

Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano

27 de diciembre 2021



Este documento fue elaborado por Patricio Lillo y Francisco Belmar de la Unidad de Tecnologías del Hidrógeno de la Pontificia Universidad Católica de Chile para el Ministerio de Energía y el de Transportes y Telecomunicaciones, en el marco del diseño de un proyecto piloto sobre buses a hidrógeno en el Sistema de Transporte Público de Santiago.

Se agradece la colaboración de María José Lambert y Fernanda Stegmaier del Ministerio de Energía, y de Eduardo Castro y Ana Leiva del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

Tabla de contenidos

1. Introducción	5
2. Antecedentes generales	7
3. Metodología	12
4. Caso de aplicación	15
5. Resultados	17
5.1 Análisis consumo de energía bus eléctrico de batería	17
5.2 Levantamiento oferta comercial buses de hidrógeno	19
5.3 Simulación de bus de hidrógeno en recorridos del Sistema	21
5.4 Análisis de sensibilidad	25
5.5 Resultados de implementación de bus de hidrógeno en el mundo	28
5.6 Infraestructura	33
5.7 Capacidades y competencias	34
6. Conclusiones	37
7. Bibliografía	39
Anexo	43

Figuras

Figura 1: Comparación TCO buses (Basado en Deloitte, 2020)	7
Figura 2: Bus de hidrógeno Wriighthbus en Londres	8
Figura 3: Configuración vehículo fuel cell simplificada (Basado de Deloitte, 2020)	9
Figura 4: Curva eficiencia fuel cell (Basado en Dominguez, R., Solano, J. & Jacome, A., 2018)	10
Figura 5: Esquema clásico bus fuel cell (Van Hool, 2018)	11
Figura 6: Control de potencia del sistema dual	13
Figura 7: Recorridos a estudiar	15
Figura 8: Perfil de elevación recorrido 506	15
Figura 9: Perfil de elevación recorrido 424	16
Figura 10: Perfil de elevación recorrido 104	16
Figura 11: Consumo energía recorrido 506	17
Figura 12: Consumo energía recorrido 424	18
Figura 13: Consumo energía recorrido 104	18
Figura 14: Análisis de potencia recorridos 506, 424 y 104 (Fuente: Elaboración propia)	20

Figura 15: Consumo energético bus H2 recorrido 506.....	21
Figura 16: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 506	22
Figura 17: Consumo energético bus H2 recorrido 424.....	23
Figura 18: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 424	23
Figura 19: Consumo energético bus H2 recorrido 104.....	24
Figura 20: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 104	24
Figura 21: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 32 toneladas	25
Figura 22: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 28 toneladas	26
Figura 23: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 36 toneladas	26
Figura 24: Análisis de sensibilidad de la variable peso en el consumo de hidrógeno....	27
Figura 25: Análisis de sensibilidad tamaño fuel cell	28
Figura 26: Horas de operación proyecto buses de hidrógeno en USA (Basado en NREL, 2021a)	29
Figura 27: Disponibilidad buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)	30
Figura 28: Razones de indisponibilidad buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)	30
Figura 29: Precios observados buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)	31
Figura 30: Costo de mantención buses de hidrógeno según tipo (Basado en NREL, 2021a)	31
Figura 31: Costo de mantención buses de hidrógeno según partes (Basado en NREL, 2021a)	32
Figura 32: Costos de mantención en el tiempo de buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)	32
Figura 33: Estación de recarga de hidrógeno (DOE, 2017)	33
Figura 34: Estación de recarga móvil (Air Products)	34

Tablas

Tabla 1: Recorridos a estudiar	15
Tabla 2: Características principales bus eléctrico BYD K9FE	17
Tabla 3: Buses de hidrógeno y sus características principales	19
Tabla 4: Resumen resultados consumo hidrógeno por recorrido.....	24
Tabla 5: Parámetros análisis de sensibilidad	25

Glosario

BEV: Battery Electric Vehicle

FC: Fuel Cell Vehicle

ICE: Internal Combustion Engine

TCO: Total Cost of Ownership

SoC: State of Charge

1. Introducción

El hidrógeno es el elemento más simple de la tabla periódica y uno de los más abundante en el planeta, sin embargo, no se puede encontrar en su estado puro de forma natural, por lo que se requiere que sea producido o purificado a partir de otras materias. El hidrógeno en condiciones normales de temperatura y presión es un gas inflamable, incoloro, inodoro, no tóxico e insoluble en agua.

Una de las principales ventajas del hidrógeno es que al ser utilizado para generar electricidad o calor, no genera emisiones de CO_2 , ya que su único subproducto es el vapor de agua, por lo que se considera una alternativa limpia para los distintos usos en donde se pueda utilizar. Sin embargo, en la búsqueda de vectores energéticos que sean ambientalmente amigables no tan solo se debe analizar su comportamiento en el uso final, sino que se debe analizar la cadena de valor completa, incluyendo el proceso por el cual fue producido, ya que, por definición los vectores energéticos requieren de más energía para ser producidos que la cantidad de energía que pueden entregar, por lo que se busca que la forma de producción de estos no genere emisiones adicionales al medioambiente.

Si bien la propiedad más importante del hidrógeno es que al ser utilizado no genera emisiones, también posee la ventaja de tener una alta densidad energética por unidad de masa comparado con otros vectores energéticos. El hidrógeno posee una densidad energética por unidad de masa de 120 MJ/kg, mientras que el diésel tiene un poder calorífico de 43 MJ/kg, lo que es tres veces menos al comparar con el hidrógeno. Por otra parte, las baterías de ion-litio poseen una densidad energética por unidad de masa de aproximadamente 0,6 MJ/kg, es decir que, para transportar la misma cantidad de energía en una batería y contenida en hidrógeno, la batería pesará 200 veces más que el hidrógeno.

Sin embargo, al ser uno de los elementos más pequeños en la tabla periódica tiene una baja densidad energética por unidad de volumen, lo que significa que requiere de un espacio mayor para entregar la misma cantidad de energía que otros combustibles. Por ejemplo, el hidrógeno comprimido a 700 bar de presión posee una densidad energética volumétrica de 5,6 MJ/L, lejos de los niveles de la gasolina con 32,0 MJ/L. Por otra parte,

las baterías de ion litio tienen una densidad energética de entre 0,9 a 2,4 MJ/L (Clean Energy Institute of the University of Washington, s.f.).

El uso de hidrógeno en movilidad, y en particular en buses, se hace interesante debido al gran potencial con el que cuenta este nuevo combustible para este segmento, lo cual se explica principalmente por las condiciones de operación, entre las que se encuentra el elevado consumo energético, requerimientos de autonomía, entre otros. Al comparar buses de hidrógeno con el caso de buses diésel, se favorece la reducción de las emisiones de CO₂ las cuales contabilizaron entre enero y octubre del año 2018 más de 450.000 toneladas en el Sistema de Transporte Público Metropolitano RED (La Tercera, 2019). En el caso de los buses de batería y de los buses de hidrógeno, el segundo cuenta con una gran ventaja en términos de disponibilidad, ya que el tiempo de carga de los buses de hidrógeno es considerablemente menor que su homólogo en baterías, ya que, por ejemplo, los buses eléctricos de batería implementados en la ciudad de Santiago pueden tardar entre 3 a 4 horas en realizar una carga completa, dependiendo el estado de carga de la batería (CMM Chile, 2020).

Chile durante el año 2021 realizó el lanzamiento de la Estrategia Nacional de Electromovilidad en donde se espera que para el año 2035 el 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público (buses, taxis y colectivos) sean cero emisiones. Adicionalmente para el 2045 se declara que el 100% de las ventas de buses interurbanos serán cero emisiones.

El objetivo del presente estudio es demostrar la factibilidad técnica de implementar un bus urbano de hidrógeno en el Sistema de Transporte Público Metropolitano RED. Para esto, se analizará la implementación de un bus de hidrógeno en tres recorridos distintos para los cuales se realizará un levantamiento de información asociado a los buses disponibles comercialmente en la actualidad y se estudiará si las características técnicas -tal como la potencia, autonomía del bus, entre otras- cumplen con los requerimientos de la ruta, además de calcular la cantidad de hidrógeno que se consumirá en el recorrido. Adicionalmente, se realizará un levantamiento asociado a los costos principales en los que se debe incurrir al implementar este tipo de tecnología.

En este estudio se analiza exclusivamente la introducción de un bus de hidrógeno en el Sistema de Transporte Público Metropolitano RED, por lo que no se analiza el efecto que esto podría tener en una potencial flota. En el estudio tampoco se analiza la producción misma del hidrógeno.

2. Antecedentes generales

El uso de hidrógeno verde en buses no tan solo es interesante debido a la posibilidad de generar la descarbonización del sector de transporte. En términos económicos, tal como se puede observar en la figura 1, se espera que el *break even*¹ de los buses de hidrógeno con los buses de combustión interna se alcance el año 2026, mientras que respecto a los buses de batería se espera que esto suceda el año 2027 (Deloitte, 2020), siendo uno de los primeros sectores en alcanzar el punto de inflexión entre los distintos tipos de tecnologías.

Adicionalmente, a nivel nacional, el Ministerio de Energía (2019) reconoce que el uso de hidrógeno en buses sea de las aplicaciones en que el hidrógeno sea competitivo de forma temprana respecto a otros usos, por lo que se proyecta que podría estar dentro de la primera oleada de desarrollo a nivel nacional, y podría ser el tercer mercado nacional más relevante del hidrógeno, encontrándose únicamente detrás del uso de hidrógeno en camiones mineros y camiones de transporte de ruta.

Finalmente, el uso de hidrógeno en buses contiene una importante componente social. En general, los usos del hidrógeno están mayormente orientados a sectores industriales, en este sentido, la aplicación de hidrógeno en el transporte público favorece a la generación de interacción entre la sociedad y esta nueva tecnología, con el fin tanto de promover el uso de energías limpias como también para favorecer el conocimiento de las personas con el hidrógeno.

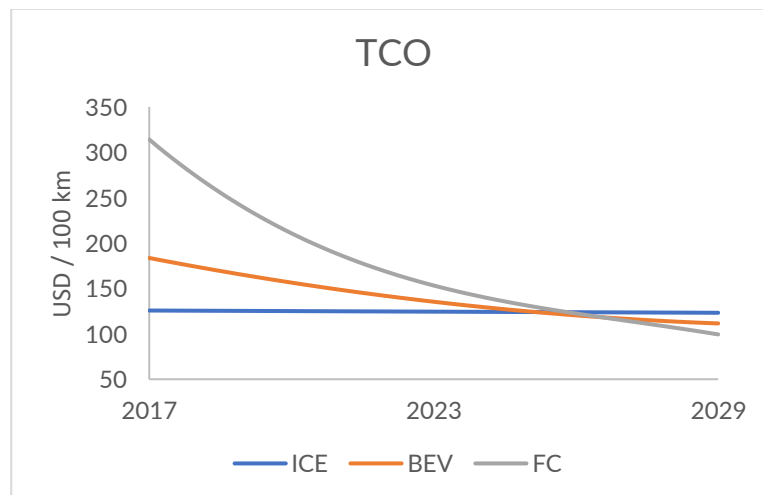


Figura 1: Comparación TCO buses (Basado en Deloitte, 2020)

El despliegue del hidrógeno en buses se ha desarrollado en múltiples países mediante distintos proyectos piloto. Este es el caso de países como Escocia, en donde en la ciudad de Aberdeen se cuenta con la operación de 10 buses de hidrógeno desde el año 2014.

¹ Break even, en este caso, se denomina al punto de equilibrio en donde una tecnología se hace económicamente competitiva respecto a otra

En Aalborg, Dinamarca, desde el año 2020 se cuenta con la operación de 3 buses de hidrógeno. Un caso similar ocurre en Londres en donde desde el 2010 se tienen 8 buses de hidrógeno en funcionamiento.

Los casos previamente mencionados son tan solo un ejemplo de lo que está ocurriendo en el mundo. Únicamente en la Unión Europea los buses a hidrógeno acumulan a la fecha más de 11.000.000 km recorridos, lo cual no considera los kilómetros recorridos por los proyectos llevados a cabo en países como China, Japón, Estados Unidos y Canadá. En general, la gran mayoría de los pilotos están siendo llevados a través de alianzas público-privadas, entre las que destacan los proyectos HyTransit, 3 Emotion, JIVE, entre otros.



Figura 2: Bus de hidrógeno Wrightbus en Londres

Los buses de hidrógeno -también denominados buses fuel cell²- poseen una configuración similar a la que utilizan los buses eléctricos a batería, es por esta razón que en inglés se les denomina *Fuel Cell Electric Vehicle*, en donde la principal diferencia entre los buses eléctricos a batería y los buses de hidrógeno, es que estos últimos son propulsados por una celda de combustible o fuel cell, la cual utiliza hidrógeno para generar corriente eléctrica y así energizar el vehículo. En la figura a continuación se puede observar una configuración simplificada clásica de un vehículo que cuenta con un sistema fuel cell.

² Una fuel cell, también conocida como pila de combustible en español, es el equipo que es capaz de transformar la energía química contenida en el hidrógeno en electricidad

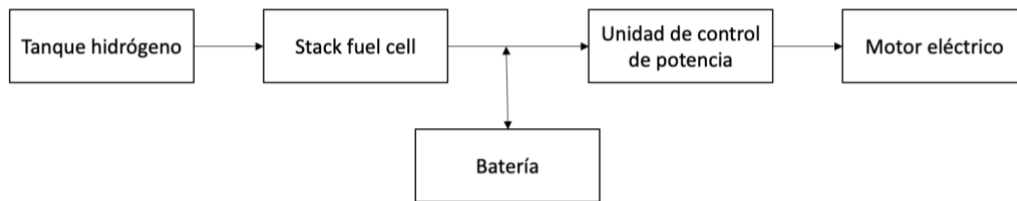


Figura 3: Configuración vehículo fuel cell simplificada (Basado de Deloitte, 2020)³

En el caso de los buses de hidrógeno estos cuentan con una batería, la cual, generalmente, es de menor tamaño que las que se pueden observar en los buses eléctricos de batería, ya que funcionan como un sistema complementario de entrega de energía y/o potencia al sistema principal, el cual es la fuel cell. En particular, la presencia de esta batería en los buses de hidrógeno se explica principalmente por tres motivos.

El primer motivo es porque las baterías poseen un menor tiempo de respuesta ante variaciones importantes de requerimiento de potencia. Una elevada tasa de respuesta ante cambios de requerimientos de respuesta no es característica propia de los sistema fuel cell, por lo que ante cambios importantes la batería complementa al sistema fuel cell.

Por otra parte, la batería se utiliza para los *peak* de potencia a los que se ve sometido el vehículo, ya que, en general, la fuel cell posee una potencia menor que la potencia del motor eléctrico. Por ejemplo, el bus modelo XCelsior CHARGE H2 de la empresa New Flyer cuenta con un motor eléctrico cuya potencia alcanza los 160 kW, mientras que la fuel cell es de tan solo 85 kW. Esto se debe principalmente a la curva de eficiencia a la cual se encuentran sometidas las fuel cell, en donde si la potencia de operación es baja respecto a la potencia máxima de la fuel cell la eficiencia se ve drásticamente afectada, por lo cual se desea operar en el rango de eficiencia más alto posible. La eficiencia de la fuel cell se puede observar en la siguiente figura.

³ El stack fuel cell es el corazón de un sistema de energía de pila de combustible. Genera electricidad en forma de corriente continua (CC) a partir de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en la pila de combustible. Una sola pila de combustible produce menos de 1 V, lo que es insuficiente para la mayoría de las aplicaciones. Por ello, las pilas de combustible individuales suelen combinarse en serie en una pila de pilas de combustible. Una pila de combustible típica puede estar formada por cientos de pilas de combustible. La cantidad de energía producida por una pila de combustible depende de varios factores, como el tipo de pila de combustible, el tamaño de la pila, la temperatura a la que funciona y la presión de los gases suministrados a la pila. (Department of Energy, USA)

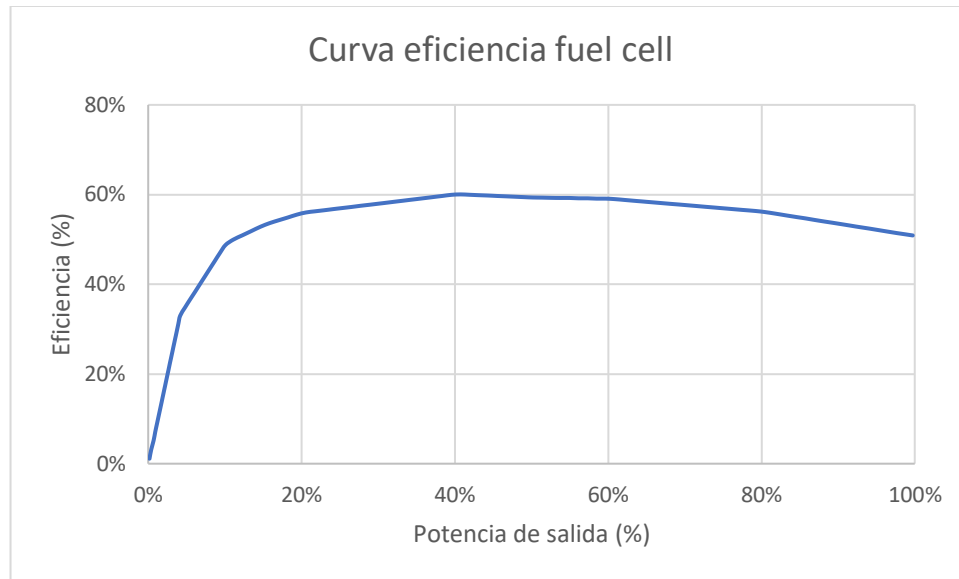


Figura 4: Curva eficiencia fuel cell (Basado en Dominguez, R., Solano, J. & Jacome, A., 2018)

Las baterías, en estos sistemas, poseen una baja cantidad de energía almacenada, ya que se espera que su actuar sea únicamente de forma auxiliar al sistema de hidrógeno. Uno de estos casos corresponde al bus Caetano, el cual cuenta con un motor eléctrico cuya potencia alcanza los 180 kW y la fuel cell 60 kW. Además, la batería posee 29 kWh de energía, mientras que el tanque de hidrógeno es de 37,5 kg, cuyo equivalente en energía sería cercano a 1.250 kWh, por lo que en términos de energía almacenada el tanque de hidrógeno es 43 mayor que el sistema de baterías.

Finalmente, el tercer motivo por el cual se implementa una batería en estos sistemas es que permite recuperar parte de la energía cinética utilizada al frenar el vehículo, mejorando así la eficiencia del consumo energético desde un punto de vista global. La siguiente figura muestra una configuración típica de los distintos componentes requeridos en un bus de hidrógeno.

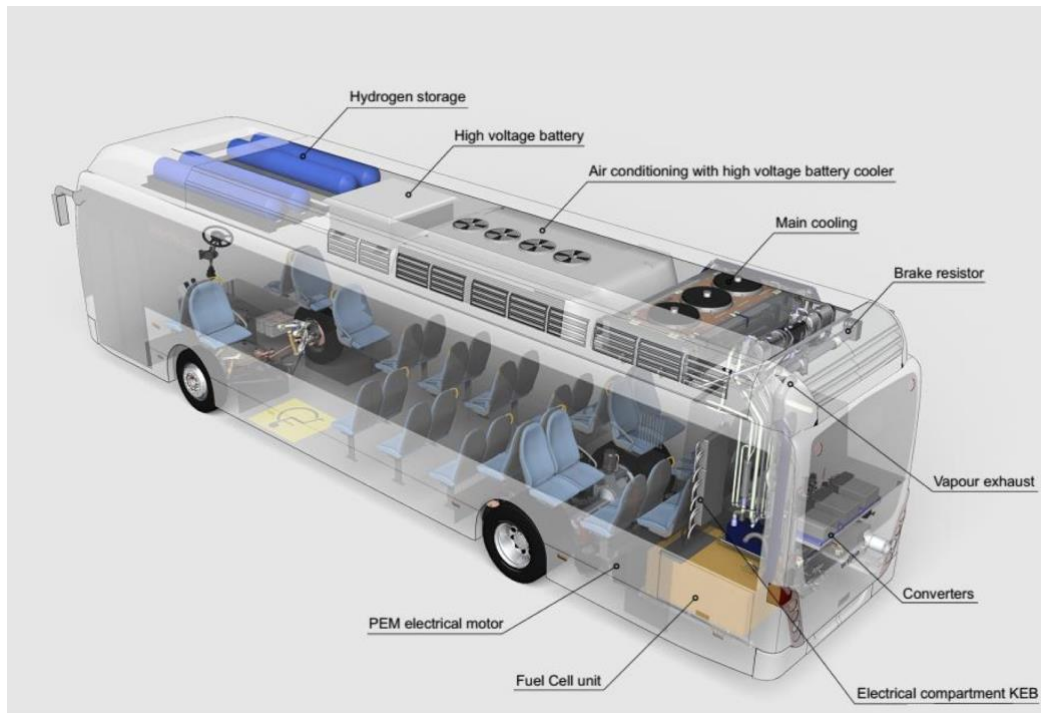


Figura 5: Esquema clásico bus fuel cell (Van Hool, 2018)

Una de las ventajas del uso de buses de hidrógeno respecto a buses de batería es que los primeros tienen un tiempo de carga similar a los buses diésel, ya que requieren de entre 10 a 20 minutos para ser cargados por completo (FCHJU, 2017). En particular, el protocolo SAE⁴ determina 3 posibles modos de carga; recarga lenta con una velocidad máxima de 1,8 kg/min, recarga de velocidad media a una tasa máxima de 3,6 kg/min y sistemas de recarga rápida con una capacidad de cargar hidrógeno a 7,2 kg/min (FCHJU, 2017). Por otra parte, los buses eléctricos de batería implementados en la ciudad de Santiago pueden tardar entre 3 a 4 horas⁵ en realizar una carga completa, dependiendo el estado de carga de la batería (CMM Chile, 2020).

⁴ SAE International es una asociación profesional y una organización de desarrollo de normas para la industria de la ingeniería, con especial atención a los sectores del transporte, como la automoción, la industria aeroespacial y los vehículos comerciales.

⁵ Existen otros factores los cuales pueden explicar los tiempos de carga, como la capacidad de la batería y la potencia del cargador.

3. Metodología

Para el cálculo de la fuerza a la que se encuentra sometido el bus se realizó una simulación considerando las distintas resistencias a las que se ve sometido un vehículo en general. Según el equilibrio de fuerzas son 4 las componentes las cuales un bus debe sobreponer para desplazarse longitudinalmente (Zhang, Yuan, Fu y Chang Wang, 2019), las que son la resistencia a la rodadura, la fuerza de tracción en subida, la resistencia a la aceleración y la resistencia aerodinámica. El resultado total de la fuerza ejercida por el bus para poder desplazarse corresponde a la sumatoria de las 4 componentes previamente descritas.

Luego, el trabajo (J) requerido para movilizar el bus está definido por la siguiente ecuación. Es importante hacer notar que esta corresponde a la energía que se debe realizar en las ruedas

$$E = Fd$$

En este caso, d corresponde a la distancia (m) recorrida por el bus. Por otra parte, el *output* de energía que debe suministrar el motor eléctrico considera la eficiencia asociada a la transmisión desde el motor eléctrico hasta las ruedas (η_T), por lo cual estará dada por la siguiente expresión.

$$E_{ms} = \frac{1}{\eta_T} E$$

Para determinar la energía del motor eléctrico se considera la eficiencia del mismo (η_{motor}).

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

La energía requerida por el motor eléctrico puede ser suministrada tanto por la fuel cell como por la batería, por lo que la energía que deben entregar estos sistemas considerarán las eficiencias respectivas, en donde, como se mostró anteriormente, la eficiencia de la fuel cell está en función de la potencia entregada por la misma.

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

$$E_{fuel\ cell} = \frac{1}{\eta_{fuel\ cell}} E_m$$

Luego, la potencia (kW) requerida por el sistema viene dada por.

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

Adicionalmente, cuando el bus frena, parte de la energía cinética puede ser recuperada debido a que el motor eléctrico puede operar como un generador de energía (Zhang, Yuan, Fu y Chang Wang, 2019). Por lo tanto, la energía recuperada puede ser calculada mediante.

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

En donde $\eta_{recuperación}$ corresponde a la eficiencia de la energía recuperada, v_1 es la velocidad final posterior al frenado (km/h) y v_2 la velocidad inicial en el momento en que se aplica el frenado (km/h).

Dado que existe una dualidad de sistemas que pueden proveer energía (batería y fuel cell) se requiere de un modelo para la operación de ambos. Un modelo simplificado del control de estos sistemas considera que la batería únicamente entra en operación cuando los requerimientos de potencia por parte del motor eléctrico son mayores que la potencia que puede suministrar la fuel cell (Cipollone, Di Battista, Marchionni y Villante, 2014). De esta forma la dualidad de la fuel cell y la batería queda controlada de la siguiente manera.

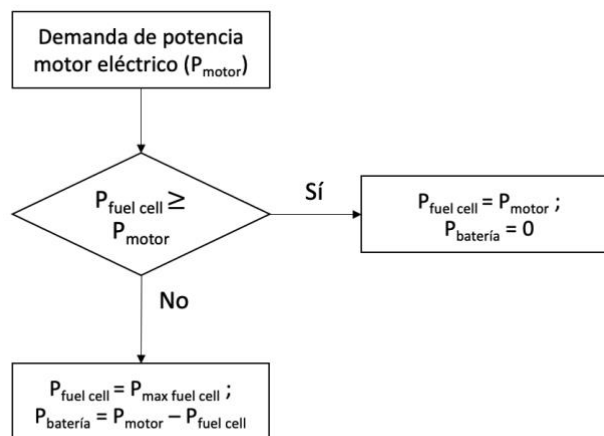


Figura 6: Control de potencia del sistema dual

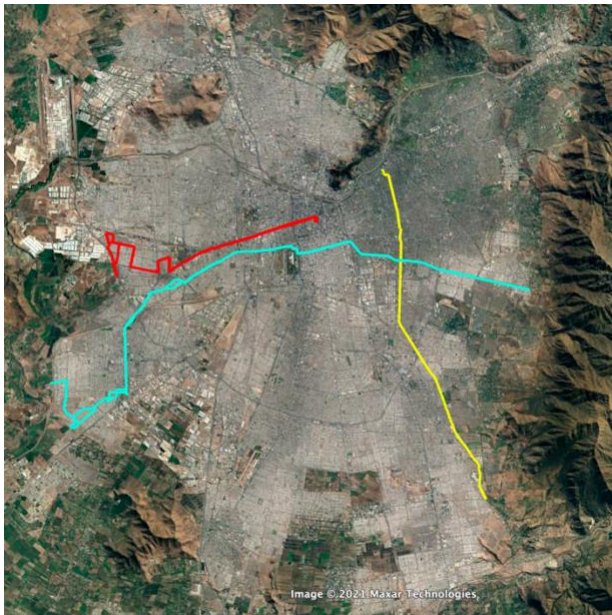
Para la aplicación de las fórmulas previamente descritas se utilizó la información provista por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Estos datos entregados por el Ministerio de Transportes consideran información asociada a la velocidad media en un tramo recorrido por el bus (denominado arco). Dependiendo del recorrido es la

cantidad de datos que se poseen, en el peor de los casos, el cual corresponde al recorrido 506, se tiene información sobre aproximadamente 50 recorridos completos, es decir, información sobre 50 recorridos de ida, y 50 recorridos de vuelta. Un ejemplo de los datos entregados por el Ministerio puede ser observado en el anexo 1.

Finalmente, con el objetivo de analizar el comportamiento energético como también de potencia asociado se realizó un levantamiento de los buses de hidrógeno comercialmente disponibles en la actualidad, los cuales fueron identificados en los mismos sitios web de los distintos proveedores de este tipo de buses. En la sección 5.2 se encuentra una tabla en donde se mencionan los proveedores de estos buses y las características principales de estos buses, entre las que se encuentra la capacidad del tanque de hidrógeno, tamaño de la batería, potencia de la fuel cell y la potencia del motor eléctrico.

4. Caso de aplicación

En el presente estudio se analizó la implementación de un bus de hidrógeno en el Sistema de Transporte Público Metropolitano RED en tres recorridos distintos; 506, 104 y 424. Estos recorridos poseen propiedades distintas respecto a su distancia como también a la pendiente promedio a la que se ven sometidos. El recorrido 506 se desplaza entre Maipú y Peñalolén, el recorrido 104 entre Puente Alto y Providencia, y finalmente el recorrido 424 entre Maipú y la comuna de Santiago. Los recorridos pueden ser observados en la figura a continuación.



	Recorrido	Distancia Ida (km)	Distancia Vuelta (km)
	506	36,5	36,2
	104	19,5	19,1
	424	17,4	19

Tabla 1: Recorridos a estudiar

Figura 7: Recorridos a estudiar

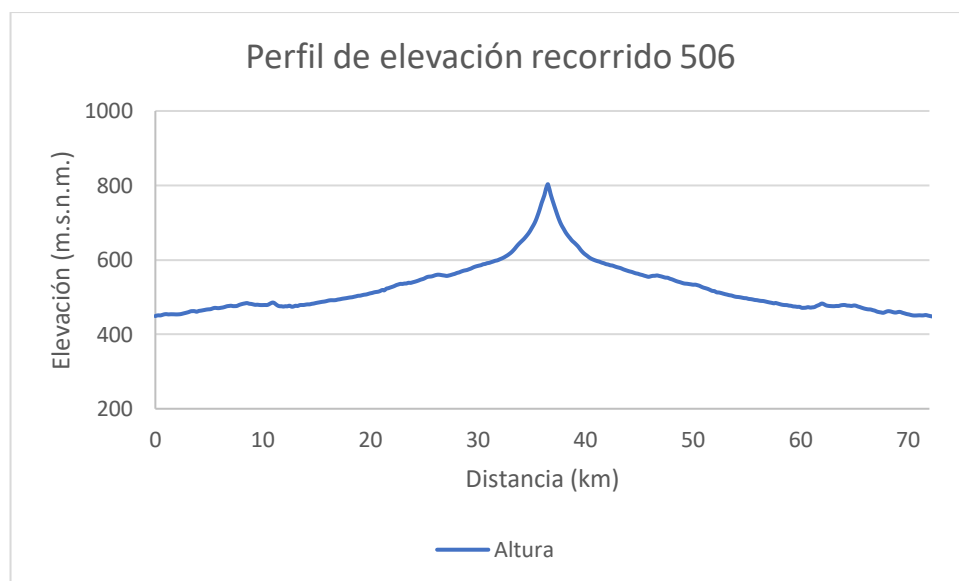


Figura 8: Perfil de elevación recorrido 506

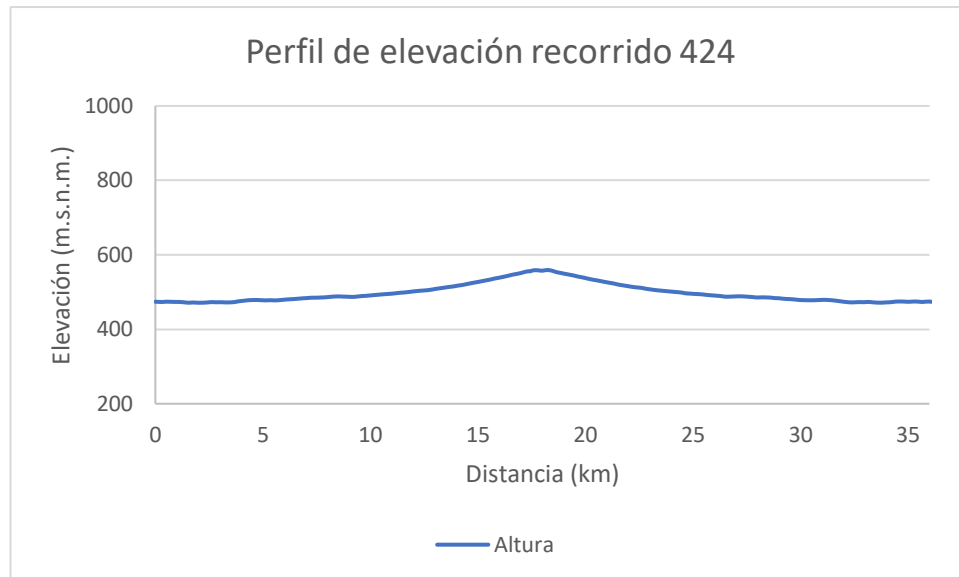


Figura 9: Perfil de elevación recorrido 424

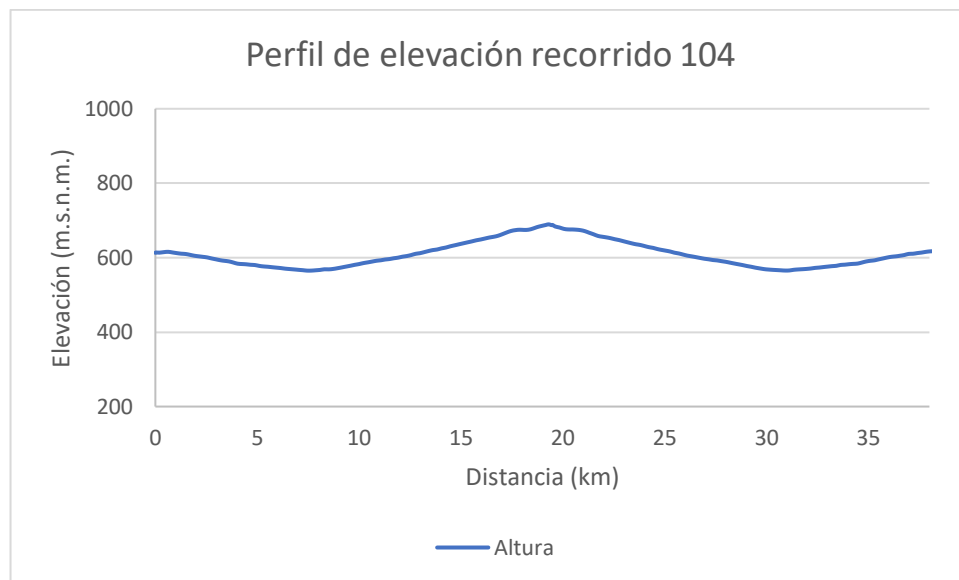


Figura 10: Perfil de elevación recorrido 104

El recorrido 506 tiene una duración promedio de aproximadamente 3 horas, considerando tanto el tramo de ida y de vuelta. Por otra parte, el recorrido 424 y el recorrido 104 tienen una duración cercana a las 2 horas.

5. Resultados

En primera instancia, se realizó un análisis de requerimiento de potencia y de energía considerando el caso que en estos recorridos se utiliza un bus eléctrico a batería. El bus utilizado para este análisis corresponde al bus marca BYD modelo K9FE. Las características principales de este bus se presentan a continuación (BYD, s.f). Se realizó el análisis con este bus ya que este se encuentra presente en algunas de las rutas del Sistema de Transporte Metropolitano de Movilidad.

Capacidad máxima	81 pasajeros
Motor eléctrico	300 kW
Energía baterías	276,5 kWh
Peso bruto vehicular	18.500 kg

Tabla 2: Características principales bus eléctrico BYD K9FE

Son dos los motivos por los cuales se realiza el análisis de un bus eléctrico; en primera instancia para entender cómo sería la operación de este en estos recorridos en términos de su consumo de energía y requerimientos de potencia, y, por otra parte, para establecer un punto comparativo posteriormente con los buses de hidrógeno.

5.1 Análisis consumo de energía bus eléctrico de batería

Con los parámetros previamente mencionados se puede determinar los requerimientos de energía asociados a cada uno de los recorridos. En las figuras a continuación se muestra en el eje vertical principal el porcentaje de energía remanente en las baterías del bus eléctrico BYD K9FE, mientras que en el segundo eje vertical se muestra la elevación. Es importante mencionar que tanto para los cálculos de potencia como de energía no se consideran los sistemas auxiliares del bus, y que, por otra parte, se asume que el bus siempre va cargado con la máxima cantidad de pasajeros (81 pasajeros).

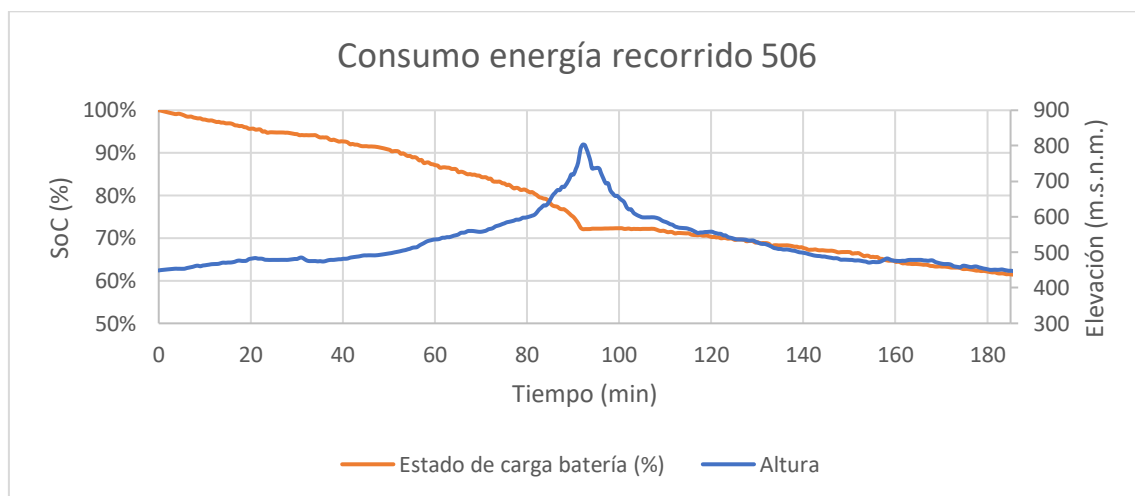


Figura 11: Consumo energía recorrido 506

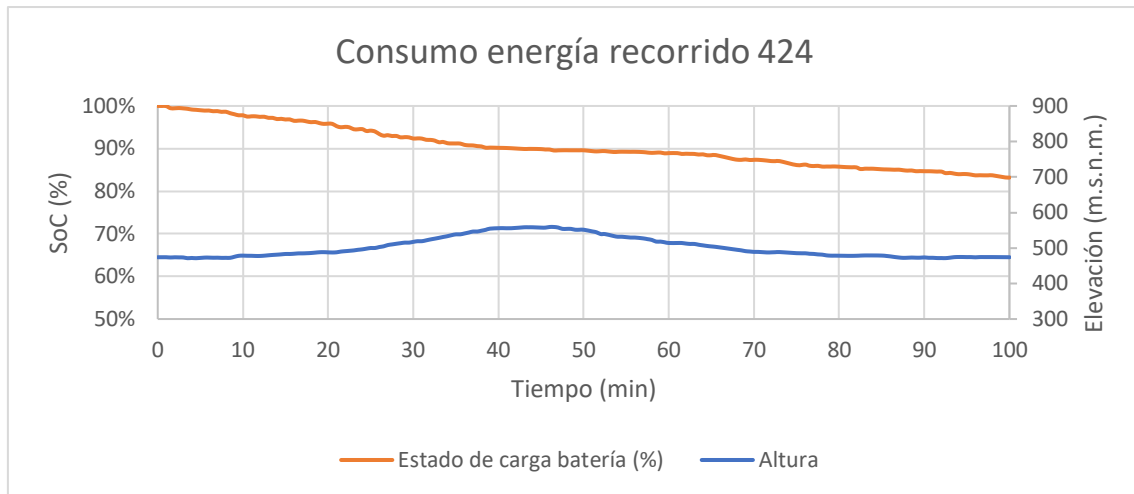


Figura 12: Consumo energía recorrido 424

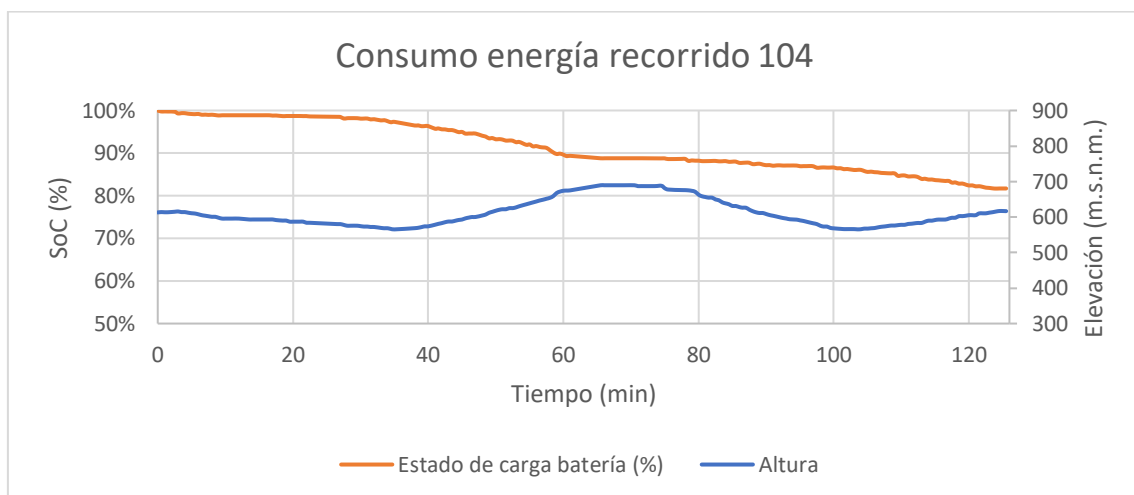


Figura 13: Consumo energía recorrido 104

Como se puede desprender de las figuras anteriores, el recorrido 506 es aquel que más energía requiere en comparación con el recorrido 424 y 104. Lo anterior se explica por dos motivos; primero porque el recorrido 506 tiene una duración cercana a una hora más que los otros, y también por el efecto de la pendiente del recorrido.

Un bus eléctrico BYD K9FE en el recorrido 506 consume cerca de un 40% de su batería al realizar el trayecto ida y vuelta. Por lo tanto, como máximo la autonomía que posee en este recorrido es de 2 vueltas, no obstante, a partir de la información que se pudo obtener en terreno, en múltiples ocasiones estos buses son cargados posteriores a la realización de un recorrido.

Análogamente, en el recorrido 424 y 104, el consumo de energía es ligeramente menor a un 20% de la batería. Por lo tanto, la autonomía máxima que poseería este bus en

estos recorridos es de 4 vueltas, ya que desde la operación se evita contar con un bus en ruta cuyo estado de carga de batería se encuentre en el rango del 20%.

5.2 Levantamiento oferta comercial buses de hidrógeno

Posteriormente, se realizó un levantamiento de los buses disponibles comercialmente de los principales proveedores de buses de hidrógeno en el mundo. Es importante mencionar que los buses presentados a continuación corresponden al modelo ofrecido por las empresas, no obstante, estas empresas han participado en el desarrollo de proyectos piloto a lo largo del mundo con características de buses distintas, lo que demuestra que existe un rango de flexibilidad en las características del bus. La tabla presentada a continuación no es exhaustiva.

Marca	Modelo	Potencia motor eléctrico	Potencia Fuel Cell	Tanque H ₂	Batería
New Flyer	Xcelsior CHARGE H2 (12 m)	160 kW	85 kW	37,5 kg	100 kWh
New Flyer	Xcelsior CHARGE H2 (18 m)	320 kW	85 kW	60 kg	120 kWh
CaetanoBus	H2 City Gold (10 m)	180 kW	60 kW	37,5 kg	29 kWh
CaetanoBus	H2 City Gold (12 m)	180 kW	60 kW	37,5 kg	44 kWh
Safra	Businova H2 (10 m)	250 kW	30 kW	30 kg	132 kWh
Safra	Businova H2 (12 m)	250 kW	30 kW	30 kg	132 kWh
ENC	Axess Fuel Cell (12 m)	200 kW	150 kW	50 kg	11,2 kWh
Solaris	Urbino	250 kW	70 kW	37,5 kg	30 kWh
Van Hool	A330 Fuel Cell	210 kW	85 kW	38 kg	24 kWh

Tabla 3: Buses de hidrógeno y sus características principales

Uno de los análisis relevante es respecto a los requerimientos de potencia. En este sentido, se busca que el motor del bus de hidrógeno sea capaz de satisfacer los requerimientos de potencia del recorrido acorde a las velocidades actuales con las que se transita en esta ruta. Es importante destacar que si el motor eléctrico del bus de hidrógeno no es capaz de satisfacer la potencia requerida en algún punto del trayecto, en ese instante el bus acelerará a una tasa más baja. Si lo anterior ocurre con frecuencia se verá perjudicada la velocidad media del recorrido, afectando así al diseño de la flota.

En la figura a continuación se puede observar en las líneas horizontales el peor caso del máximo requerimiento de potencia de los buses acorde al perfil de velocidad entregado por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (aproximadamente 50 recorridos por cada ruta), mientras que cada uno de los puntos representa la potencia máxima del motor eléctrico de distintos buses de hidrógeno.

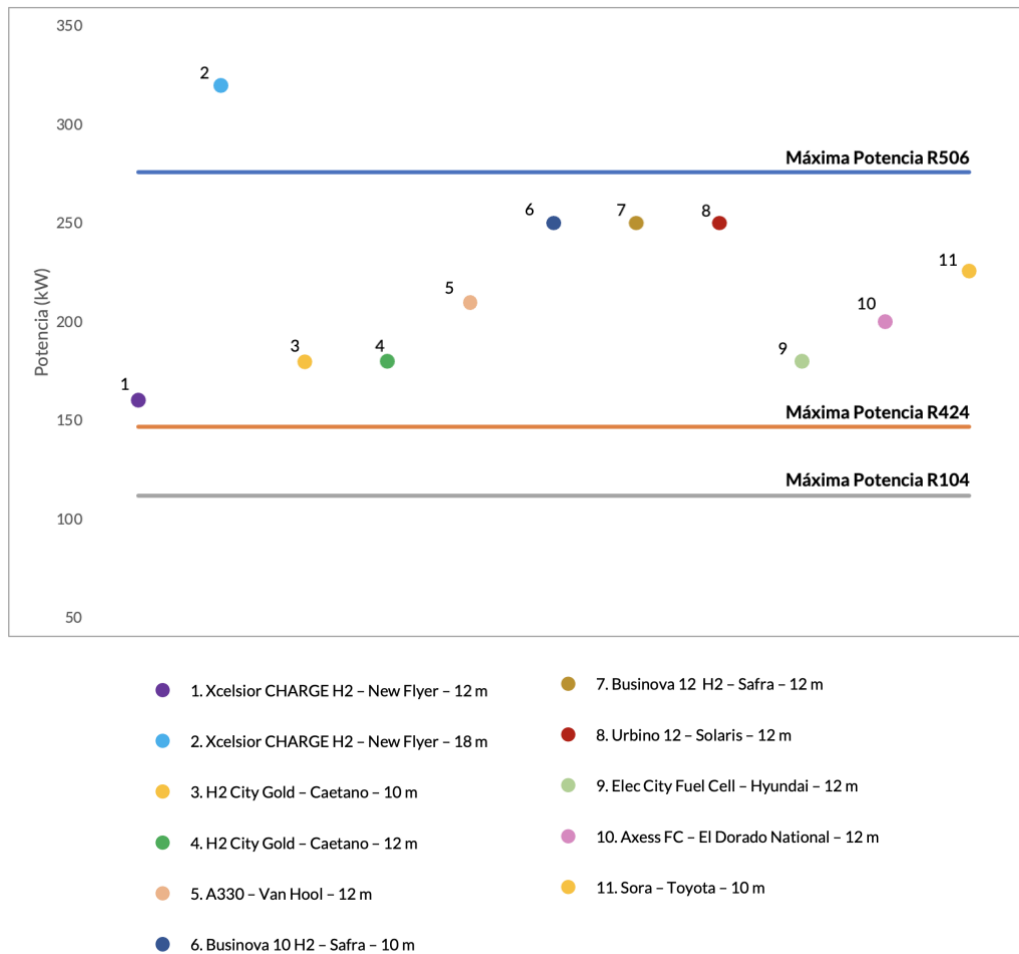


Figura 14: Análisis de potencia recorridos 506, 424 y 104 (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede desprender de la figura anterior todos los buses de hidrógeno presentados cumplen con los requerimientos asociados a la potencia para los recorridos 424 y 104, ya que la potencia del motor eléctrico de los buses se encuentra por sobre los requerimientos máximos de potencia calculados a partir de las ecuaciones presentados en la metodología. Adicionalmente, se puede notar que para el recorrido 506 únicamente el bus Xcelsior CHARGE H2 de New Flyer de 18 metros cumple con los requerimientos de potencia actuales del recorrido.

Si bien en el caso del recorrido 506 se alcanza una potencia cercana a los 270 kW, esto ocurre únicamente una vez durante el recorrido, precisamente al acercarse al terminal de buses en la comuna de Peñalolén, en donde la pendiente es máxima en el recorrido. Sin considerar estos requerimientos de potencia los máximos niveles de potencia se encuentran cercanos a los 150 kW, asimilándose a los máximos alcanzados por el recorrido 424. Lo anterior permite que se puedan utilizar el resto de los buses de hidrógeno en este recorrido siendo la única limitación que la aceleración en el trayecto cercano al terminal de Peñalolén será menor.

5.3 Simulación de bus de hidrógeno en recorridos del Sistema

Habiendo mencionado lo anterior, se analizó la implementación de un bus de hidrógeno en los tres recorridos; en el caso del recorrido 506 se evaluó la implementación del bus Xcelsior CHARGE H2 de New Flyer en el modelo de 18 metros, mientras que en el caso del recorrido 424 y el recorrido 104 se analizó la implementación del bus Businova 12 H2 de la empresa Safra. A continuación se puede observar el consumo de energía de cada uno de estos recorridos.

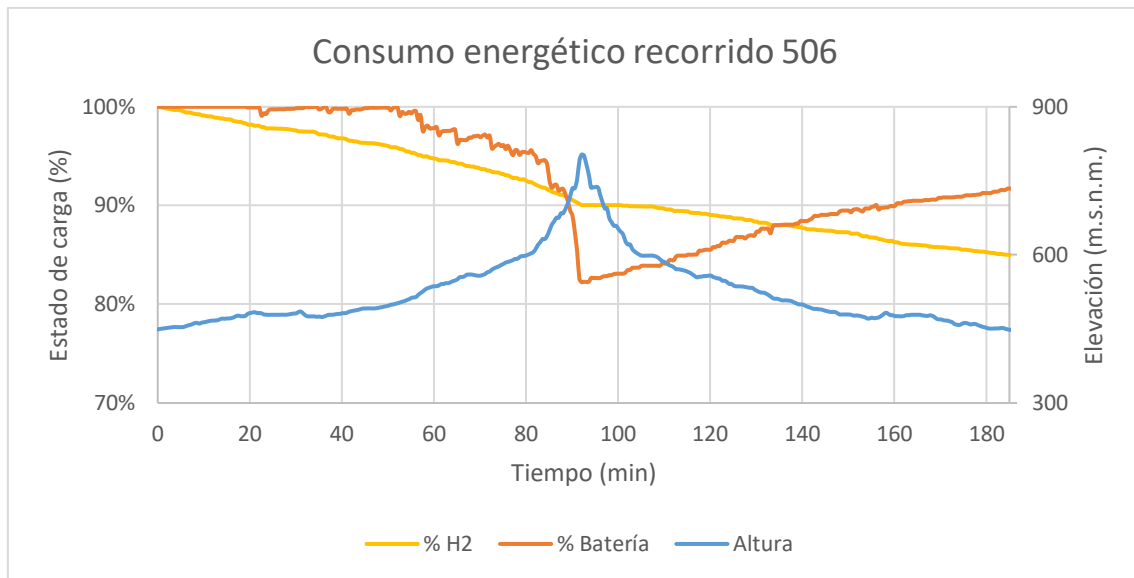


Figura 15: Consumo energético bus H2 recorrido 506

En el caso del recorrido 506 se puede notar que la batería es altamente exigida en el último trayecto de ida, en donde la pendiente alcanza sus máximos valores y la fuel cell por si sola no es capaz de satisfacer los requerimientos de potencia por lo que se debe activar el sistema de batería. Con esto, en el trayecto de ida se consume cerca de un 20% de la batería. No obstante, la pendiente en el retorno permite generar una importante recuperación de energía debido a las variaciones de energía cinética, obteniendo así que el consumo neto de la batería en el recorrido, considerando ida y retorno, es levemente menor que un 10%.

Por otra parte, este bus cuenta con uno de los tanques de hidrógeno más grandes de los que se pudo observar, con una capacidad de almacenamiento de 60 kg, lo cual le permite tener una gran autonomía, ya que se consumiría aproximadamente un 15% del tanque de hidrógeno al hacer el recorrido completo, lo cual equivale a 9 kg de H₂. Considerando el criterio utilizado para los buses eléctricos de batería, en donde se opta por no tener en ruta buses con una carga entre el 20% al 30% de su capacidad energética, y además

debido a que no todo el hidrógeno en el tanque es útil⁶, se podría alcanzar una autonomía de 5 vueltas.

En la figura a continuación se puede observar una simulación de una operación continua de 24 horas. Asumiendo que el bus únicamente se detiene para abastecerse de energía, ya sea para cargar las baterías o para cargar hidrógeno y considerando las autonomías previamente calculadas, se puede notar que el bus de hidrógeno en el recorrido 506 se encuentra un tiempo significativamente mayor en ruta, alcanzando un tiempo en ruta mayor de un 28% en comparación con los buses eléctricos de batería. Esto se debe tanto por el tamaño del tanque de hidrógeno, pero especialmente debido al tiempo de carga de cada uno de estos sistemas ya que se requieren de entre 10 a 20 minutos para cargar por completo un bus de hidrógeno (FCHJU, 2017), mientras que los buses eléctricos de batería implementados en la ciudad de Santiago pueden tardar entre 3 a 4 horas en realizar una carga completa, dependiendo el estado de carga de la batería (CMM Chile, 2020).

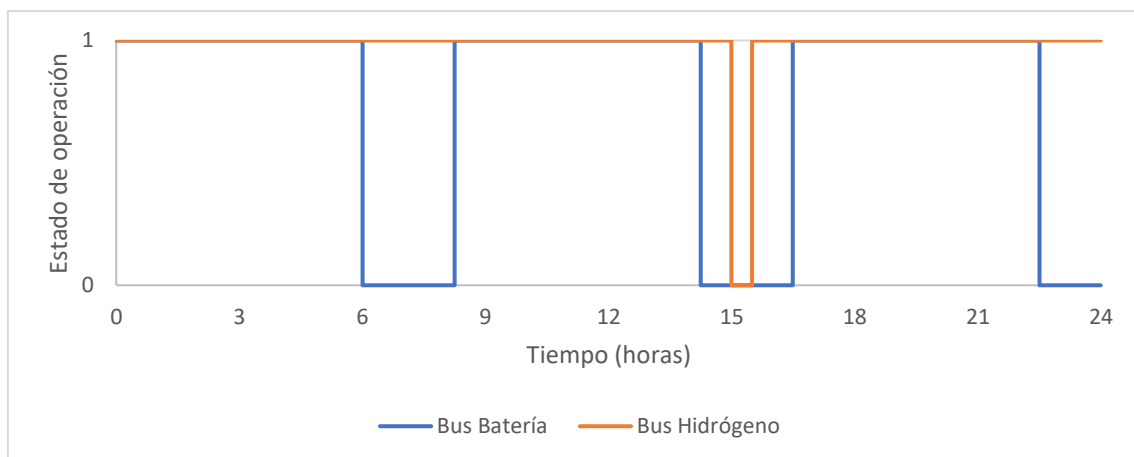


Figura 16: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 506

De forma análoga se realizó el análisis de energía para el recorrido 424 y 104, obteniendo los siguientes resultados.

⁶ Esto se debe a que eventualmente en el proceso de descarga del hidrógeno hacia la fuel cell la presión en el interior del tanque se igualará a la presión del exterior, por lo que no se continuará con el traspaso del flujo

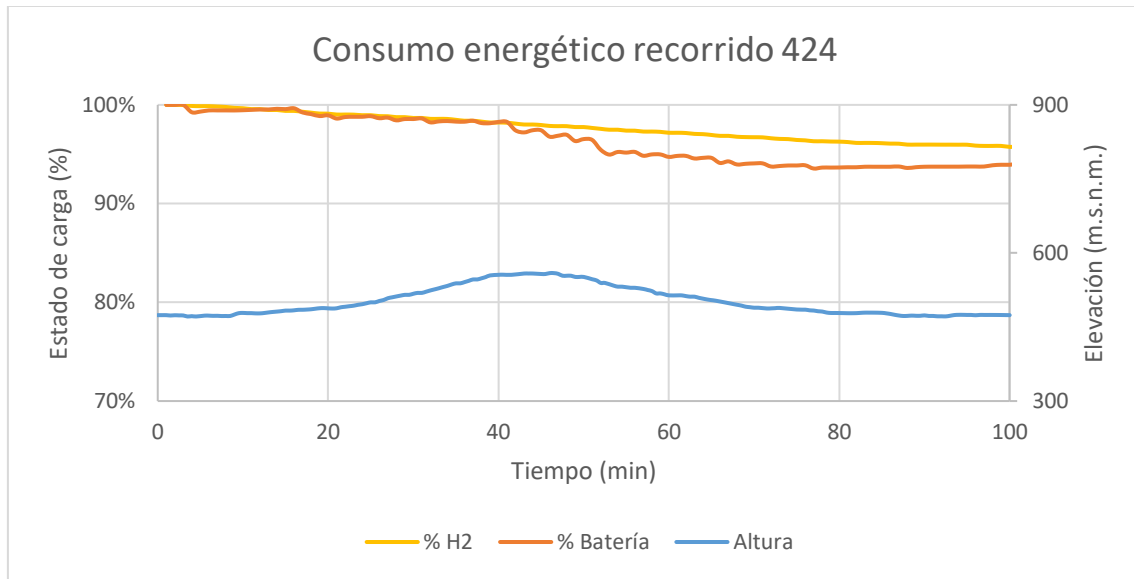


Figura 17: Consumo energético bus H2 recorrido 424

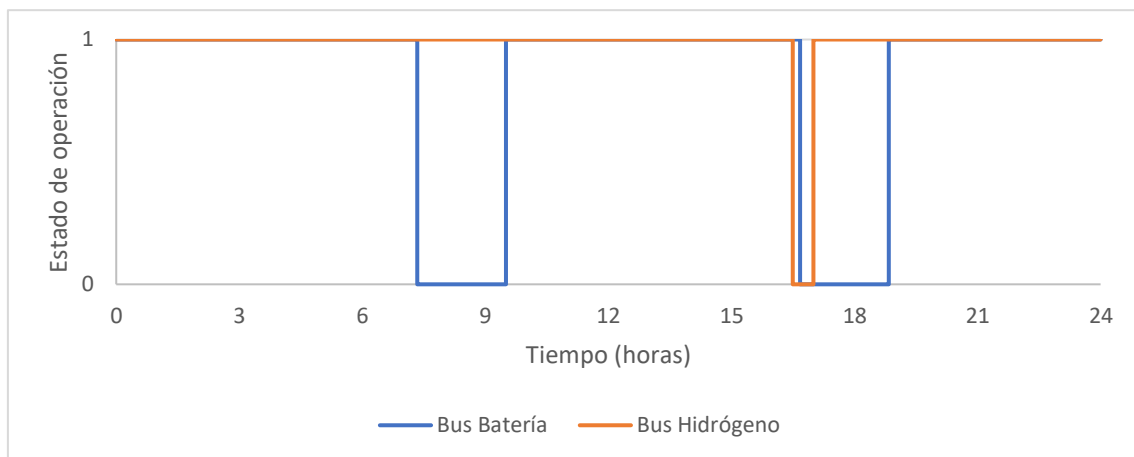


Figura 18: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 424

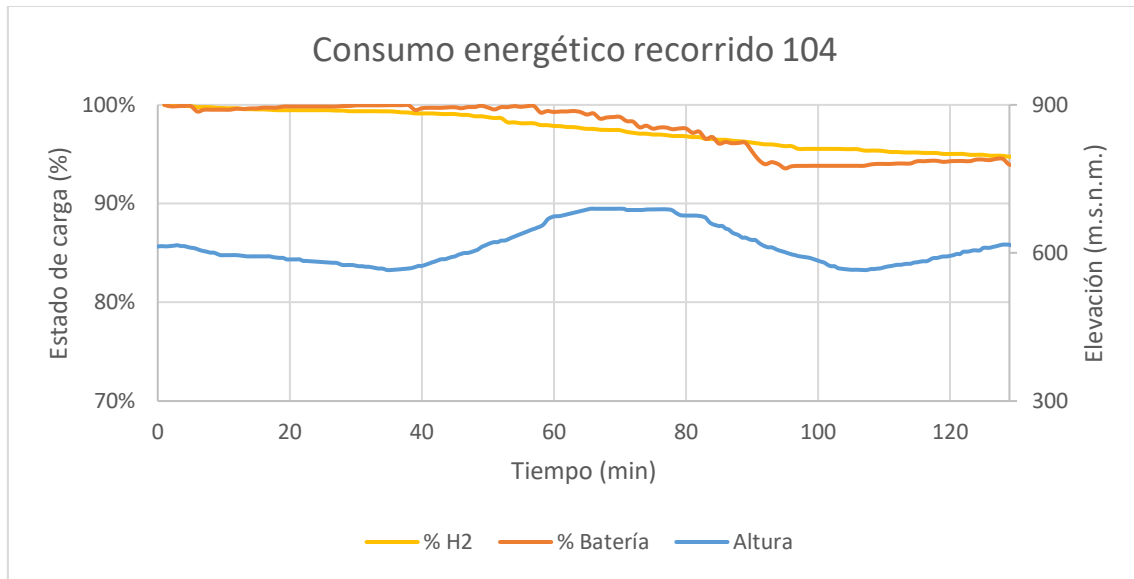


Figura 19: Consumo energético bus H2 recorrido 104

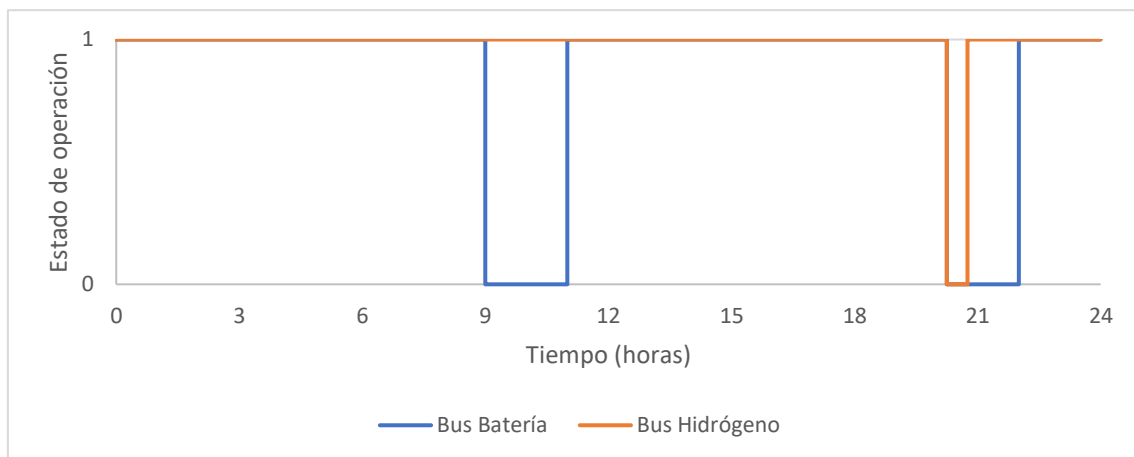


Figura 20: Simulación operación bus hidrógeno y bus batería recorrido 104

En conclusión, los resultados obtenidos a partir del análisis de energía de estos tres recorridos son los siguientes.

Recorrido	Consumo H ₂ total	Rendimiento	Recorridos de autonomía
506	9,0 kg	12,4 kg-H ₂ /100 km	5
424	2,2 kg	6 kg-H ₂ /100 km	9
104	2,5 kg	6,4 kg-H ₂ /100 km	9

Tabla 4: Resumen resultados consumo hidrógeno por recorrido

El rendimiento de los buses de hidrógeno en estos recorridos 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-H₂/100 km (FCHJU, 2015), cuya variación puede ir desde los 6 kg-H₂/100 km hasta 15 kg-H₂/100 km

(Keolis, 2020). En el último reporte de Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL), se muestran los resultados asociados a la implementación de 5 buses de hidrógeno en el Valle de Coachella en California y de 10 buses de hidrógeno en el sur de California durante el 2020, obteniendo rendimientos de 11,16 kg-H₂/100 km (NREL, 2021c) y de 13,95 kg-H₂/100 km (NREL, 2021b).

5.4 Análisis de sensibilidad

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para el bus utilizado en el recorrido 506, esto con el objetivo de entender el comportamiento de dos variables en particular; el peso del bus y el tamaño de la fuel cell. En el caso del peso se analizó tanto el comportamiento de la potencia del bus como también su consumo de energía. En el caso de la fuel cell, una variación en el tamaño de la misma no afecta al comportamiento de potencia total del sistema requerida, únicamente se ve afectado el consumo de energía tanto de la batería y de hidrógeno, por lo que son estos indicadores los que se analizan en ese caso.

Variable	Bajo	Actual	Alto
Peso	28.000 kg	32.000 kg	36.000 kg
Tamaño F.C	70 kW	85 kW	100 kW

Tabla 5: Parámetros análisis de sensibilidad

A continuación, se presenta el comportamiento del requerimiento de potencia con las distintas configuraciones de peso. En la línea horizontal se observa la máxima potencia del motor eléctrico de este bus (320 kW). Es importante recordar que para el caso del análisis de variaciones de peso del vehículo no se altera ninguna otra variable, es decir, el tamaño del tanque de hidrógeno se mantiene (60 kg) y el tamaño de la fuel cell también (85 kW).

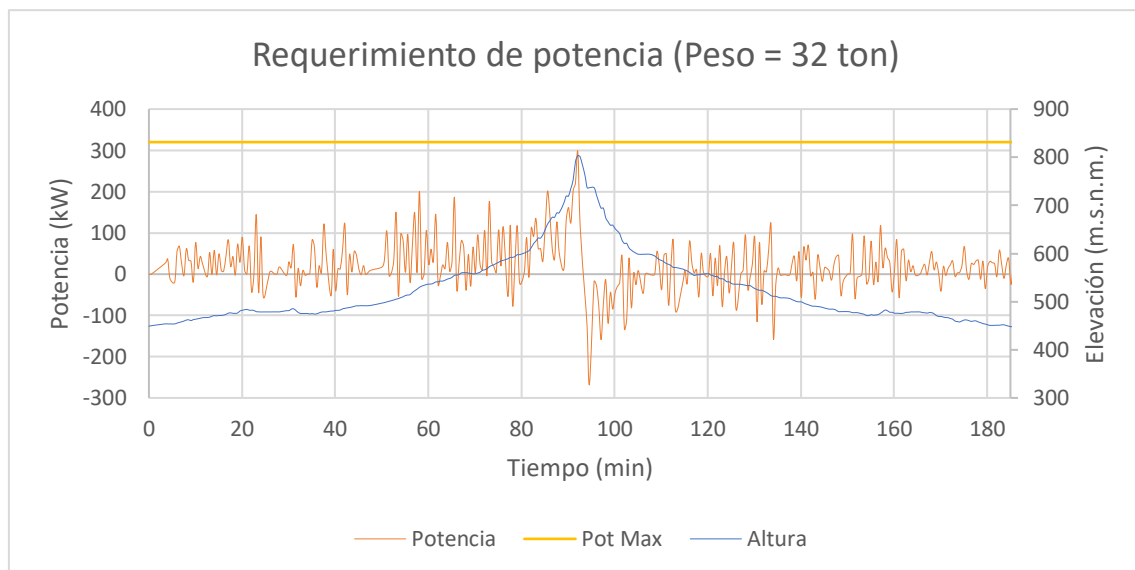


Figura 21: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 32 toneladas

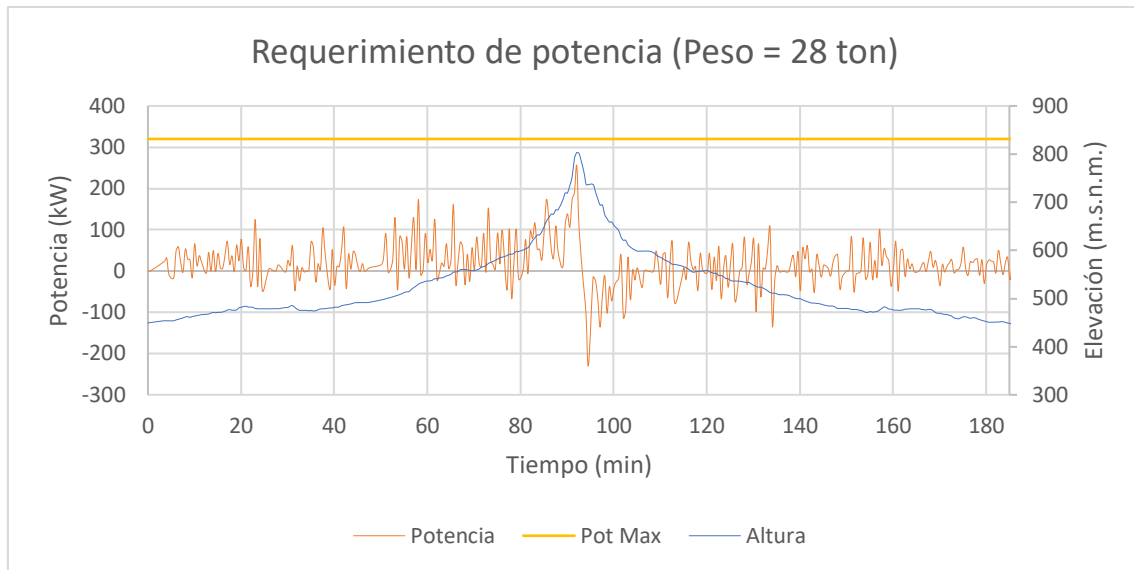


Figura 22: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 28 toneladas

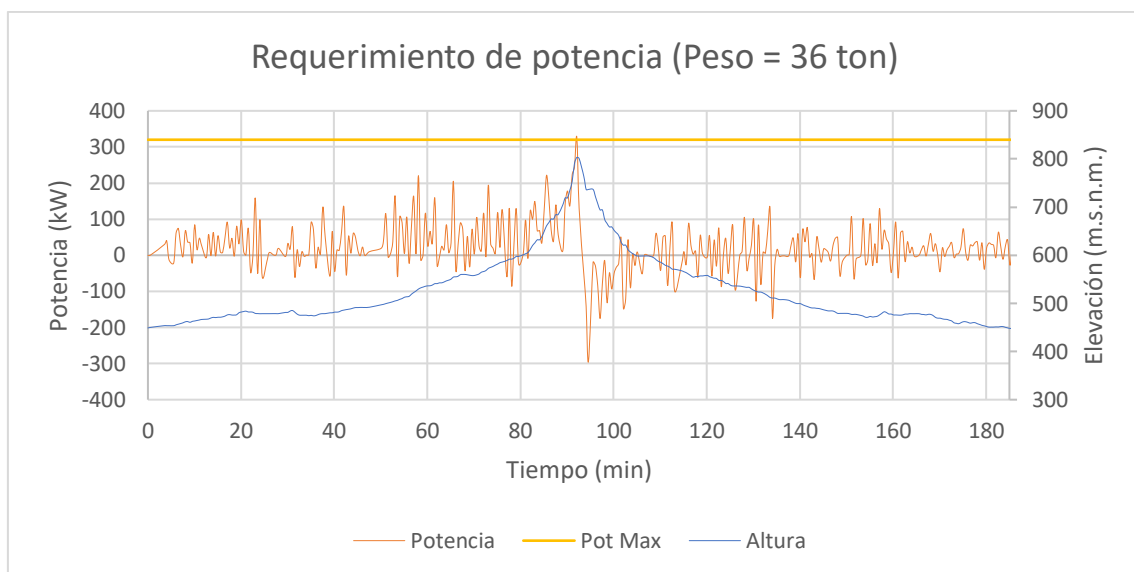


Figura 23: Requerimiento de potencia recorrido 506, bus 36 toneladas

Como se puede desprender de las figuras anteriores, únicamente en el caso en donde se realizó un aumento en el peso del vehículo, lo cual se puede deber, por ejemplo, a un chasis más pesado, generaría que la potencia máxima requerida para desplazar el bus a la misma velocidad obtenida a partir de la información entregada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones sea mayor que la potencia que puede entregar el motor eléctrico. Por otra parte, se puede notar que un aumento en el peso del bus no tendría el efecto descrito anteriormente en otros puntos del recorrido.

Es importante recordar que sobrepasar la potencia que puede entregar el motor eléctrico tendría como efecto que la aceleración en ese trayecto sería menor. El único

caso en donde el bus no se podría desplazar debido a la falta de potencia, es en el cual estando detenido no pueda generar la potencia suficiente para generar una aceleración, lo cual no ocurre en este análisis.

A continuación, se mostrará el efecto que tiene el aumento del peso en el consumo de hidrógeno.

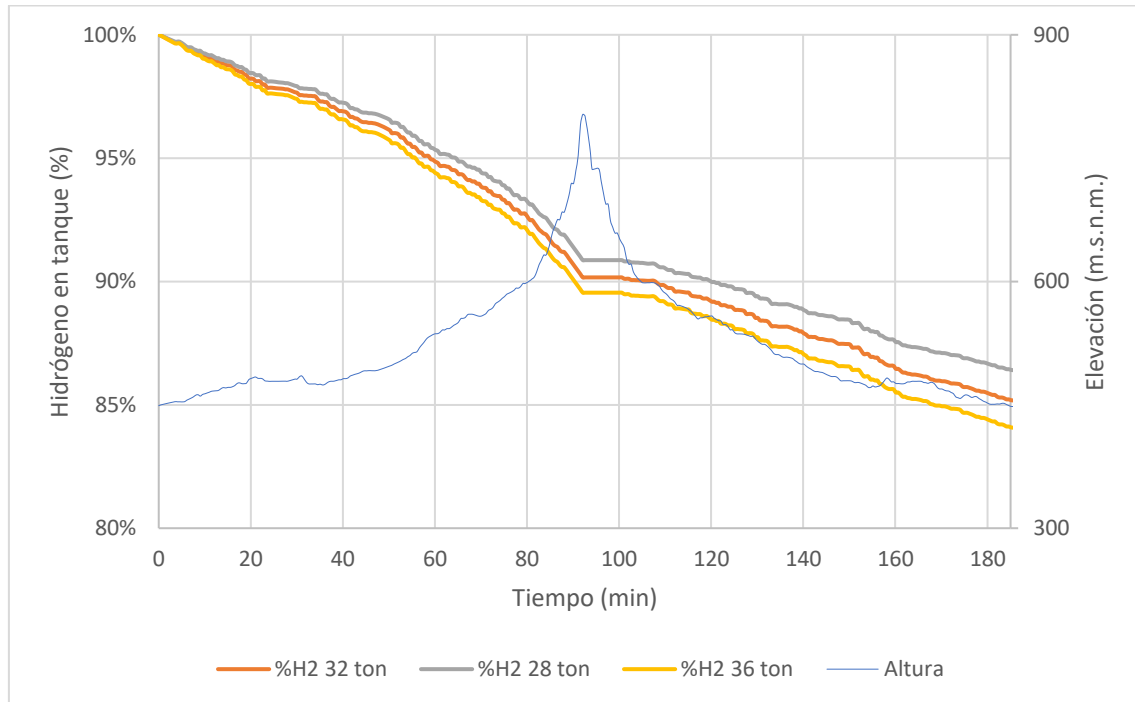


Figura 24: Análisis de sensibilidad de la variable peso en el consumo de hidrógeno

Las diferencias de consumo de hidrógeno al generar variaciones de 4 toneladas en el peso del vehículo son de aproximadamente 0,6 kg de hidrógeno por recorrido. Un aumento en el peso del bus en 4 toneladas generaría que el consumo total del hidrógeno en el recorrido sea cercano a 9,6 kg, lo cual sería un 7% más de hidrógeno que el caso original.

Tal como se mencionó anteriormente, otra de las variables que se busca estudiar es el tamaño de la fuel cell en términos de la potencia que puede suministrar. Un aumento en la potencia de salida de la fuel cell implicará que la fuel cell entregará una mayor cantidad de energía ya que su rango de operación será mayor, y por consiguiente se incrementará el consumo de hidrógeno. Además, un aumento en el tamaño de la fuel cell implica que la batería será utilizada durante una menor cantidad de tiempo. En este caso se vuelve a la configuración original en términos del peso de bus, es decir, 32 toneladas.

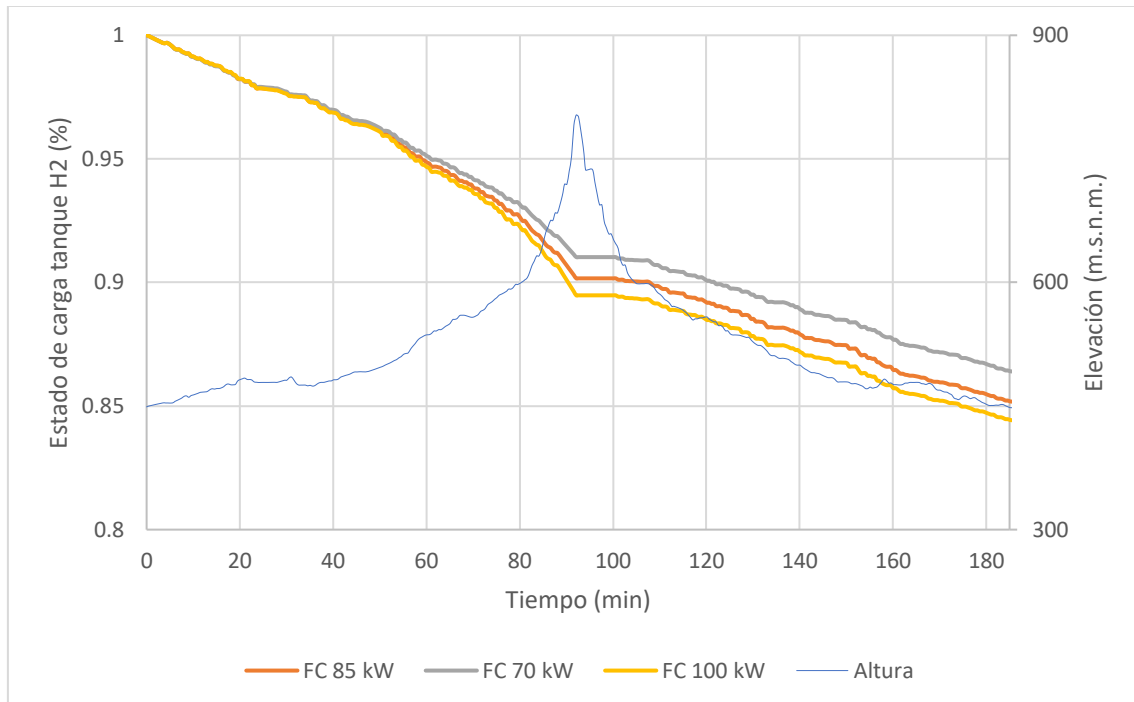


Figura 25: Análisis de sensibilidad tamaño fuel cell

En el caso base, es decir, cuando la fuel cell tiene un tamaño de 85 kW el consumo de hidrógeno del recorrido completo es de aproximadamente 9 kg. Al reducir el tamaño de la fuel cell a 70 kW, el consumo de hidrógeno disminuye a 8,1 kg, mientras que al aumentar el tamaño de la fuel cell a 100 kW este valor alcanza 9,3 kg de hidrógeno. Al generar variaciones en el tamaño de la fuel cell de 15 kW se puede notar que el consumo de hidrógeno no varía de forma equitativa al aumentar y al reducir el tamaño de la fuel cell. Esto se explica principalmente por la curva de eficiencia asociada a este equipo presenta en secciones anteriores, ya que al disminuir el tamaño de la fuel cell, si bien operará en un rango menor de potencia, lo hará de forma más eficiente.

5.5 Resultados de implementación de bus de hidrógeno en el mundo

Uno de los elementos importantes en la evaluación de buses de hidrógeno es su durabilidad. En este sentido el Departamento de Energía de Estados Unidos ha definido un rendimiento objetivo de entre 4 a 6 años, equivalente a 25.000 horas, para el sistema fuel cell (NREL, 2021a). Una de las flotas más antiguas en Estados Unidos corresponde a los 8 buses fuel cell Van Hool implementados en el año 2010. La figura a continuación muestra el estado de los buses a julio de 2020, en donde se puede observar que los sistemas fuel cell de los 4 primeros buses ya fueron retirados, en donde todos pudieron superar las 25.000 horas de operación. Por otra parte, aún existen sistemas fuel cell en operación en donde la mayoría ya ha sobrepasado el objetivo propuesto por el Departamento de Energía de Estados Unidos. (NREL, 2021a). Lo anterior puede ser observado en la figura a continuación.

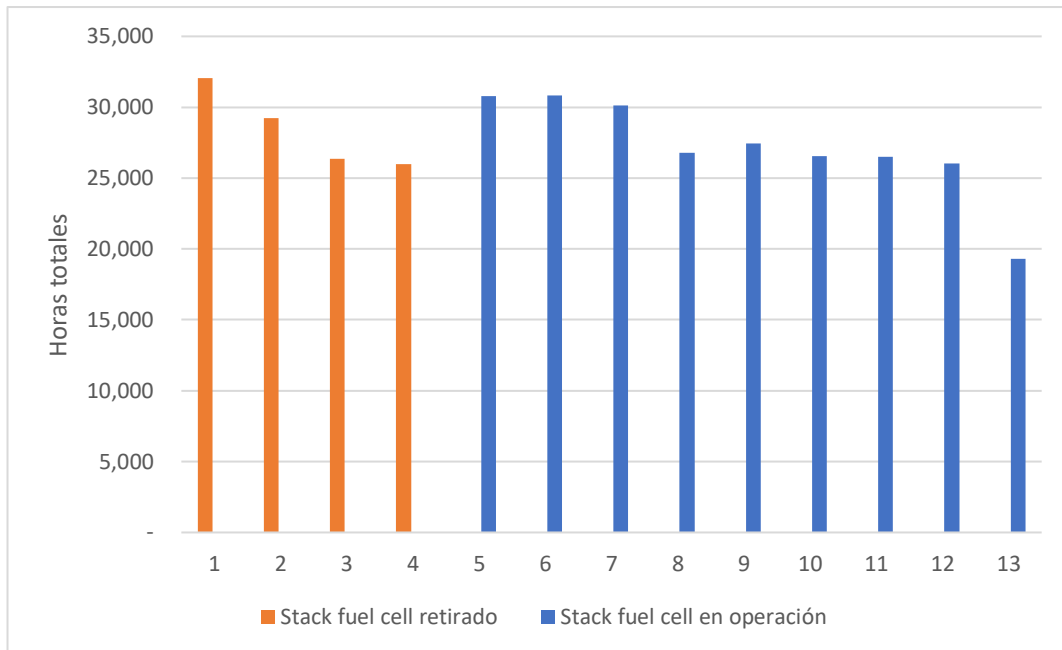


Figura 26: Horas de operación proyecto buses de hidrógeno en USA (Basado en NREL, 2021a)

La disponibilidad de los buses de hidrógeno para el caso de aplicación en Estados Unidos aún se encuentra ligeramente por debajo de los buses diésel, encontrándose en general entre un 80% a un 70%, mientras que los buses diésel tienen disponibilidades por sobre el 90%. Lo anterior se explica principalmente debido que a los buses de hidrógeno se les realizaron una mayor cantidad de mantenciones preventivas, además de la falla en otros componentes asociados al bus, como el aire acondicionado, problemas eléctricos, entre otros. Si se analiza la disponibilidad del sistema fuel cell de forma aislada, es decir, sin considerar desperfectos en la batería, chasis, aire acondicionado, entre otros, la disponibilidad de esta parte del bus alcanza valores sobre el 95%, lo cual demuestra que finalmente la indisponibilidad de buses de hidrógeno en este caso no se explica por el sistema de hidrógeno propiamente tal, sino por otros factores (NREL, 2021a).

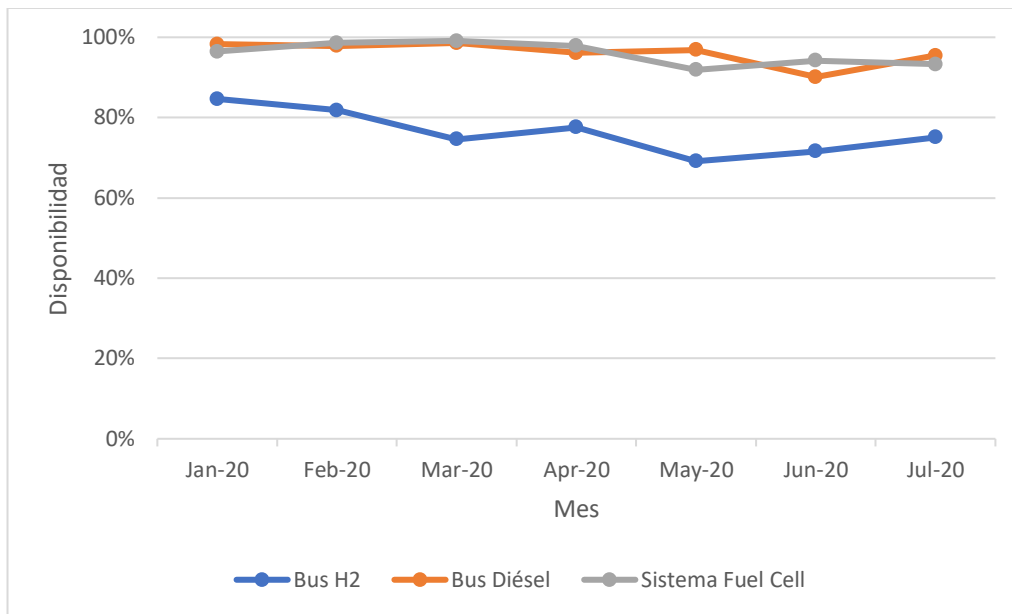


Figura 27: Disponibilidad buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)

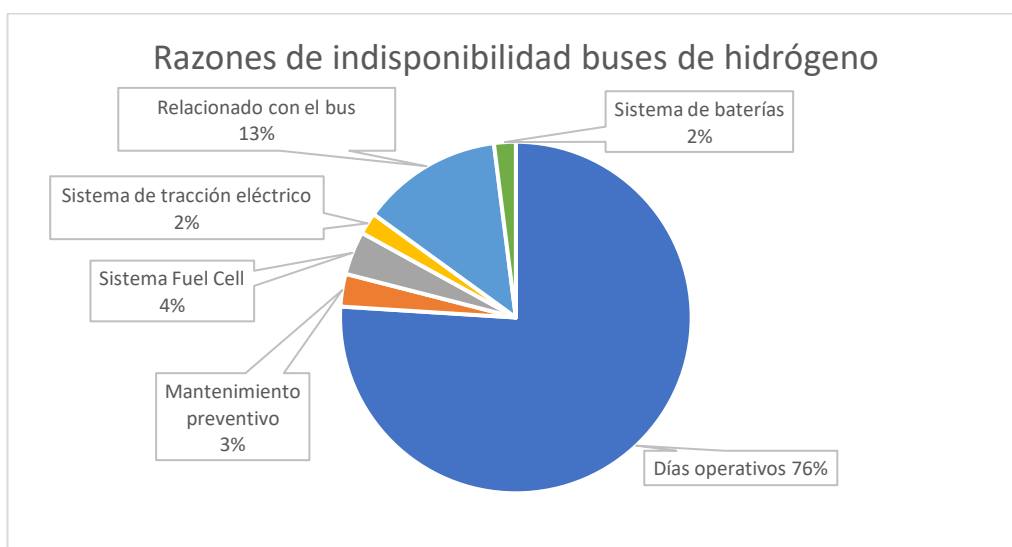


Figura 28: Razones de indisponibilidad buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)

Los costos de inversión (figura 29) asociados a la adquisición de un bus de hidrógeno siguen siendo elevados respecto a un bus diésel o a un bus eléctrico de baterías. Durante el año 2018 se pudieron observar costos cercanos a 1.300.000 dólares (NREL, 2021a), no obstante, estos costos de capital consideran la adquisición de un único bus, por lo que la adquisición de grandes volúmenes podría permitir acceder a precios más bajos. La información histórica de costos de inversión asociados a la adquisición de un bus de hidrógeno puede ser observada en la figura a continuación. Por otra parte, un bus eléctrico a batería puede tener costos de entre 200.000 a 500.000 dólares (CBC, 2020).

A pesar de esto, el Departamento de Energía de Estados Unidos plantea como precio objetivo 500.000 dólares por unidad, lo cual podría ser alcanzado en los próximos años dada la curva observada en la figura a continuación.

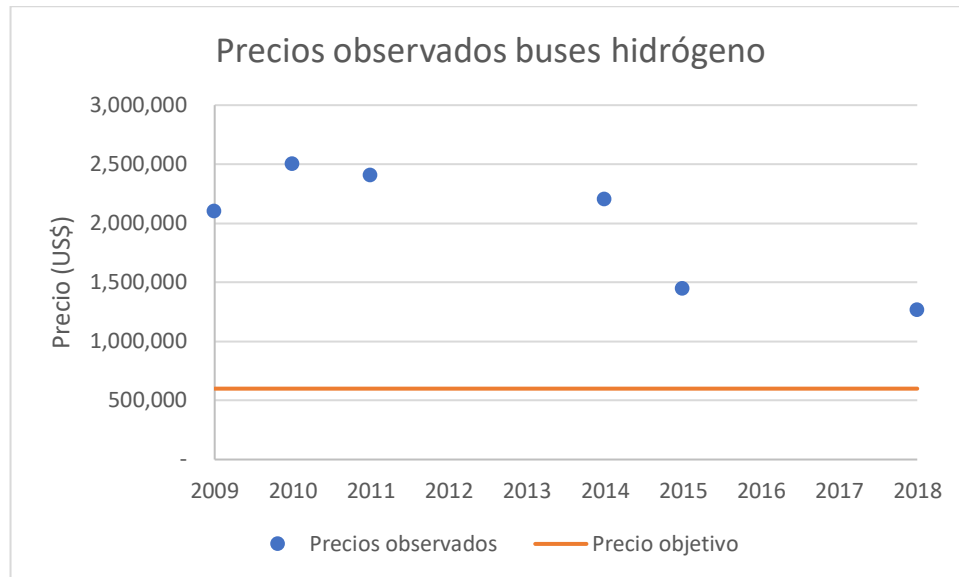


Figura 29: Precios observados buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)

Los costos de mantención de los buses de hidrógeno, observados en la figura 30 y 31, respecto a los buses diésel en la experiencia de los proyectos en Estados Unidos son ligeramente mayores en el caso de la mantención programada. Si se compara únicamente la mantención no programada los costos entre estos dos tipos de buses no son significativamente diferentes (NREL, 2021a). Por otra parte, si se desglosan los costos de mantención en piezas y mano de obra, se puede observar que los buses de hidrógeno son menos intensivos en el costo por piezas que los buses diésel.

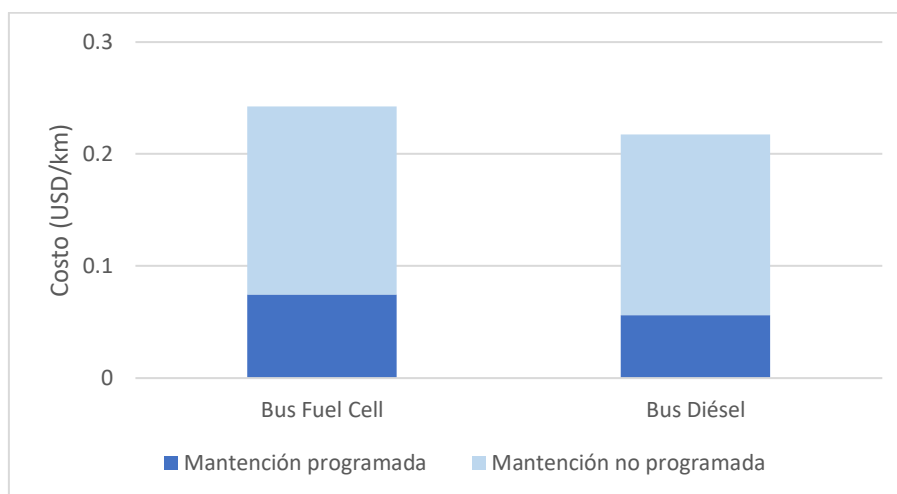


Figura 30: Costo de mantención buses de hidrógeno según tipo (Basado en NREL, 2021a)

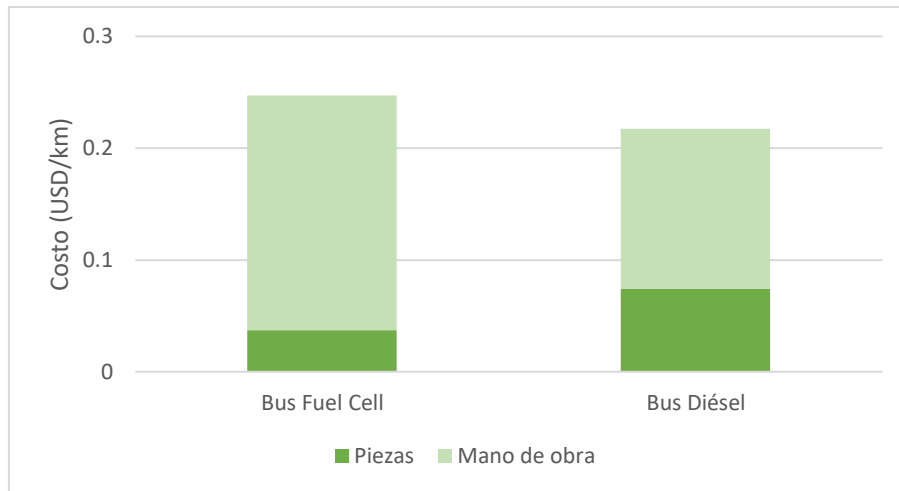


Figura 31: Costo de mantención buses de hidrógeno según partes (Basado en NREL, 2021a)

Si se compara la evolución de los costos de mantención de buses de hidrógeno, eléctricos y diésel a lo largo de los meses de operación se puede notar que existe una convergencia entre los distintos tipos de buses. En un comienzo los buses de hidrógeno poseen un mayor costo de mantención ya que se debe capacitar al personal, lo que no ocurre en el caso de los buses diésel y de baterías, debido a que el conocimiento asociado a estas tecnologías se encuentra más desarrollado al ser comparado con los buses de hidrógeno. Posteriormente, el costo en capital humano como en piezas requeridas para los buses de hidrógeno se mantiene relativamente estable, lo cual es una diferencia respecto a los buses diésel y eléctricos, cuyos costos de mantención se han observado incrementan en el tiempo (NREL, 2021a).

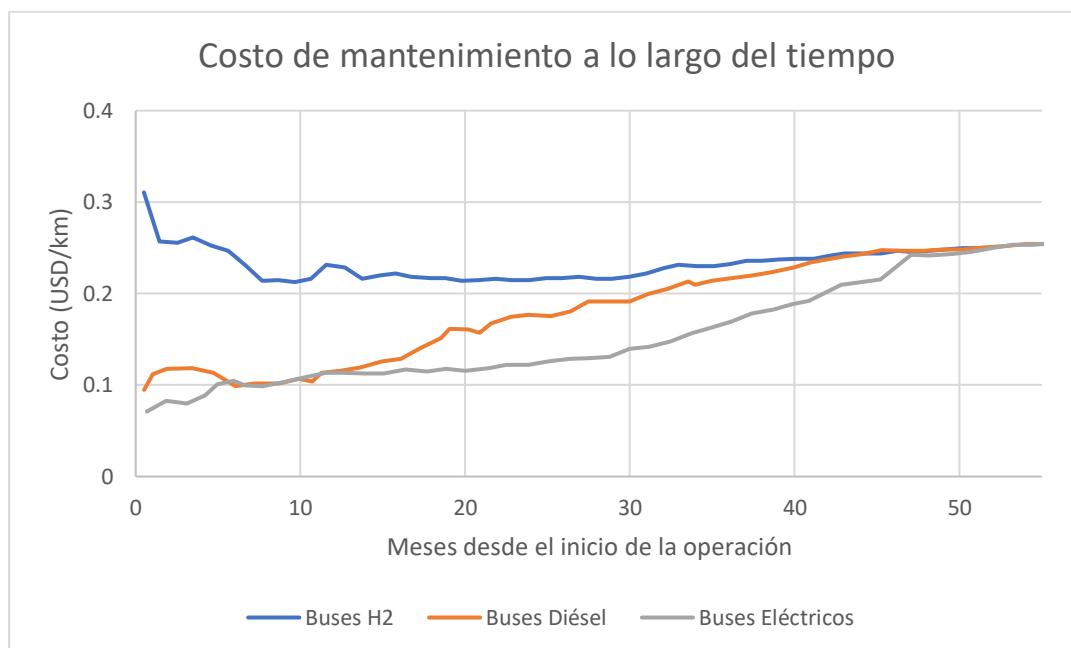


Figura 32: Costos de mantención en el tiempo de buses de hidrógeno (Basado en NREL, 2021a)

5.6 Infraestructura

Para la implementación de buses de hidrógeno en cualquier contexto se requiere de infraestructura que pueda soportar esta tecnología, desde talleres de mantención hasta estaciones de recarga de hidrógeno. En particular estas últimas representan el costo de capital más importante en términos de infraestructura, ya que, por ejemplo, en las 111 estaciones de hidrógeno planificadas en Estados Unidos la media de costo es de US\$1,9 millones de dólares con una capacidad de 1.500 kg-H₂/día con diseños pensados para suministrar hidrógeno a 700 bar (DOE, 2020).



Figura 33: Estación de recarga de hidrógeno (DOE, 2017)

En general, las estaciones de recarga de hidrógeno corresponden a estructuras fijas las cuales pueden ser abastecidas de múltiples maneras, lo cual también determinará los componentes requeridos en la estación. Las estaciones podrían, por ejemplo, estar conectadas mediante hidrodutos⁷ lo cual requeriría de algún sistema de almacenamiento en la estación y posteriores compresores, unidades de refrigeración y el sistema de dispensado propiamente tal. Otra posibilidad consiste en utilizar camiones *tube trailer*, en donde un camión transporta la carga de hidrógeno hacia la estación y posteriormente el mismo trailer podría servir como un sistema de almacenamiento, evitando así generar un sistema de almacenamiento adicional como lo era en el caso anterior. La elección del diseño apropiado para una infraestructura definitiva estará en función, por ejemplo, de la cantidad de hidrógeno que se deberá abastecer diariamente, la proximidad con un centro de producción, presión de dispensado, entre otras variables.

⁷ El hidroduto es un medio de transporte del hidrógeno mediante tuberías.

Dada la incertidumbre asociada a los requerimientos futuros que tendrá una estación de carga fija, una buena alternativa para el desarrollo de proyectos piloto corresponde a estaciones de recarga móviles, en donde el sistema de dispensado puede ser transportado entre distintos puntos, requiriendo aproximadamente 7 días para estar en completo funcionamiento desde el día de llegada a su destino (Air Products). La movilidad que provee este tipo de sistemas permite, por ejemplo, en el caso de un bus, que este sea probado en distintos recorridos sin que el bus se tenga que desplazar a una estación fija para ser cargado, sino que la estación de dispensado puede ser ubicada en algún punto cercano.



Figura 34: Estación de recarga móvil (Air Products)

5.7 Capacidades y competencias

Uno de los aspectos relevantes dentro de la implementación de buses de hidrógeno, tal como requeriría el despliegue de cualquier nueva tecnología, es el desarrollo de capacidades y competencias. En el caso de los buses, una experiencia similar ocurrió en la implementación de buses eléctricos de batería, en donde, por ejemplo, todos los conductores debieron ser capacitados para manejar un bus eléctrico, lo cual les entregó una aprobación para conducir estos buses, lo cual es requerido en la operación actual.

En el caso del proyecto actual, se considera una estructura similar a la cual operan los buses eléctricos de batería en la actualidad. Para este proyecto se considerará que una empresa externa será quien provea el hidrógeno, en conjunto con la infraestructura de almacenamiento y de carga requerida en el terminal de buses. Por lo tanto, los actores a considerar en este proyecto son.

- **Operador hidrolinera⁸:** Es quien se encarga de la carga de los buses, es decir, de conectar la manguera de la hidrolinera al bus. En la actualidad, en el caso de los buses eléctricos de batería, existe una persona con dedicación exclusiva asociada a la carga de los buses, lo cual sería similar que el caso del hidrógeno.

Funciones	Competencias esperadas	Competencias adicionales
<ul style="list-style-type: none"> • Abastecer combustible • Detectar errores de funcionamiento • Reaccionar a emergencias • Inspeccionar las instalaciones al recibir el turno 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender instrucciones de carga • Comprender protocolos de acción ante emergencias • Recordar secuencias de operación 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender fallas asociadas a un accidente de hidrógeno y realizar procedimientos de emergencia • Comprender las propiedades del hidrógeno

- **Conductor**

Funciones	Competencias esperadas	Competencias adicionales
<ul style="list-style-type: none"> • Conducir • Detectar errores de funcionamiento • Reaccionar a emergencias • Avisar y describir fallas de funcionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender instrucciones de seguridad • Comprender protocolos de acción ante emergencias • Recordar secuencias de operación • Aplicar conocimiento específico para resolver problemas 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender rendimiento e indicadores de los sistemas fuel cell • Comprender sistemas de alertas del sistema de hidrógeno • Evaluar situaciones de riesgo del hidrógeno

⁸ Se denomina hidrolinera al sistema el cual permite abastecer de hidrógeno a un equipo, en este caso, un bus.

- **Operarios de mantención del bus**

Funciones	Competencias esperadas	Competencias adicionales
<ul style="list-style-type: none"> • Seguir protocolos de seguridad • Detectar fallas de funcionamiento • Reemplazar partes y piezas defectuosas • Realizar inspecciones periódicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender sistemas del bus • Comprender protocolos de seguridad • Aplicar conocimiento específico para resolver problemas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar protocolos de seguridad para el hidrógeno • Comprender los sistemas de evacuación de hidrógeno del bus • Comprender los sistemas de hidrógeno del bus • Comprender las propiedades del hidrógeno

6. Conclusiones

En el presente informe se demostró la factibilidad técnica de la implementación de buses de hidrógeno en el Sistema de Transporte Público Metropolitano RED, específicamente en el recorrido 506, 424 y 104. El primero de estos recorridos posee una distancia total de aproximadamente 70 kilómetros, mientras que los otros dos abarcan una distancia total cercana a los 38 kilómetros. Adicionalmente, el primer recorrido posee un mayor diferencial de cotas de elevación, la cual es cercana a los 350 metros, mientras que en los otros dos recorridos es menor a 100 metros.

Uno de los elementos relevantes del presente estudio es que se mostró que en la actualidad existe oferta comercial por parte de los proveedores de buses de hidrógeno que cumple con los requerimientos asociados a potencia y autonomía requerida para que sean implementados en la ciudad de Santiago, esto sin considerar, además, que los proveedores de buses tienen capacidad para modificar técnicamente su oferta para cumplir con los requerimientos del cliente.

Dada la oferta comercial actual existen rutas donde hay un mayor rango de buses disponibles para ser implementados sin que estos afecten la velocidad media del recorrido, ya que, en ciertas rutas, como la 506, debido a la pendiente en algunos puntos del recorrido se ve limitada la oferta considerando como objetivo principal no afectar la velocidad media del recorrido. Esto no ocurre en recorridos como el 424 y el 104 ya que la pendiente es menor respecto al recorrido de Maipú a Peñalolén realizado por el servicio 506.

La implementación de buses de hidrógeno -en la gran mayoría de los casos- no afecta a la velocidad media del recorrido. Lo anterior se explica porque la potencia de los motores eléctricos de los buses de hidrógeno disponibles comercialmente superan los requerimientos de potencia del recorrido, la velocidad a la cual se desplazarían los buses de hidrógeno será similar respecto a la velocidad actual, no afectando así la velocidad media del servicio.

Recorridos con una gran demanda energética debido a su distancia como también a su pendiente, tal como es el caso del servicio 506, generan que los requerimientos de hidrógeno alcancen los 9 kg. En el caso del recorrido 424 y 104 los consumos de hidrógeno son cercanos a 2 kg, lo cual podría ser favorable en la implementación de un piloto, ya que se reducen considerablemente las cantidades de hidrógeno requeridas.

Al comparar los buses de hidrógeno respecto a los buses eléctricos de batería, los primeros poseen una ventaja en términos de tiempo en ruta, ya que los buses de hidrógeno tardan entre 10 a 20 minutos en ser cargados por completo, no así los buses eléctricos de batería, los cuales pueden tomar entre 2 a 3 horas, dependiendo del estado de carga. Lo anterior genera que los buses de hidrógeno puedan estar disponibles hasta un 28% más tiempo que los buses eléctricos de batería.

A pesar de lo anterior, la elección entre buses eléctricos de batería y buses de hidrógeno no es trivial y es probable que la elección de uno u otro esté determinada por las características del recorrido mismo, por lo que finalmente este segmento será compartido. Estudios posteriores podrían analizar cuáles deben ser las condiciones en donde se hace preferente un tipo de bus por sobre otro.

Finalmente, se sugiere que estudios futuros analicen el efecto que podría tener la implementación de una flota de buses de hidrógeno en la ciudad, especialmente debido a que una mayor disponibilidad de estos buses, explicada principalmente por sus menores tiempos de carga al comparar con buses eléctricos de batería, podría permitir una reducción en la flota total de buses requeridos para el servicio.

7. Bibliografía

- [1] Ansarey, M., Shariat Panahi, M., Ziarati, H., & Mahjoob, M. (2014). Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming. *Journal of Power Sources*, 250, 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.145>
- [2] Arfa, E. (2020). *Traction Motor for a Battery Electric City Bus*. Recuperado del sitio de Internet de Chalmers University of Technology, Departamento de Ingeniería Eléctrica: https://research.chalmers.se/publication/524620/file/524620_Fulltext.pdf
- [3] Bayındırlı, C. (2019). Drag reduction of a bus model by passive flow canal. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 24–30. <https://doi.org/10.31593/ijeat.533745>
- [4] Bi, Z., Song, L., de Kleine, R., Mi, C. C., & Keoleian, G. A. (2015). Plug-in vs. Wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Applied Energy*, 146, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.031>
- [5] BYD. (s.f.). *Cómo funcionan nuestros nuevos buses eléctricos*. Recuperado de: <http://www.bydchile.com/images/K9FE.pdf>
- [6] Chung, E., Hopton, A., & Reid, T. (2020, 2 de diciembre). What cities can learn from the biggest battery-powered electric bus fleet in North America. *CBC*. Recuperado de: <http://www.cbc.ca>
- [7] Chechilnitzky, A. (2019, 22 de febrero). Los buses “oruga” son los más contaminantes del Transantiago. *La Tercera*. Recuperado de <http://www.latercera.com>
- [8] Chile. Ministerio de Energía. (2020). *Estrategia nacional de hidrógeno verde*. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/h2/Estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>
- [9] Cipollone, R., di Battista, D., Marchionni, M., & Villante, C. (2014). Model based Design and Optimization of a Fuel Cell Electric Vehicle. *Energy Procedia*, 45, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.009>
- [10] CMM Chile. (2020). *Zebra Zero Emission Bus rapid-deployment accelerator: From pilots to scale. Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile*. Recuperado de: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf>
- [11] Deloitte. (2020). *Fueling the Future of Mobility: Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*. Recuperado de:



<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

[12] Dominguez, R., Solano, J., & Jacome, A. (2018). Sizing of Fuel Cell - Ultracapacitors Hybrid Electric Vehicles Based on the Energy Management Strategy. *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Published. <https://doi.org/10.1109/vppc.2018.8605018>

[13] Estados Unidos. Departamento de Energía. (2020). *Hydrogen Fueling Stations Cost*. Recuperado de: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf>

[14] Feng, X., Lewis, M., & Hearn, C. (2017). Modeling and validation for zero emission buses. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. <https://doi.org/10.1109/itec.2017.7993321>

[15] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. (2019). *Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe*. Recuperado de: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF

[16] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. (2017). *New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots: Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bys Refuelling*. Recuperado de: http://newbusfuel.eu/wp-content/uploads/2015/09/NBF_GuidanceDoc_download.pdf

[17] Gao, D., Jin, Z., Zhang, J., Li, J., & Ouyang, M. (2016). Comparative study of two different powertrains for a fuel cell hybrid bus. *Journal of Power Sources*, 319, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.046>

[18] Keolis. (2020). *Hydrogen buses on the Veluwe*. Recuperado de: https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf

[19] Khanipour, A., Ebrahimi, K., & Seale, W. (2007). Conventional Design and Simulation of an Urban Hybrid Bus. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 4, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 1(4), 146 - 152. doi.org/10.5281/zenodo.1074900

[20] NREL. (2021a). *Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2020*. Recuperado de: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/75583.pdf>

[21] NREL. (2021b). *Orange County Transportation Authority Fuel Cell Electric Bus Progress Report*. Recuperado de: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78250.pdf>

- [22] NREL. (2021c). *SunLine Transit Agency Fuel Cell Electric Bus Progress Report*. Recuperado de: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78078.pdf>
- [23] Van Hool. (2018). *Fuel cell Electric Bus: It works and it's ready!*. Recuperado de: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/7_presentation_van_hool.pdf
- [24] University of Washington. (s.f). *What is lithium-ion battery and how does it work?*. Recuperado de: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>
- [25] Zhang, Y., Yuan, W., Fu, R., & Wang, C. (2019). Design of an Energy-Saving Driving Strategy for Electric Buses. *IEEE Access*, 7, 157693–157706. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2950390>



Anexo

FECHATRA	IDARCO	Partida o FI	SECPUNTO	SENARCO	PPU	VELPPU	DSTPPU	IDSERVICIO	SENTIDO	IDOPERAD	ROT_COD	TPOPPU	NROPLAZA	MEDHORASERV	FRANJASERV	DIATRANS	TIPODIA	HORAINISERV	FRANJAINISERV	IDRUTA	IDPO
28/06/2021	171.908	0	4	-1	FLXW-18	0	0	67	R	570	T506 00R	0	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:52:12	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	175.330	0	2	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	4	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	67.079	0	2	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	1	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	67.105	0	0	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	8	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	166.264	0	3	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	7	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	64.162	0	2	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	5	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	64.167	0	2	-1	GCBC-95	60	0	67	R	570	T506 00R	5	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	79.403	0	1	1	GCBC-80	17	0	67	I	570	T506 00I	12	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:15	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	79.324	0	3	1	GCBC-80	17	0	67	I	570	T506 00I	18	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:15	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.527	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	3	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.501	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	4	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.473	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	3	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.448	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	1	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.446	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	2	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.427	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	2	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.419	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	4	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.390	0	0	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	4	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.358	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	5	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.331	0	1	1	GCBD-55	35	0	67	I	570	T506 00I	1	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	64.167	0	2	-1	GCBC-95	56	0	67	R	570	T506 00R	0	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	64.205	0	2	-1	GCBC-95	56	0	67	R	570	T506 00R	30	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:45	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082
28/06/2021	79.324	0	0	1	GCBC-80	16	0	67	I	570	T506 00I	9	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:15	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	79.183	0	2	1	GCBC-80	16	0	67	I	570	T506 00I	12	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:15	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	173.552	0	1	1	GCBC-80	16	0	67	I	570	T506 00I	9	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:33:15	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.331	0	1	1	GCBD-55	29	0	67	I	570	T506 00I	4	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.306	0	1	1	GCBD-55	29	0	67	I	570	T506 00I	6	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.282	0	2	1	GCBD-55	29	0	67	I	570	T506 00I	18	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	109.167	0	2	1	GCBD-55	29	0	67	I	570	T506 00I	2	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:48:48	01-01-2000 01:00:00	38.080	7.082
28/06/2021	171.906	0	2	-1	FLXW-18	46	0	67	R	570	T506 00R	15	81	06-28-2021 09:30:00	01-01-2000 05:30:00	lunes	4	06-28-2021 05:52:12	01-01-2000 01:00:00	38.081	7.082

Anexo 1: Información provista por Ministerio de Transportes