324,4 | 1,48 | 219,7 | 5,33 |
| B2 | BYD K9 FE | 81 | 295/80R22,5 | 15495,5 | 300 | 276,5 | 1,57 | 176,1 | |
| B2 | Foton eBus U12 QC | 90 | 275/70R22,5 | 14790 | 350 | 151,55 | 1,67 | 90,9 | 6,01 |
| A1 | BYD K7 | 45 | 285/70R19,5 | 10802,5 | 180 | 156,6 | 1,13 | 138,6 | 4,07 |
| A1 | Foton eBus U8,5 QC | 47 | 265/70R19,5 | 10592,5 | 130 | 129 | 1,24 | 104,0 | 4,46 |
| B2 | Zhongtong LCK6122EVG | 88 | 295/80R22,5 | 16330 | 350 | 351,237 | 1,58 | 222,3 | 5,69 |
| B2 | King Long XMQ 6127G PLUS | 90 | 295/80R22,5 | 17345 | 280 | 374,65 | 1,74 | 215,0 | 6,26 |
| A1 | King Long XMQ 6900G | 45 | 255/70R22,5 | 11187,5 | 200 | 210,56 | 1,13 | 186,0 | 4,07 |
| C2 | Zhongtong LCK6180EVG | 141 | 295/80R22,5 | 25632,5 | 300 | 525,11 | 2,67 | 196,0 | 9,61 |
| A2 | Zhongtong LCK6106EVG | 74 | 275/80R22,5 | 14515 | 200 | 315,07 | 1,46 | 216,0 | 5,26 |
| B2 | Foton eBus U12 SC | 90 | 295/80R22,5 | 16325 | 350 | 385,08 | 1,63 | 237,0 | 5,87 |
| A1 | Zhongtong LCK6850EVG | 62 | 265/70R19,5 | 11550 | 200 | 200,54 | 1,2 | 167,0 | 4,32 |
| B2 | Higer E 130.30 (KLQ6122GEV) | 95 | 305/70R22,5 | 16752,5 | 350 | 345,6 | 1,9 | 181,0 | 6,84 |

Anexo 4: Estimación costo microbús hidrógeno verde

Se utilizó precios aproximados (UF) según lo recopilado en fuentes bibliográficas.

$$\begin{aligned} \text{Precio microbus } H_2V &= \frac{\text{Precio de bus } H_2V * \text{Precio microbus diésel}}{\text{Precio bus diésel}} \\ &= \frac{34.000 \text{ UF} * 1.715 \text{ UF}}{4.970 \text{ UF}} \\ &= 11.732 \text{ UF} \end{aligned}$$