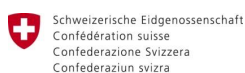




EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA IMPLEMENTACIÓN FLOTA DE BUSES DE HIDRÓGENO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE METROPOLITANO RED



Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact

Evaluación Técnico-Económica Implementación Flota de Buses de Hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano RED

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 2) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico – Swisscontact

El presente documento es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Elaborado por:

Unidad de Tecnologías del Hidrógeno – Pontificia Universidad Católica de Chile

Revisado y complementado por:

Franco Fuentes

Coordinador Local CALAC+

Andrés Díaz Barreto

Coordinador Transporte Urbano CALAC+

Adrián Montalvo Balarezo

Director Programa CALAC+

Foto de portada: Banco de Fotos Santiago de Chile / Estación de Buses

– Programa CALAC+

Edición Diciembre 2022.

LOS TEXTOS PUEDEN SER MENCIONADOS TOTAL O PARCIALMENTE CITANDO LA FUENTE

Tabla de contenido

GLOSARIO	6
1. OBJETIVO DEL TRABAJO	7
2. ANTECEDENTES GENERALES	10
2.1 ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO?	10
2.2 USO DE HIDRÓGENO PARA BUSES	12
2.3 CADENA DE VALOR PARA REPOSTAJE DE BUSES A HIDRÓGENO.....	18
3. METODOLOGÍA.....	28
4. LEVANTAMIENTO DE OFERTA COMERCIAL BUSES DE HIDRÓGENO.....	36
5. DETERMINACIÓN DE RUTAS PARA ANÁLISIS	40
6. RESULTADOS	55
6.1 CONSUMO DE HIDRÓGENO.....	55
6.2 RENDIMIENTO	57
6.3 AUTONOMÍA.....	59
6.4 TIEMPO DE CARGA.....	60
6.5 CONSUMO DE HIDRÓGENO DIARIO PARA LA FLOTA	62
6.5.1 <i>Resumen consumos de hidrógeno diario</i>	67
6.6 INFRAESTRUCTURA	69
6.7 REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	72
6.7.1 <i>Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero</i>	73
6.7.2 <i>Reducción de emisiones de ruido</i>	78
7. ELECCIÓN DE RUTA PARA IMPLEMENTACIÓN PILOTO	84
7.1 MODELO DE PRIORIZACIÓN	84
7.2 RESUMEN RESULTADOS MODELO DE PRIORIZACIÓN	94
7.3 CONFIGURACIÓN PARA RUTA ESCOGIDA	98
8. RECOMENDACIONES	103
9. CONCLUSIONES	105
10. BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXO	111

Figuras

FIGURA 1: COMPARACIÓN TCO BUSES [2]	8
FIGURA 2: CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE HIDRÓGENO (ELABORACIÓN PROPIA).....	11
FIGURA 3: HORAS DE OPERACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN BUSES [10]	14
FIGURA 4: DISPONIBILIDAD BUSES DE HIDRÓGENO [10]	15
FIGURA 5: RAZONES DE INDISPONIBILIDAD BUSES DE HIDRÓGENO [10]	15
FIGURA 6: COSTO DE MANTENCIÓN DE BUSES SEGÚN TIPO [10]	16
FIGURA 7: COSTO DE MANTENCIÓN BUSES SEGÚN PARTES [10]	16
FIGURA 8: COSTO DE MANTENIMIENTO BUSES A LO LARGO DEL TIEMPO [10]	18
FIGURA 9: DIAGRAMA EQUIPOS PRINCIPALES SISTEMA DE HIDRÓGENO (ELABORACIÓN PROPIA)	19
FIGURA 10: CAMIÓN TUBE TRAILER.....	22
FIGURA 11: ELECTROLIZADOR PEM MODELO NEL MC250 [12]	23
FIGURA 12: H2STATION - NEL [14].....	25
FIGURA 13: TANQUE DE ALMACENAMIENTO NEL SS001 [15]	26
FIGURA 14: DISPENSADOR DE HIDRÓGENO NEL [16]	27
FIGURA 15: CURVA EFICIENCIA CELDA DE COMBUSTIBLE [18].....	31
FIGURA 16: CONTROL DE POTENCIA DEL SISTEMA DUAL [19]	32
FIGURA 17: PRECIOS OBSERVADOS BUSES DE HIDRÓGENO [10].....	38
FIGURA 18: RECORRIDOS 203, 210, 216, G04, 301.....	42
FIGURA 19: RECORRIDOS I09, I18, 107, 428, 407.....	43
FIGURA 20: RECORRIDOS 502, I11, 504, 516, C01	44
FIGURA 21: RECORRIDOS C06, C03, 108, 405, 712.....	45
FIGURA 22: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 203.....	47
FIGURA 23: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 210.....	47
FIGURA 24: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 216.....	48
FIGURA 25: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO G04	48
FIGURA 26: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 301.....	49
FIGURA 27: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO I09.....	49
FIGURA 28: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO I11.....	49
FIGURA 29: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO I18.....	50
FIGURA 30: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 428.....	50
FIGURA 31: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 107.....	50
FIGURA 32: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 502.....	51
FIGURA 33: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 504.....	51
FIGURA 34: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 516.....	51
FIGURA 35: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 407.....	52
FIGURA 36: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO C01	52
FIGURA 37: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO C03	52
FIGURA 38: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO C06	53
FIGURA 39: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 108.....	53
FIGURA 40: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 712.....	53
FIGURA 41: PERFIL DE ELEVACIÓN RECORRIDO 405.....	54
FIGURA 42: PRODUCCIÓN SOLAR DE ENERGÍA EN PUDAHUEL [33]	70

FIGURA 43: EMISIONES POR TECNOLOGÍA Y FUENTE ENERGÉTICA (G-CO ₂ E/KM) (ELABORACIÓN PROPIA).....	78
FIGURA 44: PRESIÓN SONORA MEDIDA A 7,5 METROS EN BUSES DIÉSEL Y BUSES DE HIDRÓGENO [39]	79
FIGURA 45: MAPA DE RUIDO DEL GRAN SANTIAGO DIURNO [42].....	81
FIGURA 46: MAPA DE RUIDO DEL GRAN SANTIAGO NOCTURNO [42]	82
FIGURA 47: ZONAS DE INTERÉS	88
FIGURA 48: ZONA DE INTERÉS - SANTIAGO CENTRO	89
FIGURA 49: ZONA DE INTERÉS - LA CISTERNA.....	90
FIGURA 50: PUNTAJE PONDERADO MODELO DE PRIORIZACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	96
FIGURA 51: ELECTROLIZADOR HYLYZER 1000.....	99
FIGURA 52: CONFIGURACIÓN SISTEMA TERMINAL DE BUSES DUCAUD	100
FIGURA 53: COMPARACIÓN PRODUCCIÓN ON-SITE Y OFF-SITE DE HIDRÓGENO (ELABORACIÓN PROPIA)	102

Tablas

TABLA 1: OFERTA COMERCIAL DE ELECTROLIZADORES	24
TABLA 2: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	33
TABLA 3: LEVANTAMIENTO DISPONIBILIDAD COMERCIAL BUSES DE HIDRÓGENO	37
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS BUSES SELECCIONADOS A ESTUDIAR.....	39
TABLA 5: RESUMEN 20 RUTAS SELECCIONADAS	41
TABLA 6: PROPIEDADES RELEVANTES DE LAS 20 RUTAS A ESTUDIAR	46
TABLA 7: CONSUMO DE HIDRÓGENO	56
TABLA 8: RENDIMIENTO BUSES A HIDRÓGENO CADA 100 KILÓMETROS	57
TABLA 9: RENDIMIENTO BUSES A HIDRÓGENO CADA 100 KILÓMETROS POR CAPACIDAD NOMINAL DE PASAJEROS	58
TABLA 10: AUTONOMÍA BUSES A HIDRÓGENO.....	59
TABLA 11: TIEMPOS DE CARGA PARA BUSES A HIDRÓGENO VELOCIDAD 30 G/S	60
TABLA 12: TIEMPOS DE CARGA PARA BUSES A HIDRÓGENO VELOCIDAD 60 G/S.....	61
TABLA 13: TIEMPOS DE CARGA PARA BUSES A HIDRÓGENO VELOCIDAD 120 G/S.....	62
TABLA 14: SALIDA DE BUSES DÍAS LABORALES, SÁBADO Y DOMINGO EN RECORRIDOS A ESTUDIAR	63
TABLA 15: CONSUMOS TOTALES POR RECORRIDO CON BUS NEW FLYER XCELSIOR CHARGE H2 DE 12,5 METROS.....	64
TABLA 16: CONSUMOS TOTALES POR RECORRIDO CON BUS NEW FLYER XCELSIOR CHARGE H2 DE 18,5 METROS.....	65
TABLA 17: CONSUMOS TOTALES POR RECORRIDO CON BUS FOTON DE 12,5 METROS.....	66
TABLA 18: CONSUMOS TOTALES POR RECORRIDO CON BUS VAN HOOL A330 DE 13,1 METROS	67
TABLA 19: CONSOLIDADO CONSUMOS DE HIDRÓGENO DIARIO	68
TABLA 20: DIMENSIONAMIENTO ELECTROLIZADOR PARA EL CASO SOLAR Y SUMINISTRO CONSTANTE	72
TABLA 21: PROPORCIÓN DE BUSES POR RECORRIDO	74
TABLA 22: DISTANCIA RECORRIDO POR LOS SERVICIOS ANALIZADOS EN UNA SEMANA.....	74
TABLA 23: FACTOR DE EMISIÓN PARA BUSES EURO VI	75
TABLA 24: EMISIONES POR COMBUSTIÓN POR SERVICIO.....	76
TABLA 25: FACTOR DE EMISIÓN BUSES ELÉCTRICO A BATERÍA	77
TABLA 26: EMISIONES BUSES A HIDRÓGENO	77
TABLA 27: REDUCCIÓN DE RUIDO	83
TABLA 28: PUNTAJE EMISIONES CO ₂ E	86

TABLA 29: PUNTAJE TRANSACCIONES.....	87
TABLA 30: PUNTAJE RECORRIDO ZONA DE INTERÉS.....	91
TABLA 31: PUNTAJE POTENCIAL ESCALAMIENTO	92
TABLA 32: PESO VARIABLES MODELO PRIORIZACIÓN.....	93
TABLA 33: RESULTADOS MODELO DE PRIORIZACIÓN	95
TABLA 34: PORCENTAJE DE TIEMPO DE REQUERIMIENTO MAYOR AL DEL PERFIL DE CONDUCCIÓN	98
TABLA 35: CONSUMOS HIDRÓGENO RECORRIDO 301.....	98

Glosario

BEV: Vehículo eléctrico a batería (en inglés *Battery Electric Vehicle*)

CCS: Sistema de captura de carbono (en inglés *Carbon Capture System*)

FCV: Vehículo eléctrico a hidrógeno (en inglés *Fuel Cell Vehicle*)

ICE: Vehículo a combustión interna (en inglés *Internal Combustion Engine*)

LCOH: Costo nivelado del hidrógeno (en inglés *Levelised Cost of Hydrogen*)

N: Newton (unidad de fuerza)

PEM: Electrolizadores de membrana polimérica

PPA: Acuerdo de compra de energía (en inglés *Power Purchase Agreement*)

SoC: Estado de carga (en inglés *State of Charge*)

TCO: Costo total de propiedad (en inglés *Total Cost of Ownership*)

1. Objetivo del trabajo

El calentamiento global es una situación que está afectando a la gran mayoría de países, en donde ya se han podido observar algunos efectos, tal como prolongados periodos de sequía o temperaturas cada vez más extremas. El principal factor asociado al calentamiento global se debe al aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, el cual genera que más calor quede atrapado dentro de la atmósfera terrestre [1]. Estas emisiones están principalmente ligadas con la quema de combustibles fósiles tal como el carbón, petróleo y gas.

Chile cuenta con metas asociadas a la descarbonización del sector de transporte, el cual es uno de los más relevantes en términos de emisiones. Para esto, distintas alternativas se han planteado, desde el uso de vehículos eléctricos a batería, biocombustibles, y recientemente, el hidrógeno.

El hidrógeno tiene áreas donde se presenta atractivo debido a sus características, dentro de las cuales se encuentran los camiones mineros (CAEX), camiones de ruta y buses. En particular, el caso de buses a diferencia de los otros dos es que 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.

La aplicación hidrógeno verde en buses, mediante el uso de celdas de combustible, no tan solo es interesante debido a que se podría sumar como alternativa en conjunto a los buses eléctricos a batería para 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 (FCV) con los buses de combustión interna (ICE) se alcance el año 2026, mientras que respecto a los buses eléctricos a batería (BEV) se espera que esto suceda el año 2027 [2], siendo uno de los primeros sectores en alcanzar el punto de inflexión entre los distintos tipos de tecnologías.

Eventualmente en el futuro el sector de transporte estará compartido entre tecnologías del hidrógeno como también en sistemas eléctricos a batería, ya que dependiendo de las

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

condiciones de operación es que se preferirá uno por sobre otro. En general, en trayectos más largos y que se realicen de forma continua, como por ejemplo aquellos recorridos que operan 24/7, el hidrógeno tendrá ventajas respecto a los buses eléctricos a batería.

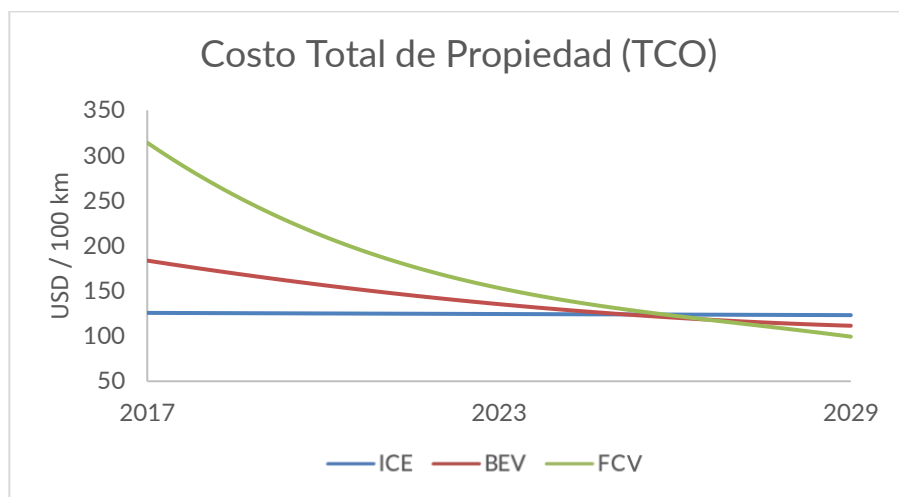


Figura 1: Comparación TCO buses [2]

Adicionalmente, a nivel nacional, el Ministerio de Energía [3] reconoce que el uso de hidrógeno en buses será una de las aplicaciones en donde el hidrógeno será 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.

El presente informe tiene como objetivo desarrollar un análisis técnico-económico para la implementación de una flota de buses a hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano de Santiago que permita identificar recorridos para operar con buses a hidrógeno. En términos específicos, este trabajo considera

- Caracterización de modelos de buses de hidrógeno disponibles en el mercado, mediante la descripción de los elementos de diseño y los costos asociados al funcionamiento de los vehículos.
- Determinación y análisis, mediante el desarrollo de una simulación, los requerimientos de consumo de hidrógeno, de energía y potencia del bus y sus sistemas auxiliares, para veinte recorridos del Sistema.

- Estimación de la variación de emisiones contaminantes que se genera al cambiar la tecnología de los buses, comparando el nivel de emisiones entre buses diésel, eléctrico a batería y buses a hidrógeno, para los veinte recorridos.
- Caracterización y dimensionamiento de la infraestructura y equipamiento necesario en los terminales de buses para el repostaje de los vehículos.
- Descripción y análisis del proceso de logística de carga de los buses en función de las características de cada una de las veinte rutas a estudiar.
- Estimación de costos operacionales y de capital para buses a hidrógeno y de la infraestructura y equipamientos requeridos en los terminales.
- Propuesta del recorrido del Sistema de Transporte Público de Santiago que presenta las mejores condiciones para implementar una flota de buses a hidrógeno.

De esta forma, el propósito de este informe es generar insumos para avanzar en la implementación de buses a hidrógeno en Chile y en Santiago, analizando distintas rutas para encontrar las mejores dada el estado del arte actual de la tecnología.

2. Antecedentes Generales

2.1 ¿Qué es el hidrógeno?

El hidrógeno es el elemento más simple de la tabla periódica y uno de los más abundantes en el planeta y el universo. 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 otros compuestos.

Una de las principales ventajas del hidrógeno es que, al ser utilizado para generar electricidad o calor, no emite CO₂, 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 aplicar. Además, otra importante ventaja del hidrógeno es que posee una alta densidad energética por unidad de masa. El hidrógeno posee un poder calorífico por unidad de masa de 120 MJ/kg, mientras que en el caso del diésel es 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 promedio de aproximadamente 0,65 MJ/kg [4], por lo cual, considerando únicamente el contenido energético, se requeriría menos peso al almacenar energía en forma de hidrógeno que en baterías².

Tal como se comentó anteriormente, el hidrógeno no se encuentra en estado puro, por lo que el método de producción del mismo será relevante, ya que en algunos casos se podrían generar más emisiones que utilizando directamente fuentes fósiles como combustible. Para identificar las distintas formas de producción de hidrógeno se ha generado una clasificación dependiendo del método, siendo los tres más relevantes el hidrógeno gris, hidrógeno azul e hidrógeno verde, las cuales pueden ser observadas en la Figura 2.

² Es importante señalar que en este análisis no se considera el tanque requerido para el almacenamiento de hidrógeno, el cual podría ser entre 10 a 100 veces más pesado que el hidrógeno que contiene, dependiendo del caso.

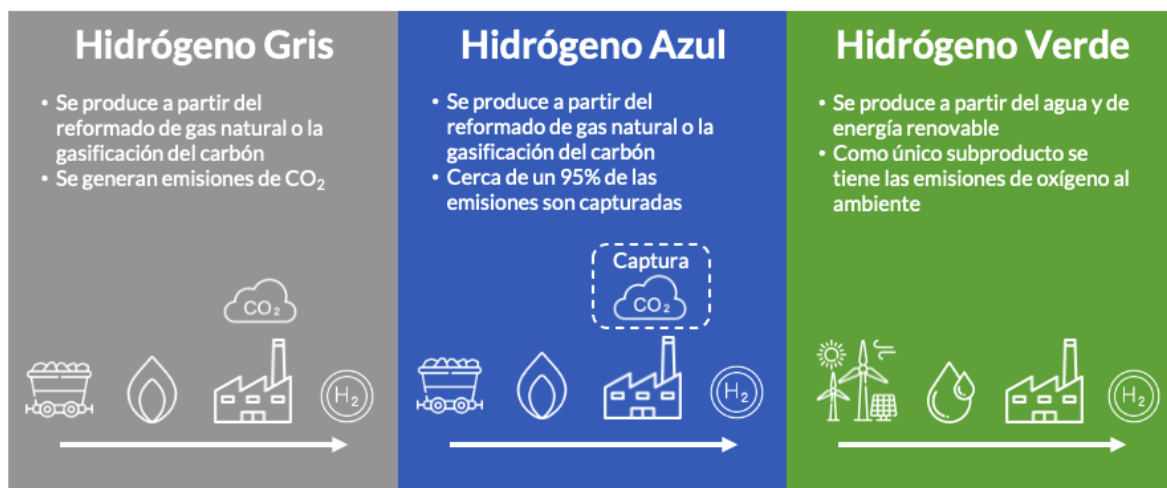


Figura 2: Clasificación de tipos de hidrógeno (Elaboración propia)

El hidrógeno gris corresponde a aquel producido mediante la gasificación del carbón o mediante el reformado de gas natural, estos mecanismos son los más utilizados actualmente para la producción de hidrógeno, ya que un 95% de este es obtenido a través de estos métodos. En el caso del reformado del gas natural, lo que se hace es extraer de este compuesto (CH₄ principalmente) el hidrógeno presente, no obstante, se generan emisiones de CO₂ al medio ambiente. Lo mismo ocurre en la gasificación del carbón, en donde se añade agua y calor al carbón para extraer el hidrógeno, obteniendo como subproducto CO₂.

El hidrógeno azul es similar al caso anterior, ya que el método de producción también se realiza mediante la gasificación del carbón o el reformado de gas natural. Sin embargo, a diferencia del hidrógeno gris, en este caso se realiza la captura del CO₂ emitido al ambiente (CCS - Carbon Capture System), permitiendo reducir así las emisiones asociadas al proceso. En promedio, un 95% de las emisiones son capaces de ser capturadas.

La forma de producción más relevante para el hidrógeno verde corresponde a aquel se genera mediante la disociación del agua (H₂O) en dos moléculas de hidrógeno y una molécula de oxígeno. Para realizar este proceso se requiere de un electrolizador, el cual es capaz de realizar esta separación y este a su vez necesita de energía eléctrica proveniente de energías renovables para su funcionamiento. A diferencia de los métodos previamente mencionados, la producción de hidrógeno verde no genera emisiones, y como único subproducto se tiene el oxígeno. El foco del presente proyecto estará puesto en el hidrógeno verde el cual es el hidrógeno en el cual Chile presenta ventajas comparativas.

2.2 Uso de hidrógeno para buses

Al analizar los usos finales de estos combustibles, el sector que más contribuye a las emisiones de CO₂ del planeta corresponde a aquel relacionado con el transporte, representando un 37% del total de las emisiones [5]. En el año 2020 se generaron 414 millones de toneladas de CO₂ relacionadas a el uso de combustibles fósiles en buses y minibuses [6].

En el caso de Chile, la situación es bastante similar. Durante el año 2018 las emisiones totales del país fueron 112 millones toneladas de dióxido de carbono, de los cuales el 25,77% provenían del sector transporte, 14,12% de las industrias manufactureras y construcción y el 30,39% de la producción de las industrias de la energía [7].

En Chile, durante el 2022, se aprobó la nueva versión de la Estrategia Nacional de Electromovilidad, que establece que a partir del año 2035 el 100% de las nuevas incorporaciones de buses al sistema de transporte público del país deben ser cero emisiones [8]. Esta meta representa un gran desafío para el país, ya que la descarbonización de este sector no es sencilla, debido a la naturaleza de la misma, en donde la operación requiere de altos consumos de energía, largos tiempo de autonomía y una operación que se da de forma continua.

Para los sectores cuyas emisiones son complejas de abatir en el último tiempo ha cobrado gran interés el uso de hidrógeno como reemplazo a los combustibles fósiles. Esto se explica principalmente por las propiedades físicas que posee, como también debido a la reducción de costos en la producción de hidrógeno de forma limpia, es decir, mediante la separación de la molécula de agua (H₂O) en hidrógeno y oxígeno, a partir de energía renovable. Estos factores podrían significar que el hidrógeno sea más competitivo que las baterías en algunas aplicaciones en movilidad, tal como en buses o camiones de ruta.

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. 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 13.000.000 km recorridos [9], 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 ejecutados a través de alianzas público-privadas, entre las que destacan los proyectos HyTransit, 3 Emotion, JIVE, entre otros.

Los buses a hidrógeno -también denominados buses *fuel cell*³- 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 el caso de los buses eléctricos a batería estos reciben la energía eléctrica a partir un sistema de baterías instalados en el equipo.

En Estados Unidos se cuenta con una amplia experiencia asociada al desarrollo de proyectos de buses a hidrógeno a partir de la cual se han levantado insumos relevantes de este tipo de proyectos a considerar si se decide implementar este tipo de tecnología. Uno de estos insumos corresponde a la durabilidad de los buses a hidrógeno.

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 de la celda de combustible. Una de las flotas más antiguas en Estados Unidos corresponde a los 8 buses de hidrógeno 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 las celdas de combustibles 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 de hidrógeno en operación en los que la mayoría ya ha sobrepasado el objetivo propuesto por el Departamento de Energía de Estados Unidos [10]. Lo anterior puede ser observado en la Figura 3. Esta situación es positiva, ya que las celdas de combustible han demostrado tener una vida útil, en términos de horas de operación, mayor a la esperada originalmente por el Departamento de Energía de Estados Unidos.

³ Una fuel cell, también conocida como celda de combustible en español, es el equipo que es capaz de transformar la energía química contenida en el hidrógeno en electricidad.

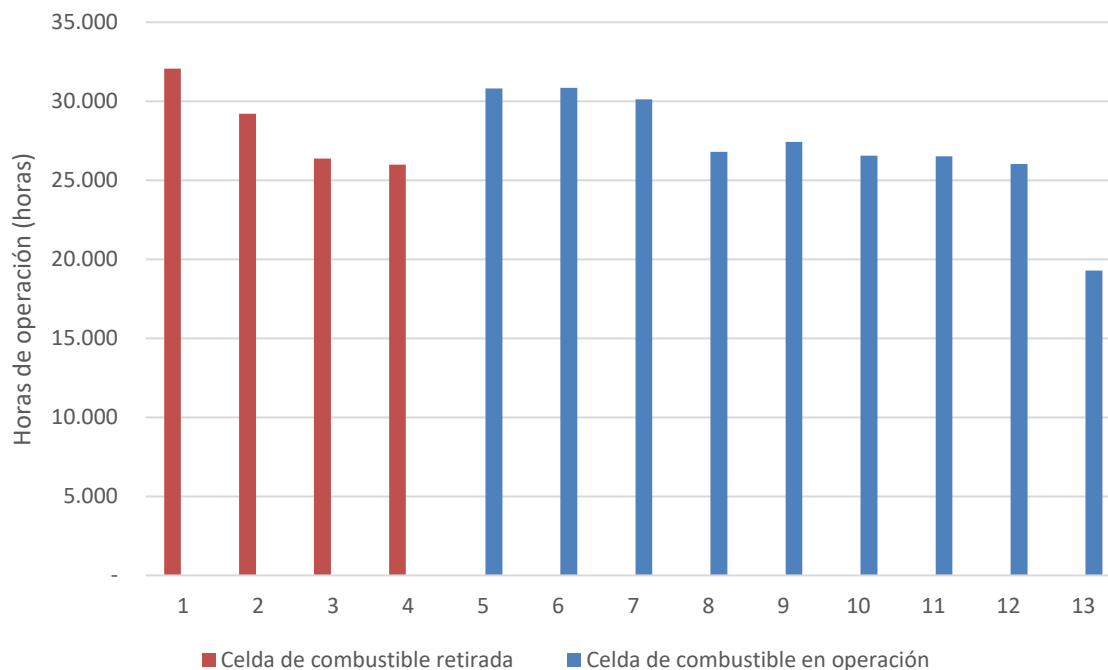


Figura 3: Horas de operación de celdas de combustible en buses [10]

Otro parámetro relevante corresponde a la disponibilidad de los buses. La disponibilidad de operación 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 de hidrógeno (celda de combustible con sus complementos para su operación) 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 [10].

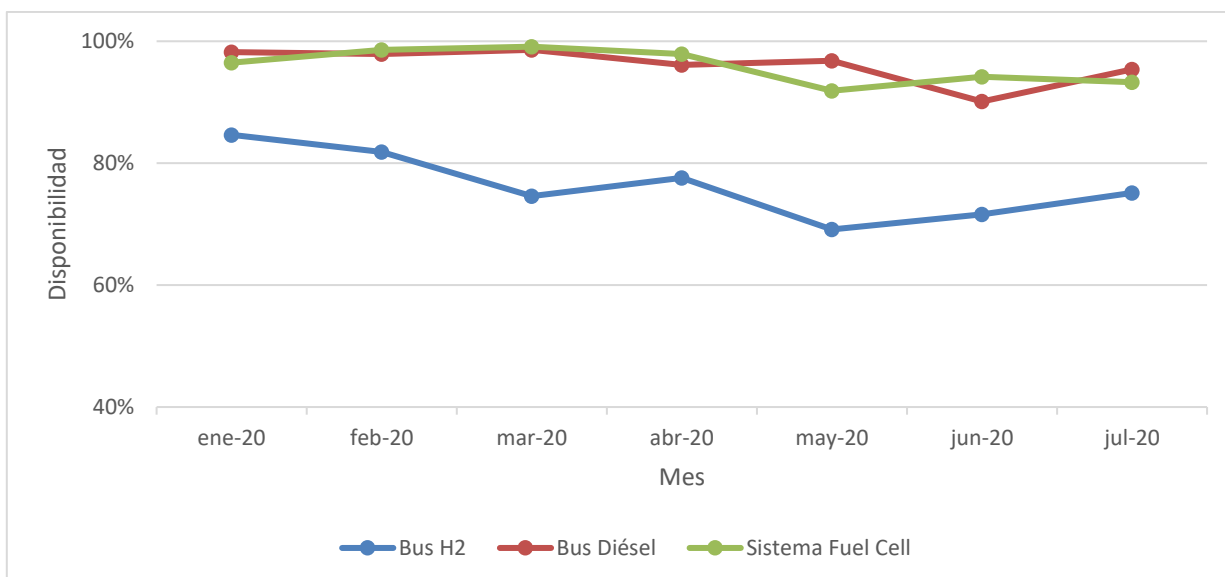


Figura 4: Disponibilidad buses de hidrógeno [10]

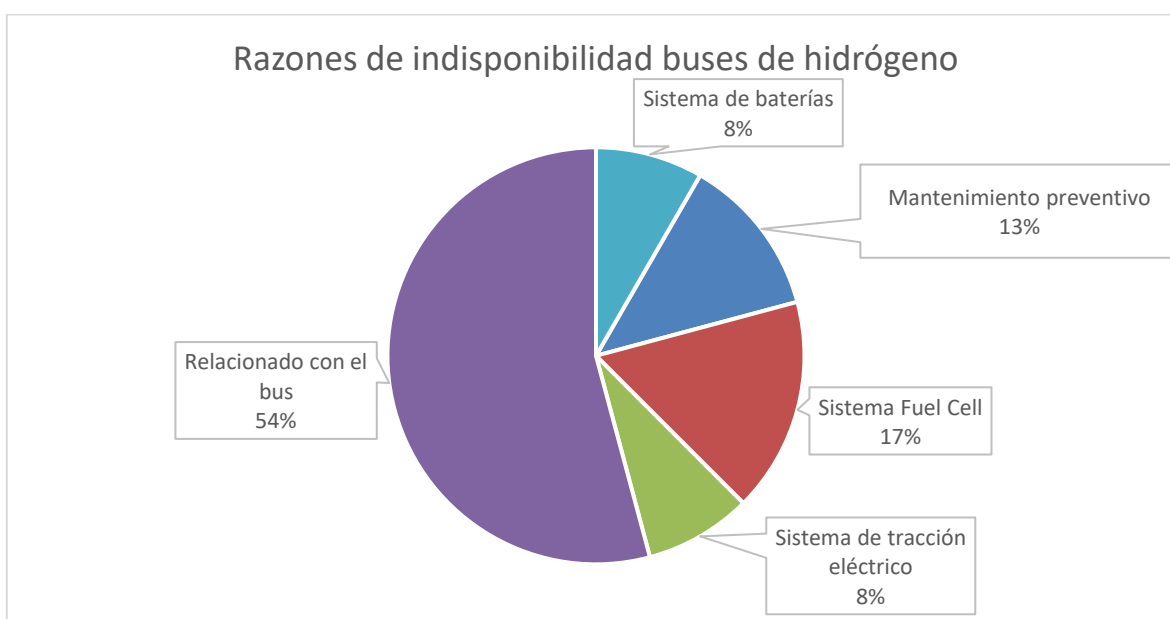


Figura 5: Razones de indisponibilidad buses de hidrógeno [10]

Es decir; el uso de hidrógeno en buses promete altas *performance* de disponibilidad mecánica a la vez que siga madurando su implementación.

Los costos de mantención de los buses de hidrógeno, observados en la Figura 6 y Figura 7, respecto a los buses diésel en la experiencia de los proyectos⁴ en Estados Unidos son

⁴ Son tres los proyectos que se incluyen en este análisis. Buses de hidrógeno en Alameda-Contra Costa Transit District en Oakland, California, Orange County Transportation Authority en Santa Ana, California, y SunLine Transit Agency en Thousand Palms, California.

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 [10]. 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.

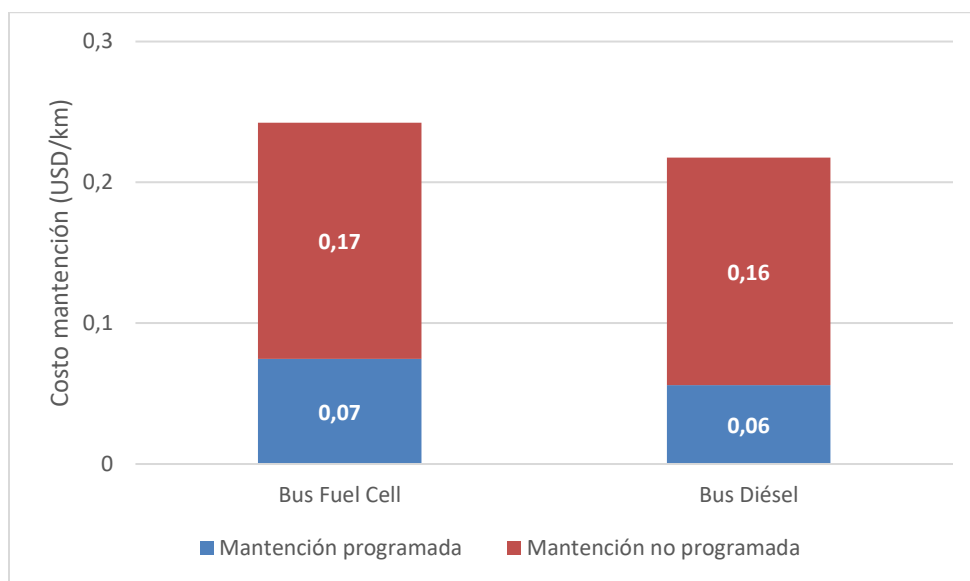


Figura 6: Costo de mantención de buses según tipo [10]

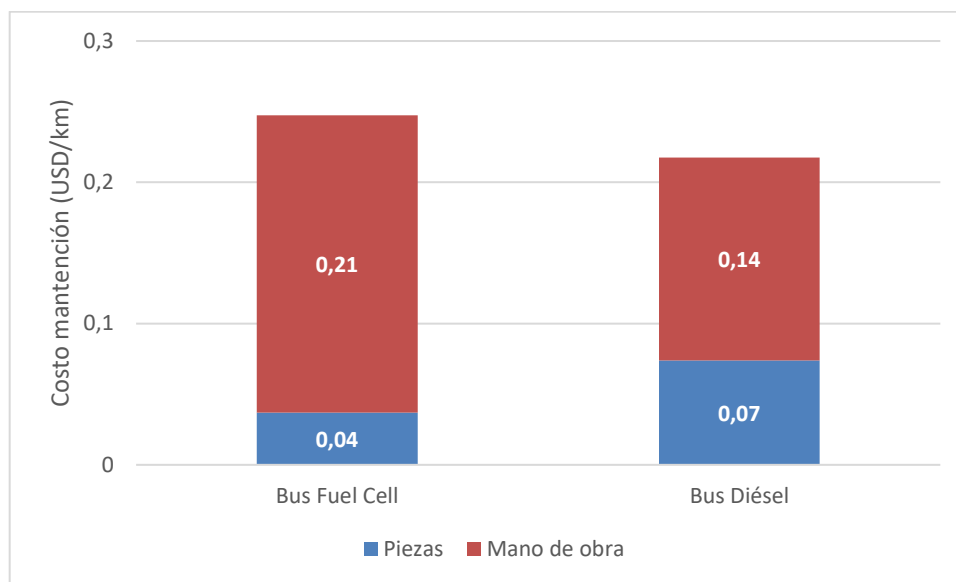


Figura 7: Costo de mantención buses según partes [10]

Tal como se puede notar, tanto la mantención programada como en la mantención no programada un bus a hidrógeno posee un costo mayor respecto a un bus diésel. Esto podría parecer contraintuitivo dado que se esperaría que un sistema que es completamente eléctrico tenga menores costos de mantención. No obstante, en este caso no ocurre así debido a que los datos obtenidos corresponden a buses en fase piloto, por lo cual ocurren distintos fenómenos que generan que los costos sean mayores.

Uno de ellos es que aún no existe un mercado amplio en donde se puedan encontrar repuestos específicos al equipo de hidrógeno, lo que genera que al compararse con un bus diésel, cuyo mercado se encuentra plenamente desarrollado, sea más costoso realizar mantenciones a un bus a hidrógeno. Por otra parte, en el caso de este piloto de forma constante se le realizaron mantenciones en el comienzo del proyecto con el objetivo de ir verificando el comportamiento de las distintas partes del equipo de hidrógeno, lo cual explica que en el total observado en la Figura 7 en el caso de los buses a hidrógeno el mayor componente provenga del personal requerido para las mantenciones, y no las partes propiamente tal.

Se espera que la tendencia en donde los costos de mantención de los buses a hidrógeno sean mayores a los buses diésel rápidamente se revierta, tal como ocurrió con los buses eléctricos a batería. En este caso, se pudo confirmar con un proveedor de vehículos de hidrógeno que el costo de mantención respecto a vehículos diésel observado por ellos en la actualidad (2022) es de un 15% menor.

Si se compara la evolución de los costos de mantención de buses de hidrógeno, eléctricos a batería 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 a batería, cuyos costos de mantención se han observado incrementan en el tiempo [10].

El aumento en el comienzo de los costos de mantención de los buses a hidrógeno respecto a las otras tecnologías se explicó anteriormente, en donde en el inicio del proyecto se realizó de forma frecuente mantención con objetivo de validar el comportamiento de los distintos componentes del equipo, lo cual se dejó de realizar en el mes 10 de haber iniciado el

proyecto. Esto genera que alrededor de ese mes el costo de mantención se mantenga de forma constante.

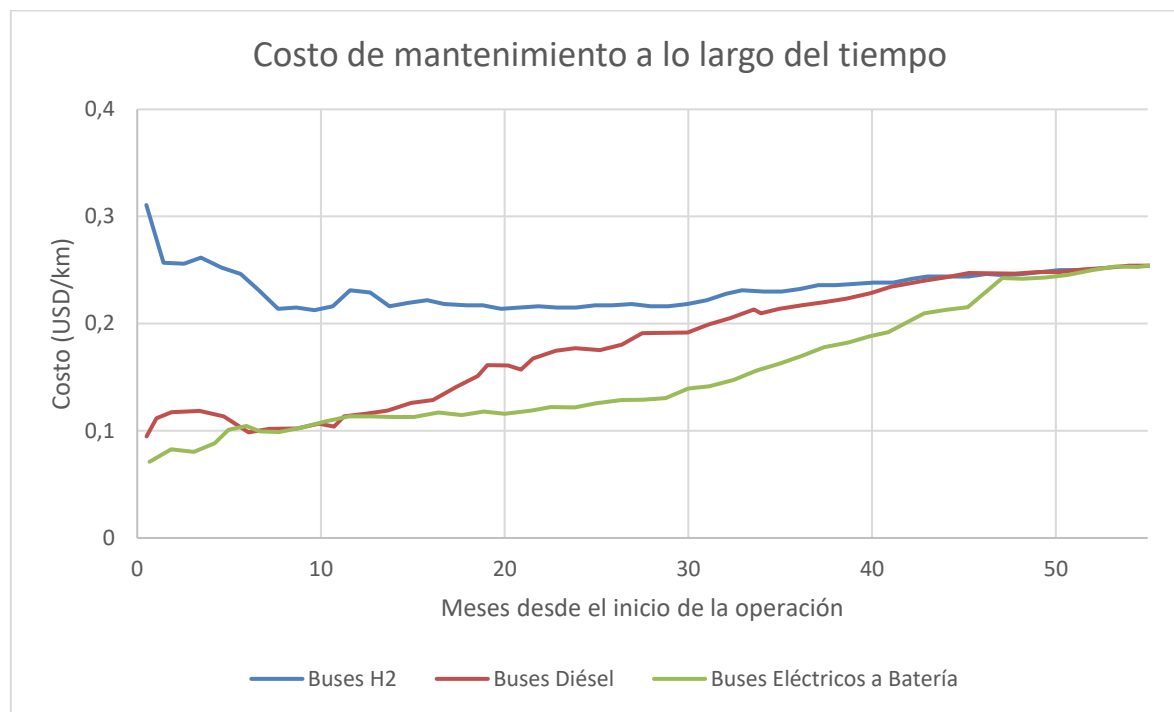


Figura 8: Costo de mantenimiento buses a lo largo del tiempo [10]

En Chile no existen desarrollos de buses a hidrógeno, no obstante, durante el 2021 la Unidad de Tecnologías del Hidrógeno de la Pontificia Universidad Católica de Chile en conjunto con el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y el Ministerio de Energía desarrollaron un estudio denominado “Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano”.

El objetivo principal de ese estudio era demostrar la factibilidad técnica de implementar un bus urbano de hidrógeno en el Sistema de Transporte. Para esto, se analizó un bus de hidrógeno en tres recorridos distintos, determinando tanto si la potencia como la energía requerida por la ruta podían ser satisfechas por los modelos de buses levantados en ese estudio.

2.3 Cadena de valor para repostaje de buses a hidrógeno

Otro de los puntos relevantes a considerar para la eventual futura implementación de esta tecnología en el caso del Sistema de Transporte Metropolitano es la infraestructura

necesaria para el repostaje de los buses a hidrógeno. Acá se describe la cadena general, más adelante se estima específicamente para los recorridos analizados de este informe.

En general, dependiendo de las características del proyecto, es posible producir el hidrógeno in situ (en el terminal de buses) o bien generar el hidrógeno centralizadamente y distribuirlo hasta el lugar de repostaje (el terminal). En cualquiera de las dos alternativas, las plantas de generación de hidrógeno mediante electrólisis poseen las etapas que se muestran en la Figura 9. En caso en que se produzca el hidrógeno de forma centralizada y se realice posteriormente el transporte se debe agregar una etapa de traslado del hidrógeno posterior a la producción del mismo.

Este diagrama considera que el hidrógeno se maneja en estado gaseoso a lo largo de la cadena de valor. Existe la posibilidad de almacenar hidrógeno en forma líquida, no obstante, debido a los altos requerimientos energéticos para llevarlo a esta forma, consultor experto del proyecto indica que los volúmenes manejados en este proyecto no son lo suficientemente grandes como para utilizar hidrógeno líquido, por lo que se descarta esta opción.

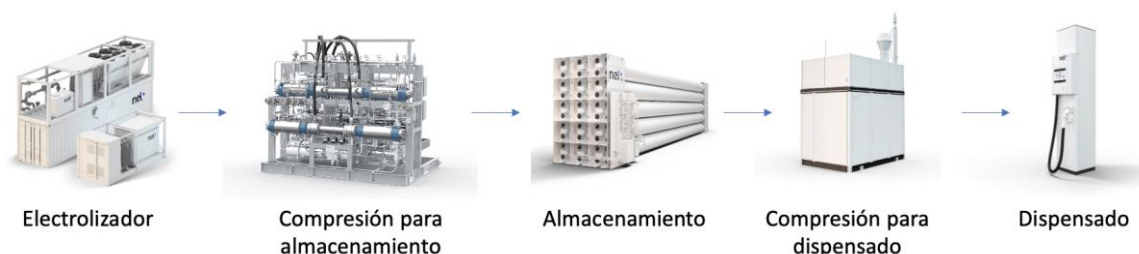


Figura 9: Diagrama equipos principales sistema de hidrógeno (Elaboración propia)

- 1. Electrolizador:** Los electrolizadores son sistemas compuestos por un *ánodo* y un *cátodo* separados por un *electrolito*. Estos sistemas utilizan electricidad para descomponer la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno a través de un proceso denominado electrólisis. Las dos principales tecnologías de electrolizadores corresponden a los tipos PEM (por su sigla en inglés membrana electrolítica de polímero) y alcalinos.

La electrólisis es una opción prometedora para la producción de hidrógeno libre de carbono a partir de recursos renovables. La electrólisis es el proceso de utilizar la electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Esta reacción tiene lugar en una unidad llamada electrolizador. El tamaño de los electrolizadores puede variar

desde equipos pequeños, del tamaño de un electrodoméstico, que son adecuados para la producción de hidrógeno distribuida a pequeña escala, hasta instalaciones de producción centralizadas a gran escala que podrían vincularse directamente a las energías renovables u otras formas de producción de electricidad que no emitan gases de efecto invernadero.

Los electrolizadores constan de un ánodo y un cátodo separados por un electrolito. Los distintos electrolizadores funcionan de manera diferente, principalmente debido al distinto tipo de material electrolítico que interviene y a las especies iónicas que conduce [11].

En la actualidad son tres las principales tecnologías de electrolizadores: electrólisis alcalina (Alkaline Electrolysis), electrolizador PEM (por su sigla en inglés Proton Exchange Membrane) y celdas de electrólisis de óxido sólido (Solide Oxide Electrolysis Cells). Los dos primeros corresponden a tecnologías ya maduras y disponibles comercialmente, mientras que la última corresponde a tecnología que aún está en desarrollo pero que presenta resultados promisorios.

Los electrolizadores alcalinos corresponden a una tecnología madura y disponible comercialmente. Ha sido utilizada desde los años 1920, en particular para la producción de hidrógeno en la industria de fertilizantes y cloro. La electrólisis alcalina se caracteriza por tener un bajo costo de capital comparada con otras tecnologías debido principalmente a que no requiere metales preciosos.

La tecnología PEM fue introducida en los años 1960 por General Electric como una alternativa a los sistemas alcalinos. Estos sistemas utilizan agua pura como solución electrolítica ya que son altamente sensibles a impurezas como cobre, hierro, cromo y sodio. Esto permite evitar la recuperación y el reciclaje de la solución de hidróxido de potasio como es el caso en los electrolizadores alcalinos. Este tipo de electrolizador es más pequeño, por lo que son potencialmente más atractivos en áreas urbanas de mayor densidad.

Los electrolizadores PEM pueden producir hidrógeno altamente comprimido para la producción y almacenamiento en sistemas descentralizados y ofrecen un funcionamiento flexible, en este sentido su rango de funcionamiento puede ir desde carga 0% hasta un 160%, es decir, el sistema puede ser sobrecargado durante un tiempo si el diseño así lo permite. No obstante, esto requiere de catalizadores de electrodos costosos (platino, iridio) y de materiales de membrana de alto valor, lo

que hace que el sistema sea más caro si se compara con un electrolizador alcalino. Adicionalmente, su vida útil es más corta, lo que hace su uso en la actualidad sea menos extenso comparativamente con los sistemas alcalinos.

La tecnología SOEC corresponde a tecnología menos desarrollada que las dos anteriores. Este tipo de electrolizadores utiliza cerámica como electrolito lo que le permite tener bajos costos de material. Este sistema opera a altas temperaturas y con un alto grado de eficiencia energética.

Los electrolizadores, sin importar su tipo, producen hidrógeno en forma gaseosa, y la gran mayoría de ellos entregan este gas a una presión de 30 bar, no obstante, existen algunos electrolizadores cuya presión de salida es de 1 bar.

El sistema de producción de hidrógeno puede ser instalado en el mismo sitio de consumo o en algún otro lugar para luego transportarlo al sitio de uso. En el caso en que se requiera de transporte de hidrógeno, esto se puede realizar mediante camiones *tube trailer* que tienen por lo general una capacidad de transporte de 350 kg-H₂ a una presión de 180 bar, por lo que acorde a los consumos de hidrógeno presentados en la sección 6 se podrían requerir múltiples camiones de estas características para transportar el hidrógeno requerido diariamente.

A menos que existan restricciones de espacios o se quiera producir hidrógeno de forma centralizada para posteriormente distribuir el mismo a distintos lugares de consumo con el objetivo de aprovechar economías de escala, se debiese optar por la producción de hidrógeno in-situ, es decir, en el mismo lugar de consumo, ya que los costos de transporte son elevados. Acorde a información entregada por consultor externo del proyecto el costo fijo de cada uno de estos camiones es de entre 100 a 120 USD por día, y además se debe incluir un costo variable asociado a la distancia de transporte de hidrógeno de 3 USD por kilómetros recorrido.



Figura 10: Camión Tube Trailer

Las dimensiones requeridas -en términos de MW- de los electrolizadores para cada uno de los recorridos está en función de la demanda de hidrógeno, lo cual será presentado en la sección siguiente. No obstante, como referencia para el espacio utilizado se muestra el modelo *Nel MC250* (Figura 11) que tiene un tamaño nominal de 1,25 MW. Este sistema de dos containers, el primero que cuenta con el sistema de producción cuyas dimensiones son de 12,2 m x 2,5 m x 3 m, y el segundo container que contiene el sistema de rectificadores y transformadores y cuyas dimensiones son de 6,1 m x 2,5 m x 2,6 m [12].

Por otra parte, el modelo *Nel MC500*, cuyo tamaño nominal es de 2,5 MW, cuenta también con dos containers, en donde el container con el sistema de producción es del mismo tamaño que el modelo de 1,25 MW, mientras que el container auxiliar es de 12,2 m x 2,5 m x 2,6 m.



Figura 11: Electrolizador PEM modelo Nel MC250 [12]

Lo anterior no incluye, por ejemplo, un tanque de almacenamiento de agua para la producción de hidrógeno o áreas de mantenimiento de equipos. *Cummins* declara que para un sistema de 2,5 MW se podrían requerir hasta 200 m² [13]. Esto no considera el almacenamiento de hidrógeno en el sitio, ya que el espacio requerido estará en función de las definiciones en términos de la operación.

Otro aspecto a considerar de los electrolizadores es que los tamaños ofrecidos en el mercado tienen crecimientos discretos, lo cual se contrapone con lo que se verá en el dimensionamiento de este equipo para los distintos recorridos, en donde los tamaños calculados no necesariamente coinciden con lo que se ofrece en el mercado. En la Tabla 1 se muestra un listado no exhaustivo de los electrolizadores ofrecidos por distintos proveedores y sus respectivos tamaños.

Proveedor	Modelo	Tamaño nominal [MW]	Producción [kg/h]
Plug Power	GenFuel	1	17
Teledyne	H2Oasis	<0,5	7

John Cockerill	DQ1000	5	89
Nel Hydrogen	MC250	1,25	22
Nel Hydrogen	AC150	0,75	13
Nel Hydrogen	AC300	1,5	26
ITM Power	HGas1SP	0,65	11
ITM Power	HGas2SP	1,25	22
Cummins	HyLYZER - 1000	5	90
Cummins	HyLYZER – 250	1,25	22
Cummins	HyLYZER – 200	1	18

Tabla 1: Oferta comercial de electrolizadores

- 2. Compresor para repostaje⁵:** Tal como se comentó anteriormente, el hidrógeno producido mediante electrólisis posee una presión de salida cercana a los 30 bar. No obstante, los buses utilizan presiones de almacenamiento de 350 bar, para disminuir el volumen requerido sobre el equipo. Además, si bien es posible almacenar el hidrógeno en el sitio a 30 bar, o inclusive a menores presiones, en la práctica esto no se realiza debido a que la baja densidad del hidrógeno genera que el espacio aumente de forma considerable.

El traspaso de hidrógeno de una fuente a otra se hace usualmente mediante el método de cascada. Este método funciona de forma tal que la fuente de origen tiene una presión mayor que la presión existente en el destino, luego se abre una válvula que permite traspasar el gas de un punto a otro hasta que las presiones en ambos lados de la operación sean iguales. Por lo tanto, si se quiere traspasar hidrógeno a un bus a una presión de operación de 350 bar, este debe ser almacenado a una presión mayor para que se pueda ejecutar la operación. Para el caso de un sistema de este tipo operando en Santiago, un sistema como este es recomendable, dado que permitiría altas utilidades de buses a hidrógeno en vista a los rápidos tiempos de carga de hidrógeno.

Nel ofrece dos sistemas que podrían ser útiles para este diseño; H2Station (Figura 12) modelo HS004 el cual permite comprimir hidrógeno a una tasa de 66 kg/h a una presión de 700 bar, el cual puede ser conectado posteriormente a un sistema de

⁵ Cabe señalar que en la configuración presentada en la Figura 9 existen dos etapas de compresión, no obstante, en ciertos casos, es posible eliminar una de las etapas. Por ejemplo, la compresión para almacenamiento puede ser descartada si se decide almacenar hidrógeno a la presión de salida del electrolizador. En caso de decidir realizar almacenamiento a una alta presión, se puede eliminar la compresión para dispensado siempre y cuando la presión de almacenamiento sea mayor que la presión requerida por los buses (350 bar)

dispensado de 700 bar y a un sistema de 350 bar. Por otra parte, está el modelo HSABB que se enfoca exclusivamente en la compresión de hidrógeno para posterior dispensado en equipos de 350 bar, ya que este tiene la posibilidad de comprimir hidrógeno a una razón de 240 kg/h a 350 bar y es capaz de recibir la conexión de 3 sistemas de dispensado. Este modelo posee dimensiones de 3,3 m x 2,2 m x 3,5 m. La cantidad de estos estará en función del régimen de carga de los buses de hidrógeno, como también de la cantidad de dispensadores que se quieran instalar en la estación.



Figura 12: H2Station - Nel [14]

- 3. Tanque de almacenamiento:** Los tanques de almacenamiento estacionarios son tanque tipo I, los cuales son tanques de acero. Estos pueden operar en temperaturas de entre -20°C a 40°C. La máxima presión de almacenamiento dependerá del tanque propiamente tal, a modo de ejemplo, en el caso de *Nel* cuentan con tanques de hidrógeno de este tipo cuya presión máxima puede ir desde 200 bar hasta 1000 bar.

Uno de los sistemas de almacenamiento de *Nel* corresponde al tanque de acero tipo I SS0001, cuya presión máxima de operación es de 200 bar. Este sistema de almacenamiento está compuesto por 15 tanques, en los cuales se pueden almacenar aproximadamente 500 kg a 200 bar. Las dimensiones de este sistema de almacenamiento son de 12,3 m x 2,4 m x 3 m.



Figura 13: Tanque de almacenamiento Nel SS001 [15]

En caso de que se almacene el hidrógeno a la presión de salida de electrolizador (30 bar) se requeriría cerca de 6 veces más tanques para almacenar la misma cantidad de hidrógeno. Es decir, se pueden almacenar 500 kg a 200 bar en un sistema de tanques como el de la Figura 13 o 6 sistemas como el de la misma para almacenar los mismos 500 kg pero a una presión de 30 bar. Tal como se puede notar, la decisión de la presión de almacenamiento va a estar fuertemente ligada con la disponibilidad de espacio.

4. **Sistema de dispensado:** La última etapa del proceso corresponde al dispensado propiamente tal del hidrógeno en los vehículos. Existen 2 presiones de dispensado, 350 bar y 700 bar. La presión de dispensado de 350 bar se realiza principalmente en equipos como buses o camiones de ruta, ya que esa es la presión máxima a la cual la mayoría de estos vehículos pueden almacenar el hidrógeno. La presión de 700 bar se realiza en vehículos menores como autos, tal es el caso del Toyota Mirai, y para estos equipos el proceso de carga se realiza mediante el sistema de cascadas, ya que permite disminuir los tiempos de carga.

A modo de referencia, un dispensador de hidrógeno ofrecido por *Nel* tiene la capacidad de cargar vehículos cuyos tanques tengan una capacidad de entre 10 a 50 kg a una presión de 350 bar. Estos equipos, al igual que los tanques pueden operar a temperaturas de entre -20°C y 40°C. Las dimensiones de este equipo son de 0,6 m x 0,5 m x 2,5 m y su manguera tiene una longitud de 2,5 metros. La cantidad de estos

sistemas de dispensados estará en función del análisis asociado a la simultaneidad de carga requerida en el terminal.



Figura 14: Dispensador de hidrógeno Nel [16]

3. Metodología

Esta sección describe la metodología utilizada en este estudio. En primera instancia se mostrará el procedimiento para calcular los requerimientos de potencia y energía a los cuales se verá sometido un bus en los 20 recorridos a estudiar, cuyas características se pueden observar en la sección 5.

Por parte del MTT se entregó un archivo denominado “detalle_ppu⁶_arco⁷_aaaa_mm_dd.csv” en donde aaaa corresponde al año de la información, mm al mes y dd al día. Este archivo contiene la información asociada a múltiples recorridos, en particular de interés es la velocidad media del arco⁸, la cual es generalmente medida cada 30 segundos, y en algunos casos cada 1 minuto o 1 minuto con 30 segundos. Para el caso del presente estudio se considerará la información de los días comprendidos entre el 3 de enero y 7 de enero 2022, ambos días inclusive, y 10 de enero y 14 de enero 2022, ambos días inclusive, lo que permite contar con una gran cantidad de datos, favoreciendo así la robustez de las estimaciones.

Con esta información se puede reconstruir el perfil de velocidad a la cual se realiza cada uno de los recorridos. Este perfil de conducción contiene la información horaria del recorrido, y la velocidad media del arco. Esta información es útil ya que a partir de estos dos parámetros se puede determinar tanto los requerimientos de energía y de velocidad en los 20 recorridos a estudiar.

Según el equilibrio de fuerzas son cuatro las componentes que el motor eléctrico de un bus de hidrógeno debe sobreponer para poder desplazarse longitudinalmente, las cuales corresponden a la *resistencia a la rodadura* (F_r), la *fuerza de tracción en pendiente* (F_h), la *resistencia a la aceleración* (F_a) y la *resistencia aerodinámica* (F_d). La ecuación de cada una de ellas y las fuerzas previamente mencionadas corresponden a las siguientes [17]:

$$F = F_r + F_h + F_a + F_d$$

$$F_r = mgf \cos \alpha$$

$$F_h = mg \sin \alpha$$

$$F_a = \delta ma$$

⁶ PPU: Placa Patente Única

⁷ Arco: Segmentos entre puntos o nodos de la red vial

⁸ Corresponde a la velocidad media entre dos nodos de la red vial

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_d$$

En donde:

- F corresponde a la fuerza de tracción (N)
- F_r es la resistencia a la rodadura (N)
- F_h es la fuerza de tracción en subida (N)
- F_a es la resistencia a la aceleración (N)
- F_d es la resistencia aerodinámica del bus (N)
- m corresponde al peso del bus (kg)
- g la aceleración de gravedad (m/s^2)
- f es el coeficiente de resistencia a la rodadura
- α es la pendiente del camino
- δ coeficiente inercial relacionado al vehículo
- a es la aceleración del vehículo (m/s^2)
- ρ es la densidad del aire (kg/m^3)
- A el área frontal del bus (m^2)
- v la velocidad (km/h)
- C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica

Luego, el *trabajo*⁹ medido en Joules (J) requerido para movilizar el bus está definido por la siguiente ecuación. Es importante mencionar que este valor corresponde a la energía que se debe realizar en las ruedas del bus, como se verá más adelante, existen pérdidas de energía asociada a los distintos componentes del bus, por lo que se deberá considerar la eficiencia de cada uno de ellos.

$$E = Fd$$

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), dada por la siguiente expresión.

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

⁹ Trabajo se define en física como la fuerza que se aplica sobre un cuerpo para desplazarlo de un punto a otro

La ecuación anterior corresponde a la energía de salida que debe suministrar el motor eléctrico, sin embargo, este también cuenta con su propia eficiencia, por lo tanto, la energía requerida por el motor eléctrico como suministro energético vendrá dada por la siguiente expresión, en donde (η_{motor}) es la eficiencia del motor.

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

La energía requerida por el motor eléctrico puede ser suministrada tanto por la celda de combustible como por la batería, por este motivo la energía que deben entregar estos sistemas considerará las eficiencias respectivas, en donde, como se muestra en la Figura 15 la eficiencia de la celda de combustible está en función de la potencia entregada por la misma

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

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

El presente estudio no tiene como objetivo describir el comportamiento de la batería, por lo que para la simulación no se utilizará una eficiencia variable de la batería, sino que se utilizará una eficiencia constante para este componente. No así el caso de la celda de combustible, en donde sí se considera una curva de eficiencia dinámica, la cual está en función de la potencia de salida de la misma. En la Figura 15 se puede observar la curva de eficiencia de una celda de combustible, en donde el eje horizontal corresponde a la potencia de salida de la celda, y en el eje vertical la eficiencia de la misma.

A modo de ejemplo, una celda de combustible cuya potencia nominal máxima es de 100 kW, y que está entregando 40 kW de potencia, tendrá una potencia de salida de un 40% (40 kW / 100 kW), por lo que su eficiencia en ese punto es de un 60%.

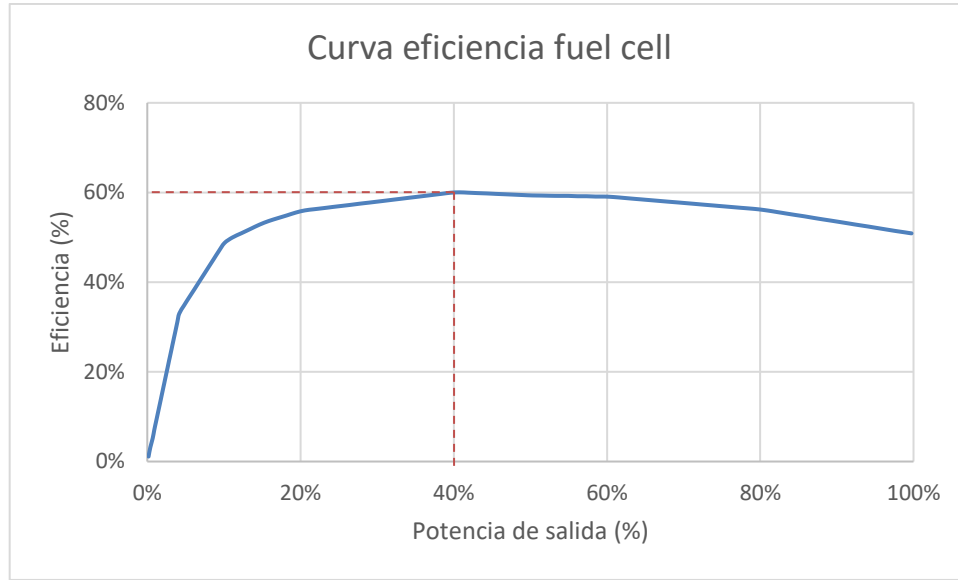


Figura 15: Curva eficiencia celda de combustible [18]

Luego, la potencia (kW) requerida en las ruedas viene dada por.

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

Una ventaja de los sistemas eléctricos, buses eléctricos a batería o buses eléctricos a hidrógeno es que, al momento de frenar, son capaces de recuperar parte de la energía cinética del bus debido a que el motor eléctrico al momento de frenar puede operar como un generador de energía. Lógicamente, como requisito para poder recuperar la energía se requiere de algún sistema que sea capaz de recibir y almacenar esta energía, en ambos casos, es decir en los buses eléctricos a batería y en los buses eléctricos a hidrógeno, la energía recuperada es recibida por el sistema de batería. La energía recuperada viene dada por la siguiente ecuación

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

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 celda de combustible) se requiere de un modelo para la operación de ambos. En este caso, se utilizó un modelo simplificado del control de estos sistemas el cual 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 celda de combustible [19]. De esta forma la dualidad de la celda de combustible y la batería queda controlada de la siguiente manera.

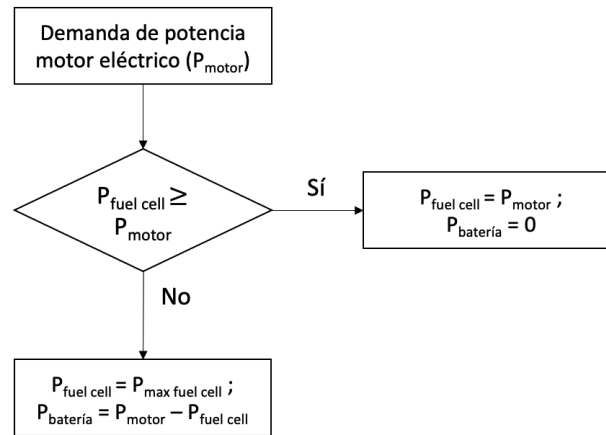


Figura 16: Control de potencia del sistema dual [19]

Tal como se comentó anteriormente, los datos utilizados para la aplicación de las fórmulas corresponden a aquellos entregados por el MTT los cuales entregan la velocidad promedio de un arco cada 30 segundos en la mayoría de los casos, y en unos pocos cada 60 o 90 segundos. Este nivel de detalle de los datos genera que se podría producir una subestimación respecto a la cantidad de energía que consumen los buses, ya que la componente asociada a la resistencia a la aceleración se ve perjudicada.

Con el fin de evitar una subestimación de la energía requerida es que se realizó un ajuste del consumo energético. Este ajuste se hizo a partir de información prevista por el MTT en donde se tenía el consumo de energía de buses eléctricos a batería que se encuentran operando actualmente en Santiago, con la cual se pudo determinar que el nivel de subestimación de energía a partir del modelo propuesto era de un 10%, por lo cual se realizó una corrección en el consumo energético con este mismo valor.

Finalmente, los parámetros utilizados en el análisis técnico para la implementación de las ecuaciones presentadas anteriormente fueron seleccionados de acuerdo con los valores que se utilizan de forma más reiterada en la bibliografía asociada al análisis de buses.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Eficiencia transmisión (η_T)	98%	%	[18]
Eficiencia motor eléctrico (η_{motor})	89%	%	[20]
Eficiencia carga/descarga batería ($\eta_{batería}$)	90%	%	[21]
Eficiencia energía recuperada ($\eta_{recuperación}$)	50%	%	[22]
Densidad del aire (ρ)	1,2	kg/m ³	
Coeficiente de resistencia a la rodadura (f)	0,01		[23]
Coeficiente de resistencia aerodinámica (C_d)	0,633		[24]
Coeficiente inercial (δ)	1,1		[25]

Tabla 2: Parámetros de simulación

Con esto se tiene un modelo robusto que permite calcular energía y requerimiento de potencia. Por otra parte, como se pudo notar de las ecuaciones, un factor importante corresponde al peso del bus, el cual será característico de cada uno de los modelos, por lo que para poder aplicar la metodología previamente descrita se realizó un levantamiento de la oferta comercial de buses dado que del bus afectarán el consumo de energía y la potencia requerida. Este levantamiento de información se presenta en la sección 4, en donde se presentan múltiples buses para posteriormente realizar un análisis de energía y potencia de 4 de ellos.

Con las ecuaciones presentadas anteriormente y la selección de cuatro buses a analizar es que se puede realizar la simulación para cada uno de estos buses definidos en las 20 rutas a estudiar. Son cinco los resultados obtenidos a partir de la simulación.

1. Cantidad de hidrógeno que consume cada modelo de bus en cada uno de los recorridos
2. Rendimiento de cada modelo medido en kilogramos de hidrógeno consumidos cada 100 kilómetros
3. Cantidad de vueltas de autonomía
4. Tiempos de recarga relacionados con la norma SAE J2601/1-2, la cual define velocidades de dispensado de hidrógeno
5. Cálculo del consumo de la flota

Los primeros cuatro resultados obtenidos a partir de la simulación son independientes del tamaño de la flota, ya que únicamente dependen del perfil de velocidad construido anteriormente, el bus seleccionado, y la ruta que se está simulando. No obstante, el quinto punto dependerá también del recorrido que se está estudiando, ya que la cantidad de

salidas desde los terminales, es decir, la cantidad de veces que se realiza durante un día el servicio.

Por lo tanto, para la determinación del consumo de hidrógeno total de la flota para cada uno de los servicios, se utiliza tanto la información del consumo de hidrógeno de un solo bus (punto 1) como también la cantidad de veces que se realiza el recorrido en el día. En este caso, la cantidad de salidas en un día laboral es idéntica independiente del día en particular. No obstante, sí se realiza la diferenciación respecto a la cantidad de salidas un día laboral, si es sábado o domingo.

Posterior a la determinación del consumo de hidrógeno total de la flota para cada uno de los servicios de forma diaria, se utiliza este insumo para el dimensionamiento de la infraestructura requerida para la producción de hidrógeno, es decir, los electrolizadores. Para ello, se analizarán dos posibles escenarios de producción, uno en donde el electrolizador está conectado únicamente a una planta fotovoltaica, por lo cual está sujeto a la disponibilidad solar para su funcionamiento, y otro en donde el electrolizador se conecta a la matriz energética, por lo cual su funcionamiento sería 24/7 al tener un suministro energético permanente.

El análisis de ambas situaciones permite generar una perspectiva respecto a cuán grande tiene que ser un sistema en cada caso, ya que al considerar el escenario en donde se realiza la generación de hidrógeno a partir de energía solar se requerirá un sistema de producción más grande para poder suplir las horas donde no exista luz solar disponible.

Habiendo demostrado la factibilidad del uso de hidrógeno en buses mediante celdas de combustible y posterior al cálculo de requerimientos de hidrógeno para cada una de las flotas y el dimensionamiento del electrolizador se puede continuar con el análisis de cuáles son los beneficios generados a partir de la introducción de buses a hidrógeno en el sistema. Para esto, son dos tipos de emisiones las cuales se analizan, emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de ruido.

Para el caso de las emisiones de gases de efecto invernadero se realiza una comparación entre los buses diésel, eléctricos a batería y a hidrógeno. En el caso de los dos últimos, estos no generan emisiones por combustión, por lo cual se analizan las emisiones generadas por la energía eléctrica utilizada. Para los buses eléctricos a batería se calculan las emisiones generadas por la electricidad requerida para cargar el bus, mientras que para los buses a hidrógeno se calculan las emisiones generadas por la electricidad requerida para energizar el electrolizador, el cual producirá el hidrógeno.

En el caso de los buses diésel se analizan únicamente las emisiones de alcance 1, es decir, aquellas asociadas a la combustión del diésel. De este análisis se obtiene como resultado las emisiones por tecnología medida en gramos de CO₂e por kilómetro recorrido.

Posteriormente se analiza el efecto que tiene la introducción de buses a hidrógeno en término de emisiones de ruido. Para esto se compara la presión sonora de un bus diésel con un bus a hidrógeno medido a 7,5 metros. En este caso no se cuenta con mediciones propias, por lo que se utiliza bibliografía relacionada.

Finalmente, luego de haber demostrado la factibilidad técnica de la introducción de buses a hidrógeno en el Sistema de Transporte de Movilidad y los beneficios de ello es que se genera la elección de la ruta para la implementación del proyecto. Para esto, se genera un modelo matemático el cual considera cuatro variables para generar una priorización sobre la ruta en la cual realizar el piloto.

Las cuatro variables a analizar corresponden a las emisiones de CO₂e abatidas, pasajeros servidos, recorrido por zona de interés, y potencial de uso de infraestructura. El detalle de cada una de estas variables, el cálculo de puntaje, los recorridos en cada una de ellas se puede observar en la sección 7.

A partir de este modelo se genera una sugerencia del servicio en el cual implementar una flota piloto de buses a hidrógeno. Para este servicio en particular se analiza, en mayor profundidad, los costos asociados al sistema, como también se genera una visualización del espacio requerido en el terminal para el desarrollo de la planta de producción de hidrógeno y el sistema de almacenamiento.

4. Levantamiento de oferta comercial buses de hidrógeno

Tal como se presentó en la sección metodológica, la simulación de consumos de energía de un bus está en función de parámetros relevantes como la velocidad, pendiente, el peso del vehículo, siendo es último propio de cada uno de los buses, entre otros factores. Adicionalmente, existen características propias de cada uno de los buses que tendrán influencia en el resultado final de la simulación. Por ejemplo, al tener una celda de combustible de menor potencia esta tendrá un rango de aplicación menor y será la batería la que realizará la mayor parte del trabajo. En el caso contrario, al tener una celda de combustible de mayor potencia esta operará en un rango más amplio.

Por otra parte, el tamaño del tanque de hidrógeno afectará la autonomía del bus, en el sentido en que un tanque con mayor capacidad de almacenamiento permitirá que el bus tenga que recargar hidrógeno una menor cantidad de veces durante el día, además de que un tanque de mayor tamaño permitirá recorrer una mayor cantidad de kilómetros entre cargas.

Es decir, para el caso del análisis de las rutas en el Sistema de Transporte Metropolitano, la configuración y elección del bus a hidrógeno definirá su rendimiento y de esta manera, los resultados de este trabajo.

En la Tabla 3¹⁰ se puede observar un levantamiento de los buses disponibles comercialmente de los proveedores de buses de hidrógeno en el mundo que participaron en proyectos a nivel mundial. Es importante recalcar que esta información es la entregada por los proveedores en sus sitios web, no obstante, a partir de la revisión de otros pilotos realizados en el mundo por estos mismos proveedores, se pudo notar que en algunos casos las características de los buses varían ligeramente respecto a lo que los proveedores declaran como los modelos disponibles, lo que demuestra que existe una cuota de flexibilidad respecto a las características que tienen los buses. La lista a continuación no es exhaustiva, y su fecha de consulta corresponde a la de mayo 2022.

¹⁰ La información de las marcas presentadas en la tabla es de acceso público, el objetivo es dar a conocer datos de referencia del mercado y no realizar análisis comparativos.

Marca	Modelo	Potencia motor eléctrico	Potencia Celda de combustible	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
Safr	Businova H2 (10 m)	250 kW	30 kW	30 kg	132 kWh
Safr	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
Toyota	Sora	226 kW	228 kW	25 kg	235 kWh ¹¹
Hyundai	ELEC CITY Fuel Cell	180 kW	180 kW	34,5 kg	78,4 kWh
Foton	Hydrogen Fuel Cell City Bus	125 kW	65 kW	37 kg	60 kWh

Tabla 3: Levantamiento disponibilidad comercial buses de hidrógeno

En términos de costos económicos, el costo de adquisición de un bus de hidrógeno sigue siendo elevado respecto a un bus diésel o a un bus eléctrico a baterías. Durante el año 2018 se pudieron observar costos cercanos a 1.300.000 dólares [10], 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 en Estados Unidos medida hasta el año 2018 puede ser observada en la Figura 17. Por otra parte, un bus eléctrico a batería puede tener costos de entre 200.000 a 500.000 dólares [26].

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:

¹¹ La batería en este sistema sirve para alimentar sistemas externos con energía

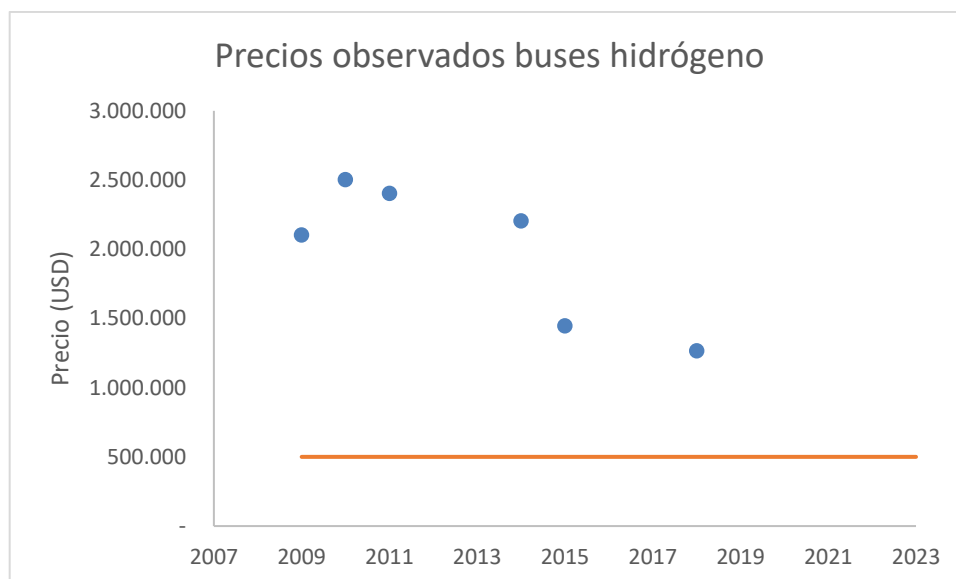


Figura 17: Precios observados buses de hidrógeno [10]

Para el caso de los buses listados en la Tabla 3 no se determinó el costo comercial de cada uno de ellos directamente con proveedores, no obstante, dado que en el mundo se han desarrollado proyectos piloto asociados a la introducción de la tecnología, fue posible obtener información indirecta a partir de ello. En Barcelona, el año 2020 se realizó una orden por 8 buses de hidrógeno de la marca Caetano de 12 metros, con un costo aproximado de 6.400.000 USD, obteniendo un valor unitario de 800.000 USD [27]. Otro piloto que se desarrolló fue en Italia, con la orden de 12 buses de la marca Solaris, bajo el programa JIVE. El contrato tuvo un costo total de 13,5 millones de dólares, lo cual incluye los costos de servicio y mantención durante 8 años [28]. Durante el 2022, la ciudad de Mallorca en España realizó un contrato por 4,2 millones de dólares por la adquisición de 5 buses Solaris [29]. Uno de los casos interesantes a analizar corresponde a lo desarrollado en el programa JIVE 2 en la Unión Europea, en donde el año 2020 se realizó una orden por 15 buses de hidrógeno, no obstante, los requisitos de la licitación establecían que el máximo valor por bus era de 660.000 USD [30].

Es decir, por el momento, para el caso de los antecedentes recopilados en este estudio, dado el estado del arte actual costo capital de los buses a hidrógeno se mueve en estos proyectos en el rango de 660.000 USD a 800.000 USD cada uno.

Para este estudio se analizarán 4 buses, los dos buses de New Flyer, el bus de la marca Foton y el bus Van Hool, los cuales fueron escogidos debido a la mayor cantidad de información disponible y por el interés del Ministerio en ellos. En la tabla a continuación se presentan

las características principales de los buses seleccionados. Cada uno de estos buses será analizado en las 20 rutas previamente descritas.

Marca	Modelo	Largo	Potencia motor eléctrico	Potencia Celda de combustible	Tanque H ₂	Batería	Pasajeros	Peso vacío ¹²	Peso máximo ¹³
New Flyer	Xcelsior CHARGE H2	12,5 m	160 kW	85 kW	37,5 kg	100 kWh	83	14.628 kg	21.683 kg ¹⁴
New Flyer	Xcelsior CHARGE H2	18,5 m	320 kW	85 kW	60 kg	120 kWh	126	22.634 kg	33.344 kg ¹⁵
Foton	Hydrogen Fuel Cell City Bus	12,5 m	125 kW	65 kW	37 kg	60 kWh	84	12.750 kg	18.000 kg
Van Hool	A330 Fuel Cell	13,1 m	210 kW	85 kW	38 kg	24 kWh	81	12.880 kg	19.765 kg

Tabla 4: Características buses seleccionados a estudiar

¹² Peso vacío corresponde al peso del chasis del bus

¹³ Peso máximo corresponde al peso del chasis bus incluyendo la cantidad máxima de pasajeros

¹⁴ Se asumió el peso máximo como el peso vacío con la totalidad de pasajeros y un peso promedio de 85 kg c/u

¹⁵ Ídem

5. Determinación de rutas para análisis

Siguiendo la metodología para la determinación de energía y potencia en buses, y posterior a haber determina la oferta comercial de buses a hidrógeno, se está en condiciones de aplicar y estimar estos requerimientos en rutas del Sistema de Transporte de Movilidad. Esto permitirá determinar cuáles serán las exigencias de elegir alguna de estas rutas en términos de autonomía del bus, requerimiento de potencia, rendimiento del bus y tiempos de carga.

Esto, porque a las características del bus, hay que sumar que las rutas del sistema presentan características que implican distintos desempeños de estos equipos. Las dos principales son la distancia del recorrido y la diferencia de cotas de las rutas. La primero es porque una mayor distancia implicará un aumento en el requerimiento de energía y de autonomía, y lo segundo porque presenta más exigencia al equipo al enfrentarse a mayores pendientes. Una ruta oriente-poniente es más exigente, en términos de potencia, que una norte-sur.

A todo lo anterior se suman consideración de tipo de emisiones, pasajeros servidos, entre otros aspectos que son tratados en este estudio en capítulos anteriores.

De esta manera, y en vista a lo anterior, en esta sección se presentan las 20 rutas a estudiar del Sistema Metropolitano de Movilidad, las cuales fueron seleccionadas por el MTT.

Código Usuario	Nombre del Servicio	Comunas inicio/término servicio
203	Av. Recoleta - La Pintana	Huechuraba - La Pintana
210	Estación Central - Puente Alto	Estación Central - Puente Alto
216	Pablo de Rokha - Vitacura	La Pintana - Vitacura
G04	(M) La Cisterna - Santo Tomás	La Cisterna - La Florida
301	Juan Antonio Ríos - Angelmó	Independencia - San Bernardo
109	Rinconada - (M) U. de Chile	Maipú - Santiago
111	Ciudad Satélite - Rinconada	Maipú - Maipú
118	Rinconada - (M) ULA	Maipú - Santiago
428	Quilicura - (M) La Cisterna	Quilicura - La Cisterna
107	Ciudad Empresarial - Av. Departamental	Huechuraba - Peñalolén
502	Cerro Navia - Cantagallo	Cerro Navia - Lo Barnechea
504	El Tranque - Hospital Dipreca	Pudahuel - Las Condes
516	Pudahuel Sur - Las Parcelas	Maipú - Peñalolén
407	Enea - Las Condes	Pudahuel - Las Condes
C01	(M) Francisco Bilbao - Cerro 18	Providencia - Lo Barnechea
C03	Costanera Center - Vital Apoquindo	Las Condes - Las Condes
C06	Vital Apoquindo - Ciudad Empresarial	Las Condes - Huechuraba
108	Maipú - La Florida	Maipú - La Florida
712	Puente Alto - Recoleta	Puente Alto - Recoleta
405	Maipú - Cantagallo	Maipú - Las Condes

Tabla 5: Resumen 20 rutas seleccionadas

En las Figuras 18 a 21 se pueden observar las rutas previamente mencionadas en su distribución espacial por la ciudad.

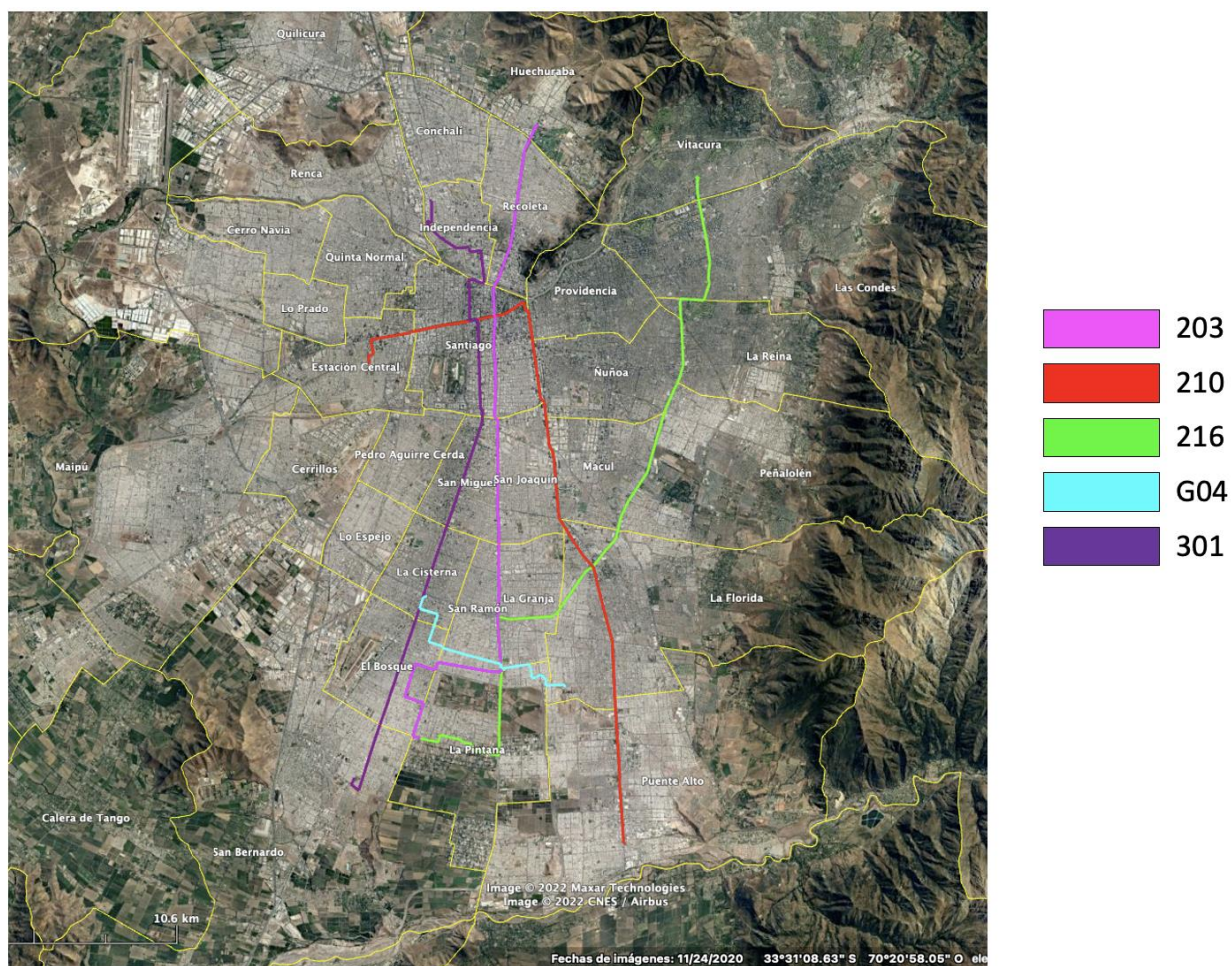


Figura 18: Recorridos 203, 210, 216, G04, 301

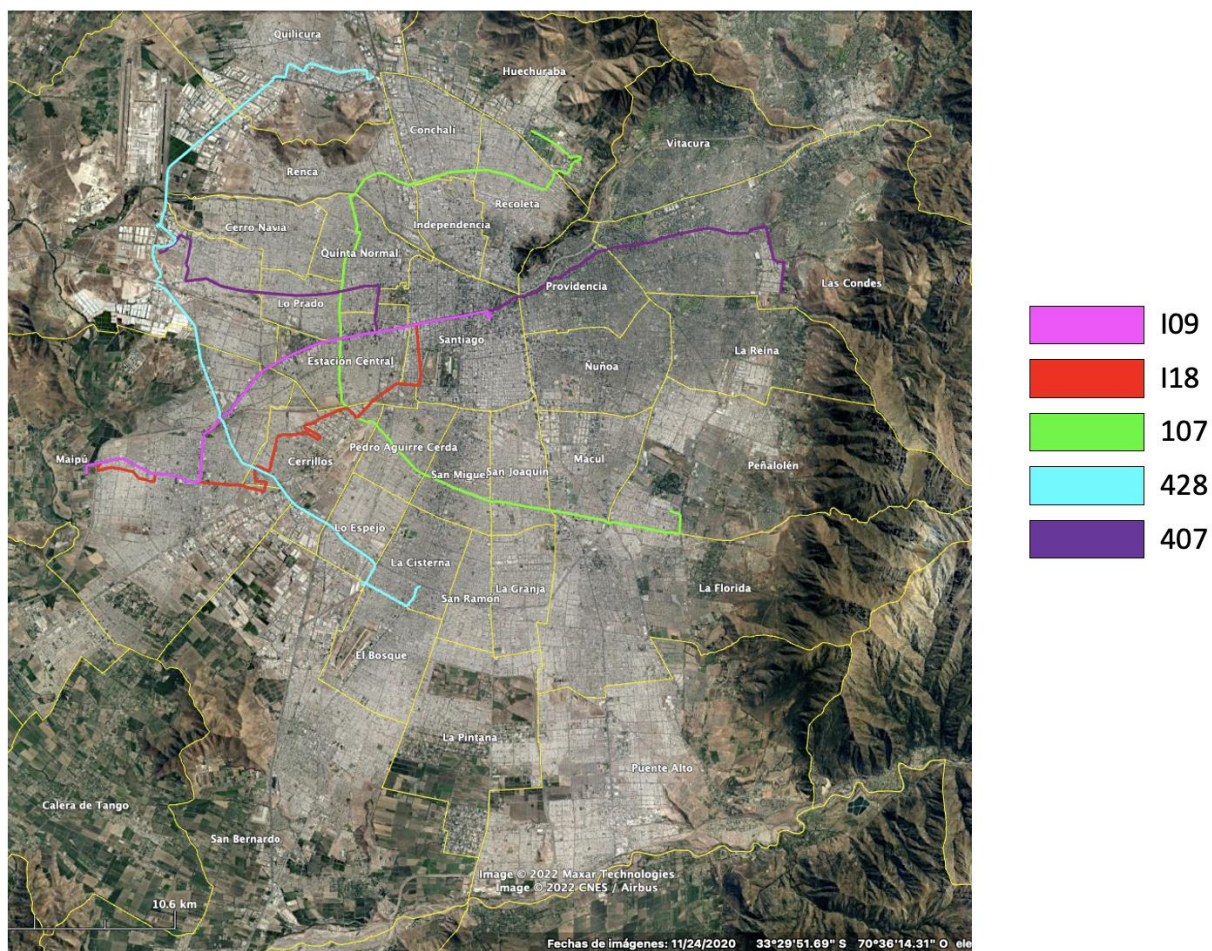


Figura 19: Recorridos 109, 118, 107, 428, 407

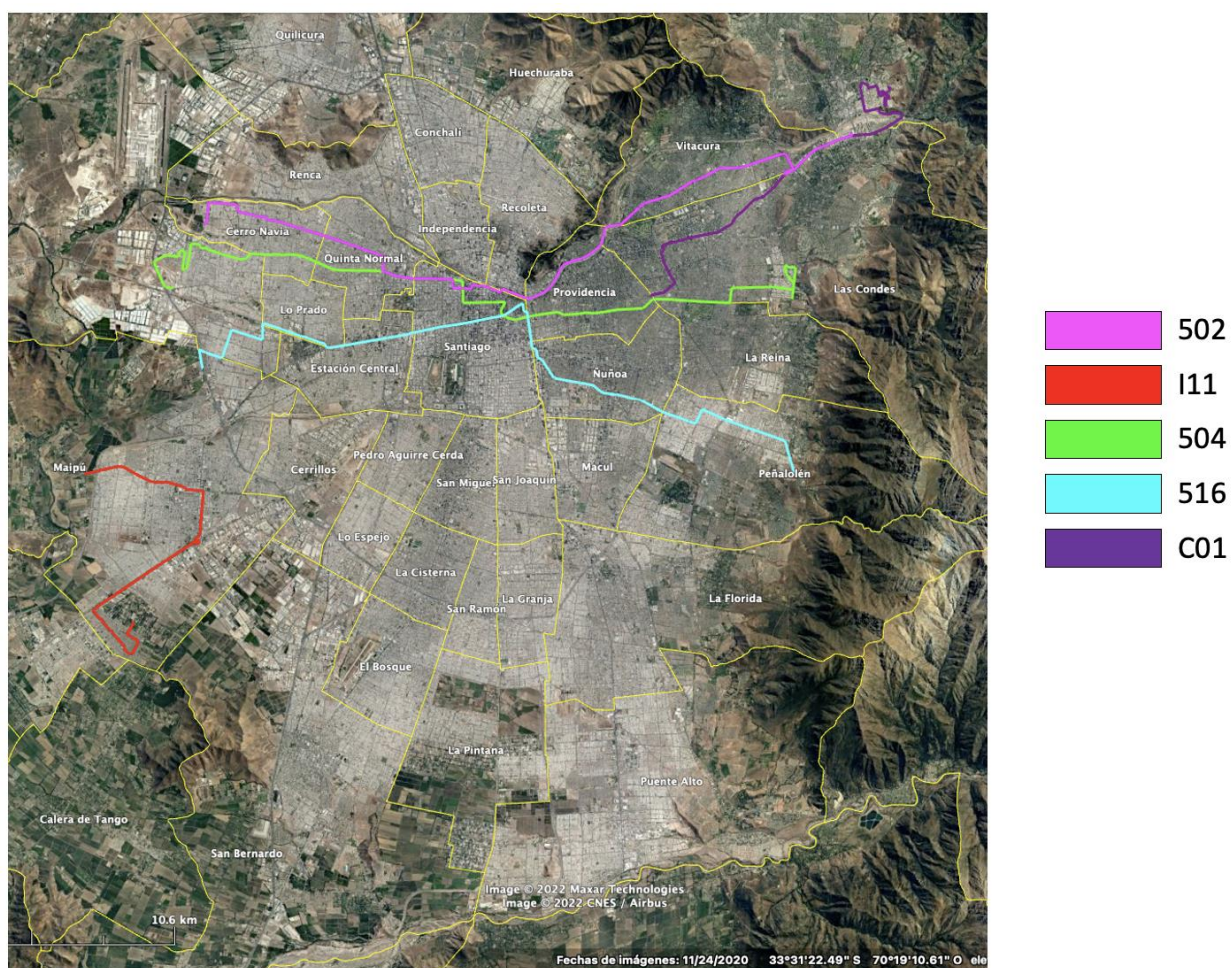


Figura 20: Recorridos 502, I11, 504, 516, C01

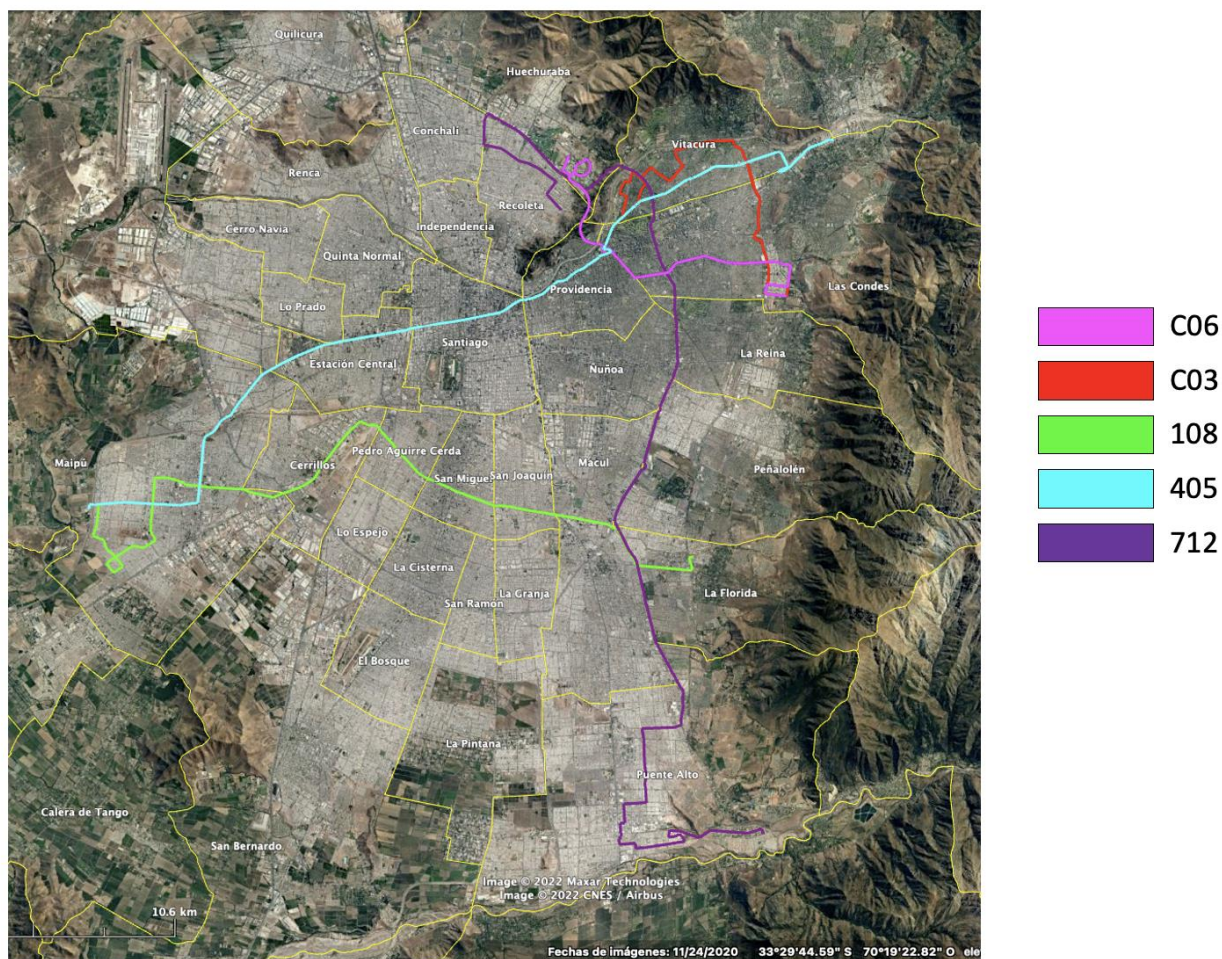


Figura 21: Recorridos C06, C03, 108, 405, 712

En la Tabla 6 se muestran tres de las variables relevantes de los recorridos; la distancia recorrida, el tiempo medio recorrido y la diferencia máxima de altura. Se define esta última variable como la diferencia entre la cota máxima del recorrido y la cota más baja del recorrido, estableciendo dichas cotas a partir de la información obtenida desde Google Earth.

Código Usuario	Distancia recorrida¹⁶ [km]	Tiempo medio recorrido¹⁷ [horas]	Diferencia máxima de altura [m]
203	55,8	3,38	102
210	55,8	3,03	188
216	59,7	2,59	110
G04	17,4	0,97	67
301	52,6	3,26	68
I09	38,3	2,14	111
I11	30,5	1,50	37
I18	43	2,22	84
428	67,3	3,27	100
107	73,1	4,02	146
502	60,3	3,21	333
504	63,2	1,75	274
516	57,4	3,37	351
407	62,2	3,91	269
C01	38,1	2,09	282
C03	30,7	1,99	122
C06	33,1	1,68	237
108	66,1	3,54	201
712	95,9	3,98	253
405	71	4,28	351

Tabla 6: Propiedades relevantes de las 20 rutas a estudiar

A continuación, se presenta el perfil de elevación para cada una de las rutas. Lo relevante de esta información es que a medida en que la pendiente del recorrido sea mayor, es más probable que los requerimientos de energía y de potencia aumenten, tal como ya se mencionó. Todas las figuras se representan en una escala en el eje vertical desde los 400

¹⁶ Distancia total, considera ida y vuelta

¹⁷ Es importante mencionar que esto únicamente representa un tiempo de recorrido promedio y que el comportamiento de este varía a lo largo del día dependiendo del horario de operación, ya que factores como el tráfico y la cantidad de pasajeros a atender alteran este valor. Se debe considerar, además, que este tiempo de recorrido considera el segmento de ida como también de retorno, por lo que este tiempo de operación no se realiza de forma continua.

m.s.n.m. hasta los 1000 m.s.n.m. para que de esta forma se pueda notar visualmente que existen recorridos cuya diferencia de cota es mayor que en otros.

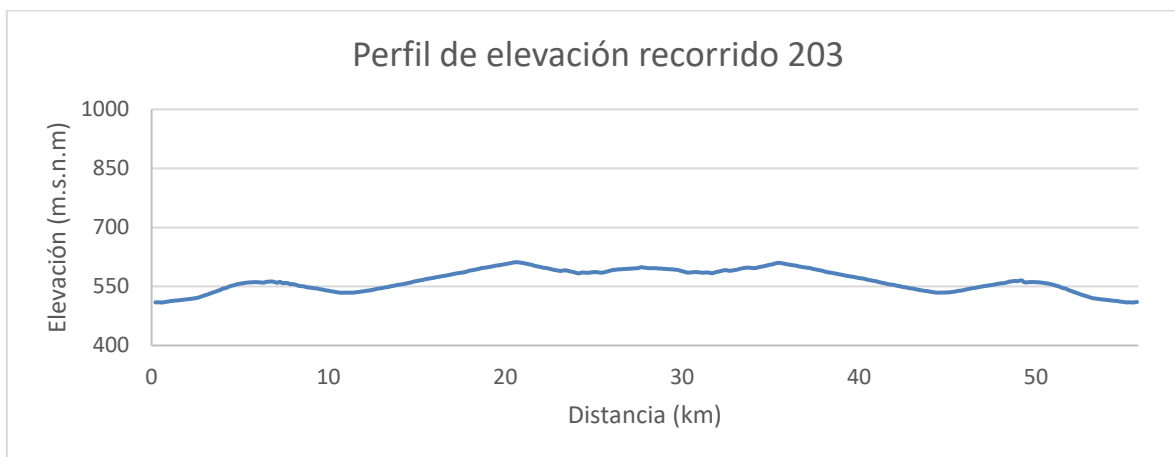


Figura 22: Perfil de elevación recorrido 203

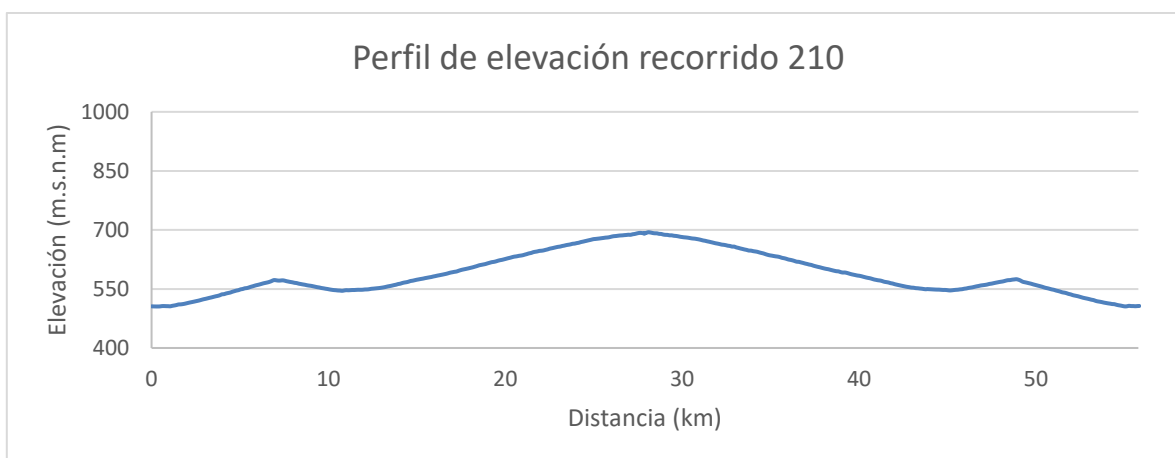


Figura 23: Perfil de elevación recorrido 210

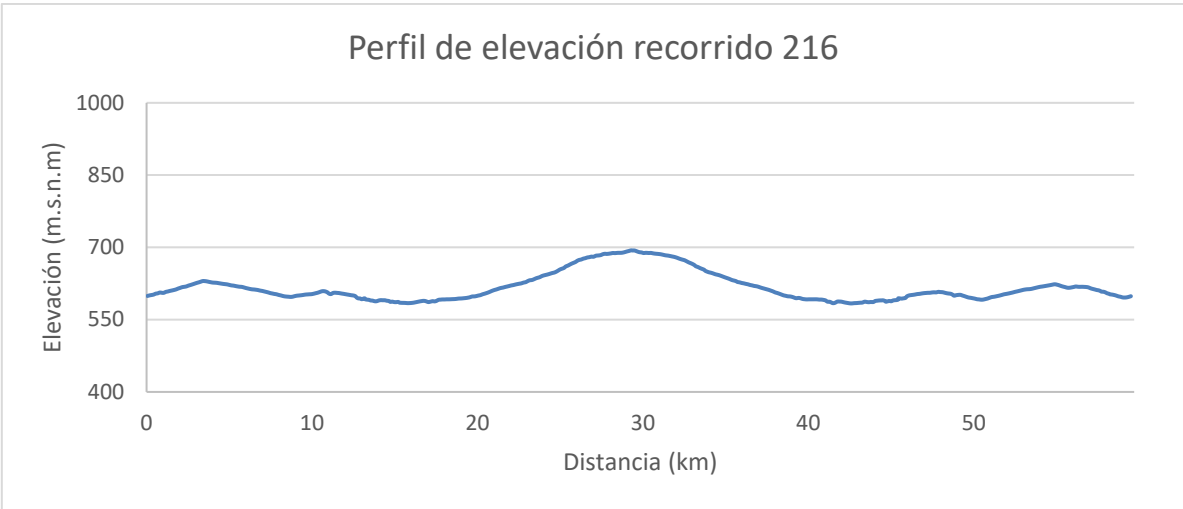


Figura 24: Perfil de elevación recorrido 216

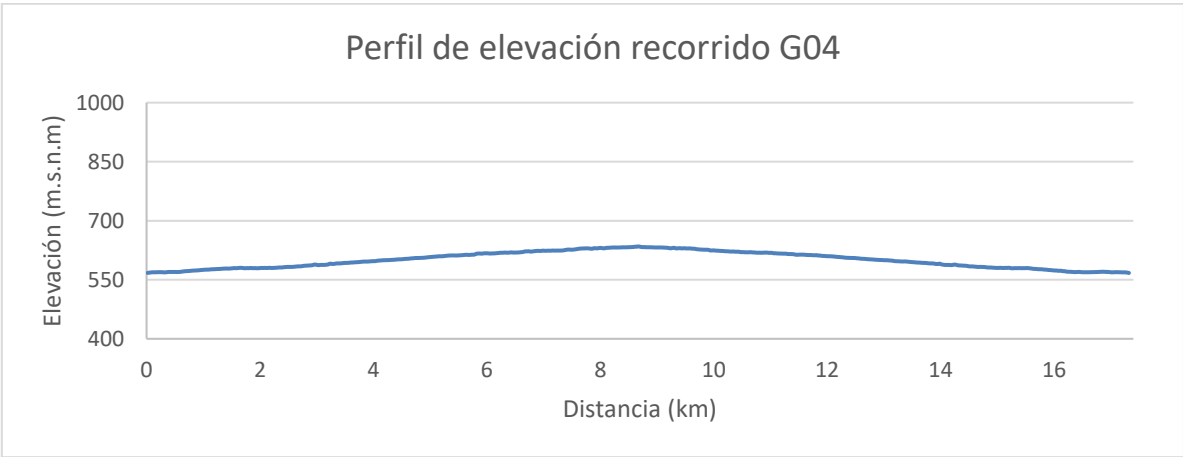


Figura 25: Perfil de elevación recorrido G04

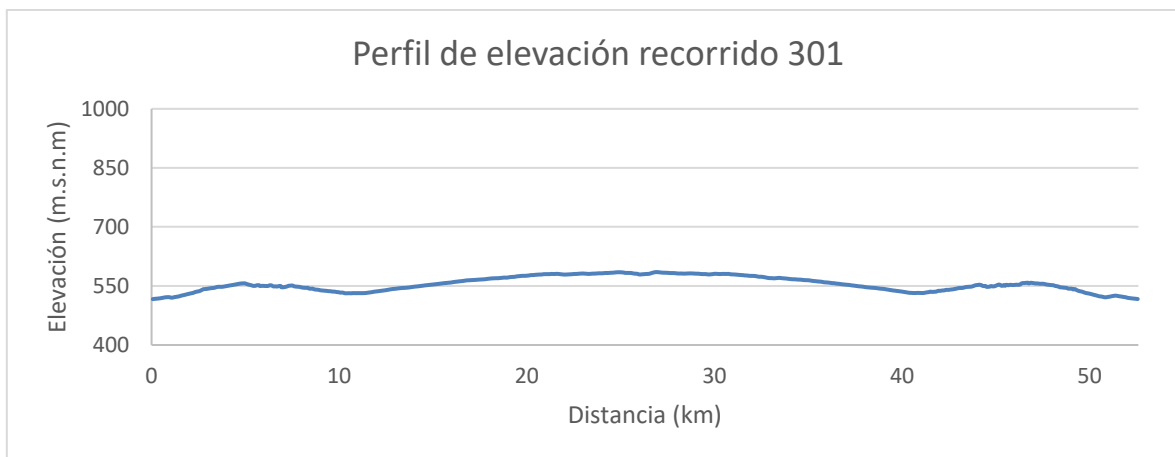


Figura 26: Perfil de elevación recorrido 301

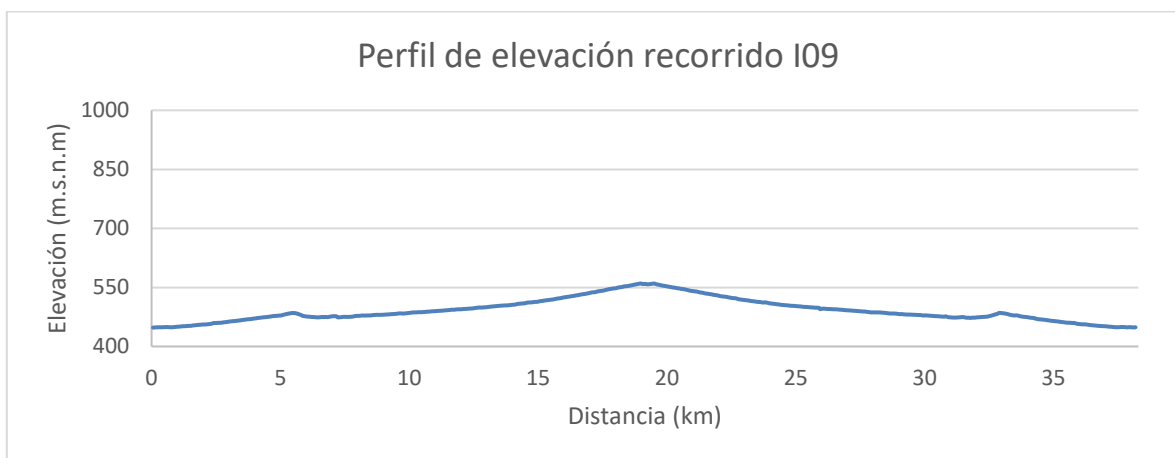


Figura 27: Perfil de elevación recorrido I09



Figura 28: Perfil de elevación recorrido I11

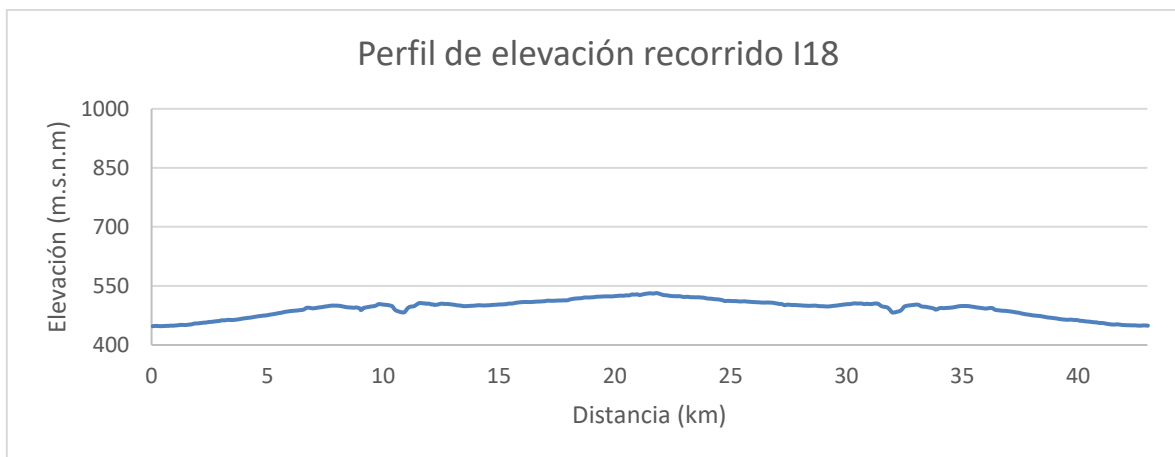


Figura 29: Perfil de elevación recorrido I18

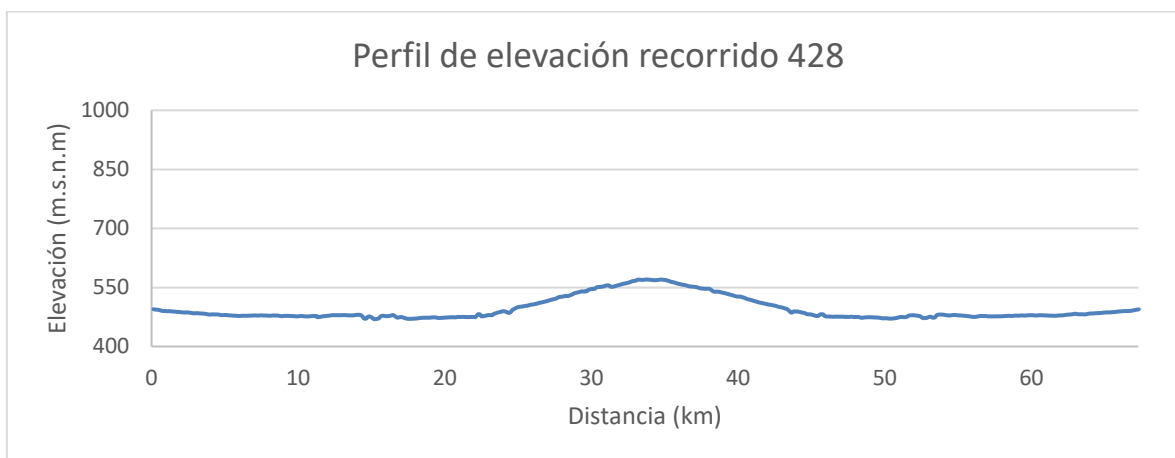


Figura 30: Perfil de elevación recorrido 428

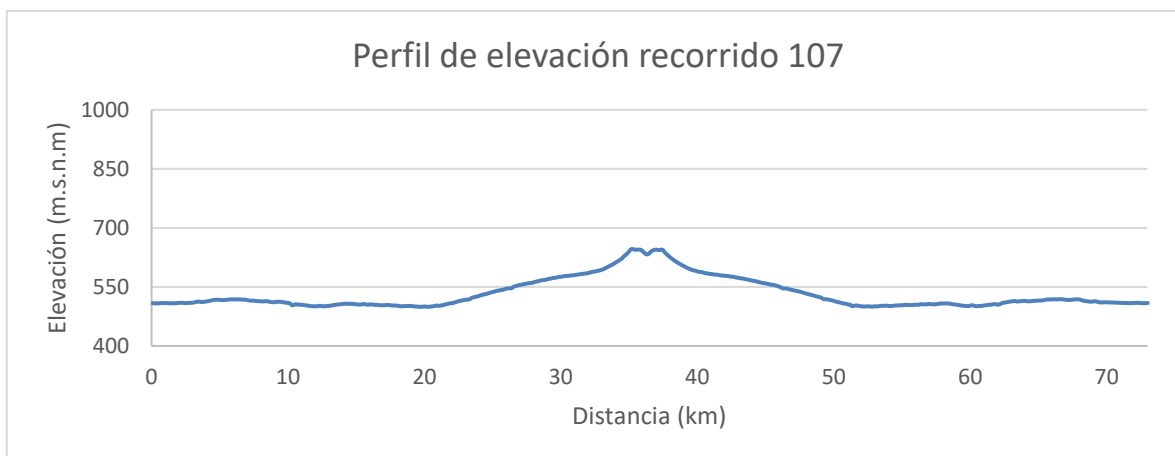


Figura 31: Perfil de elevación recorrido 107

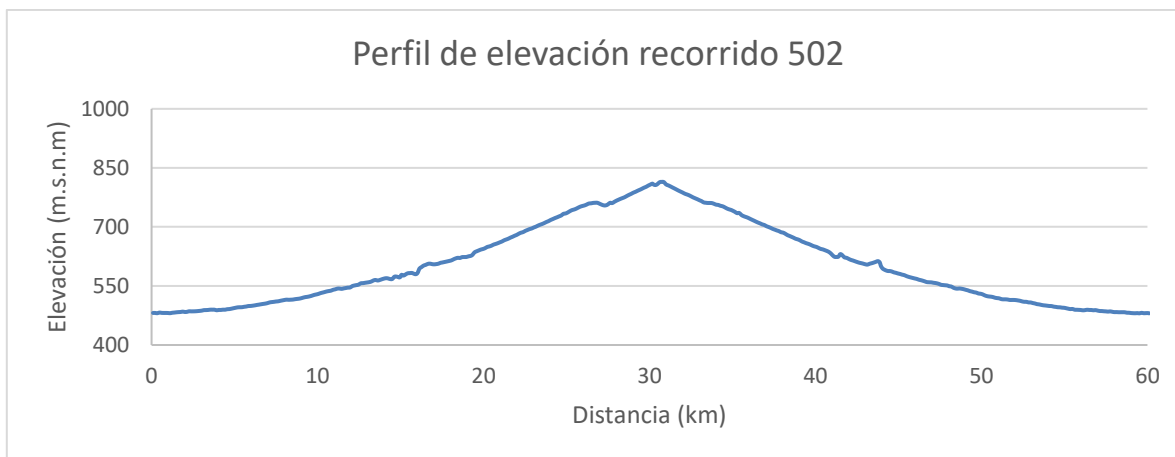


Figura 32: Perfil de elevación recorrido 502

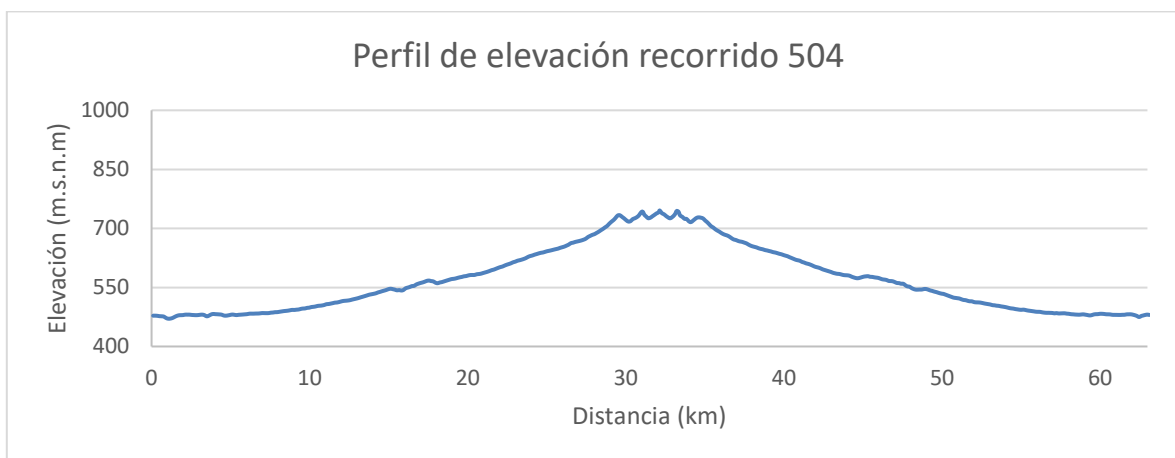


Figura 33: Perfil de elevación recorrido 504



Figura 34: Perfil de elevación recorrido 516

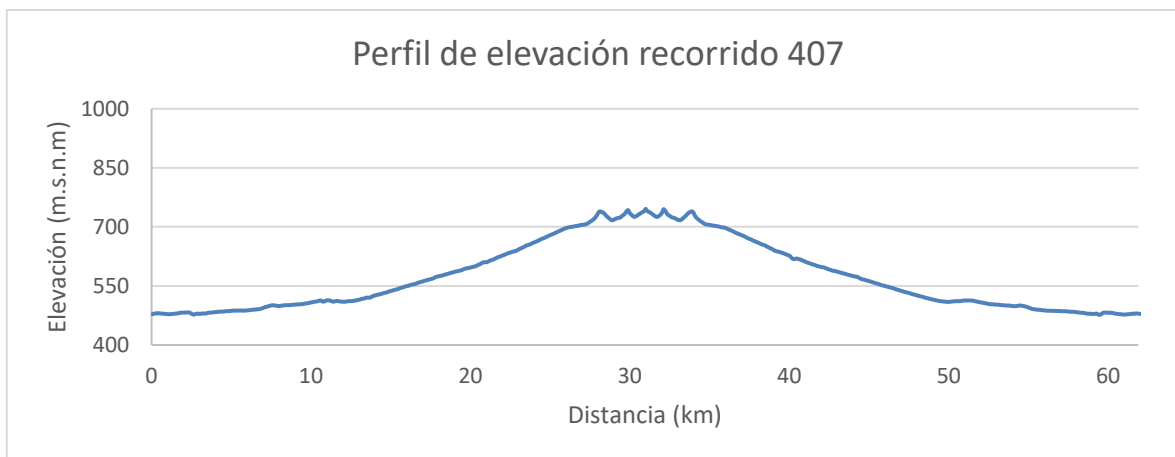


Figura 35: Perfil de elevación recorrido 407

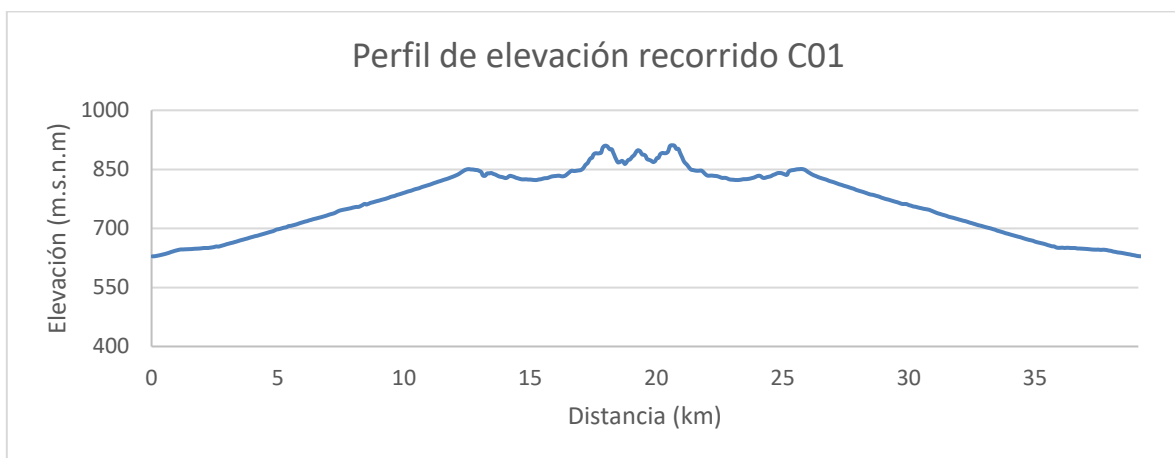


Figura 36: Perfil de elevación recorrido C01

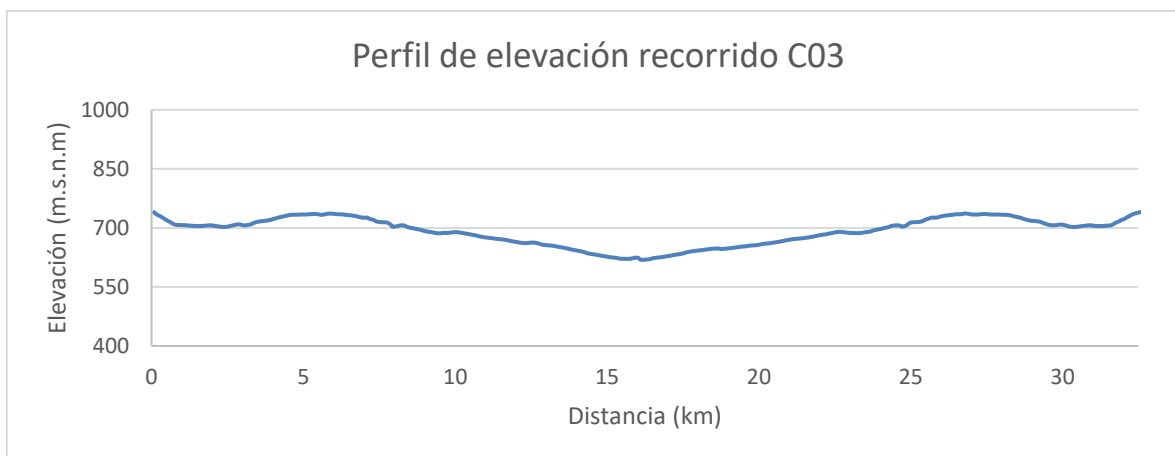


Figura 37: Perfil de elevación recorrido C03

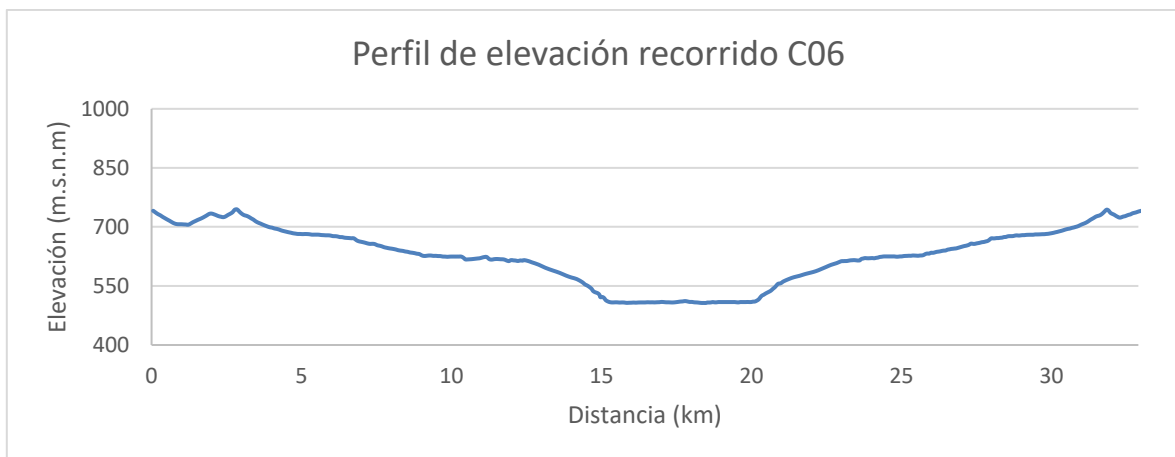


Figura 38: Perfil de elevación recorrido C06

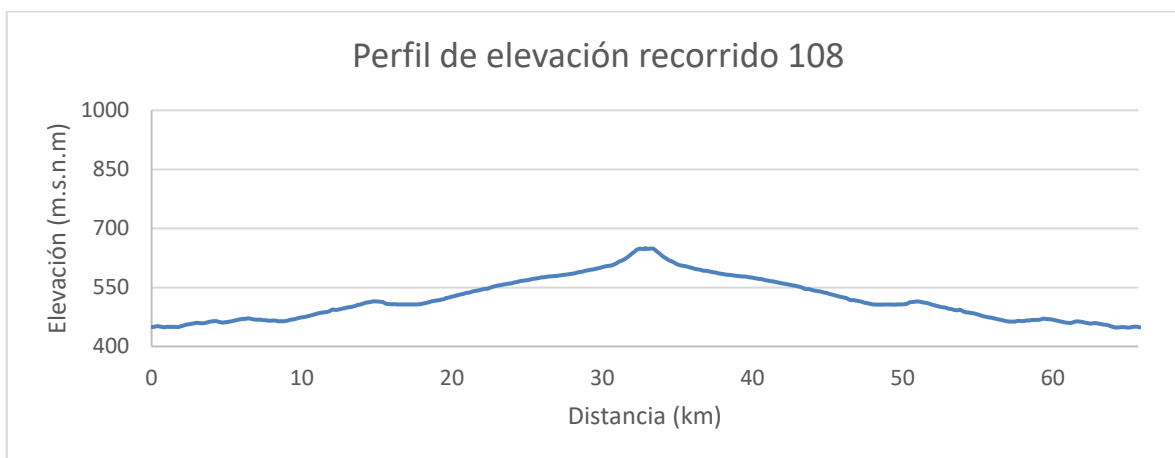


Figura 39: Perfil de elevación recorrido 108

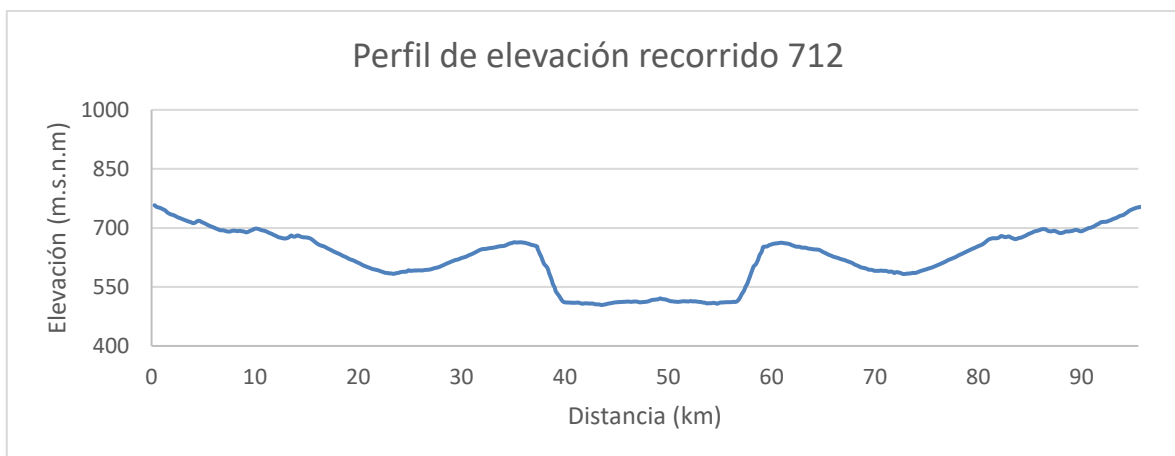


Figura 40: Perfil de elevación recorrido 712

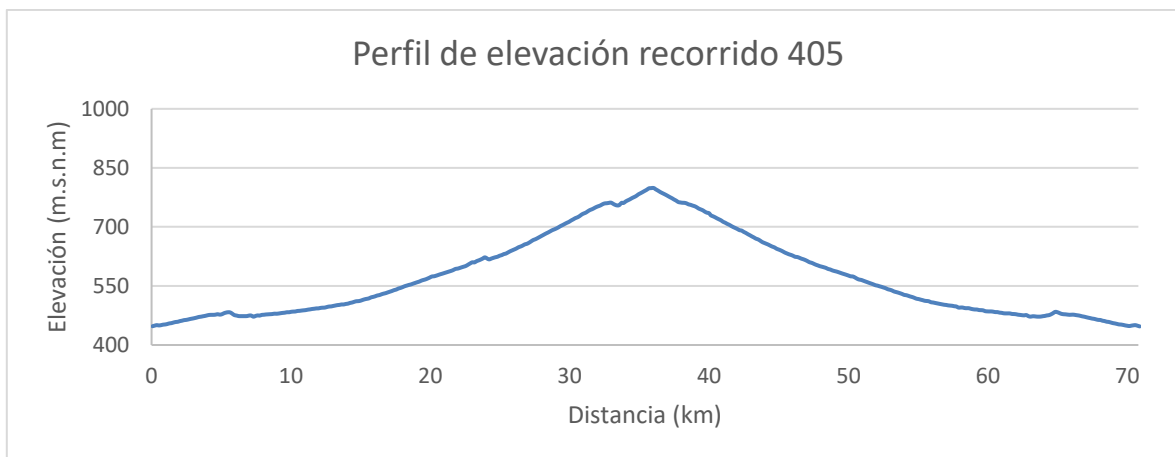


Figura 41: Perfil de elevación recorrido 405

6. Resultados

En esta sección se presentarán los resultados de la simulación para cada uno de los buses definidos en la sección 4. Los resultados obtenidos a partir de la simulación y asociados a cada uno de los modelos de buses seleccionados corresponden a:

6. Cantidad de hidrógeno que consume cada modelo de bus en cada uno de los recorridos
7. Rendimiento de cada modelo medido en kilogramos de hidrógeno consumidos cada 100 kilómetros
8. Cantidad de vueltas de autonomía
9. Tiempos de recarga relacionados con la norma SAE J2601/1-2, la cual define velocidades de dispensado de hidrógeno
10. Cálculo del consumo de la flota

Los puntos 1 a 4 de la lista previamente mencionada son independientes de la cantidad de buses que existen en la actualidad en cada uno de los recorridos, ya que dependen únicamente de la ruta y de las características del bus. En el punto 5 se calculan los consumos totales de hidrógeno de la flota de ese servicio, por lo cual se debe incluir un análisis respecto a la cantidad de veces que se realiza el recorrido, lo cual será mostrado en la sección 6.5.

6.1 Consumo de hidrógeno

En primera instancia, se presenta en la Tabla 7 el consumo de hidrógeno de los buses seleccionados en la 4. Estos resultados se obtuvieron a partir de las simulaciones generadas con las ecuaciones descritas de la sección de Metodología.

Recorrido	Distancia recorrida ¹⁸ [km]	Consumo de hidrógeno [kg-H ₂]			
		New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	55,8	4,5	6,2	3,9	4,3
210	55,8	4,7	6,5	4,1	4,4
216	59,7	4,5	6,3	4,0	4,2
G04	17,4	1,3	1,8	1,1	1,2
301	52,6	4,1	5,7	3,6	3,9
I09	38,3	3,1	4,3	2,7	2,9
I11	30,5	2,3	3,1	2,0	2,1
I18	43	3,2	4,5	2,8	3,0
428	67,3	5,5	7,5	4,7	5,0
107	73,1	5,7	7,8	5,0	5,4
502	60,3	5,2	7,4	4,5	4,9
504	63,2	5,4	7,6	4,7	5,0
516	57,4	5,7	8,1	4,9	5,3
407	62,2	5,0	7,0	4,3	4,7
C01	38,1	3,7	5,4	3,2	3,5
C03	30,7	2,9	4,0	2,5	2,7
C06	33,1	3,3	4,8	2,9	3,1
108	66,1	4,9	6,8	4,3	4,6
712	95,9	7,7	10,5	6,6	7,2
405	71	5,8	8,0	5,0	5,4

Tabla 7: Consumo de hidrógeno

Como se puede notar, es el bus New Flyer de 18,5 metros el que consume más hidrógeno al realizar el mismo recorrido que los otros modelos. Esto se explica porque es un bus más grande, lo que implica también un mayor peso del sistema, afectando así a las ecuaciones vistas en la sección de metodología.

Posteriormente, se encuentra el bus New Flyer de 12,5 metros, debido a que su peso es aproximadamente 2 toneladas mayor que lo declarado por Foton y Van Hool, lo cual al igual que en el caso anterior, afecta al consumo de energía. Finalmente, de los cuatro buses analizados, los que menos consumen hidrógeno son el bus Foton y el bus Van Hool.

Para poder establecer un marco comparativo de estos consumos en la sección de rendimiento (6.2) se parametrizará el resultado tanto en función de la distancia, como también en función de la cantidad nominal de pasajeros que puede transportar.

¹⁸ Distancia total, considera ida y vuelta

6.2 Rendimiento

El rendimiento de los distintos modelos de buses a hidrógeno se presenta en la Tabla 8, en este caso, el peor rendimiento se puede observar en el bus New Flyer de 18,5 m, seguido posteriormente por el bus New Flyer de 12,5 m, luego el bus Van Hool, y finalmente el bus Foton. En el caso del bus New Flyer de 18,5 metros se explica su peor rendimiento ya que es un bus de mayor tamaño.

Recorrido	Rendimiento [kg-H ₂ / 100 km]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	8,1	11,2	7,1	7,6
210	8,4	11,7	7,3	7,9
216	7,6	10,6	6,6	7,1
G04	7,3	10,1	6,4	6,9
301	7,9	10,8	6,9	7,4
I09	8,2	11,2	7,1	7,7
I11	7,4	10,2	6,4	6,9
I18	7,5	10,4	6,5	7,0
428	8,0	11,1	6,9	7,5
107	7,8	10,7	6,8	7,3
502	8,7	12,4	7,5	8,1
504	8,5	12,0	7,4	7,9
516	9,9	14,2	8,6	9,2
407	8,0	11,2	7,0	7,5
C01	9,8	14,3	8,5	9,1
C03	9,5	13,2	8,2	8,9
C06	10,1	14,4	8,7	9,4
108	7,5	10,3	6,5	7,0
712	8,0	11,0	6,9	7,5
405	8,1	11,3	7,0	7,6

Tabla 8: Rendimiento buses a hidrógeno cada 100 kilómetros

Dado que los buses presentados anteriormente cuentan con capacidades de transporte de pasajeros distinta, es que se puede incluir en el análisis de rendimiento la capacidad nominal de pasajeros con la que cuenta cada uno de los buses. Con esto, se puede calcular

el rendimiento de cada uno de los buses en términos de kilos de hidrógeno consumidos cada 100 kilómetros por capacidad nominal de pasajeros del bus. Este resultado puede ser observado en la Tabla 9:

Recorrido	Rendimiento [kg-H ₂ / 100 km / capacidad nominal pasajeros]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	0,098	0,089	0,084	0,094
210	0,102	0,093	0,087	0,097
216	0,091	0,084	0,079	0,088
G04	0,088	0,080	0,076	0,085
301	0,095	0,086	0,082	0,091
I09	0,098	0,089	0,084	0,095
I11	0,089	0,081	0,077	0,085
I18	0,090	0,082	0,078	0,087
428	0,096	0,088	0,082	0,092
107	0,094	0,085	0,081	0,090
502	0,104	0,098	0,090	0,100
504	0,103	0,096	0,088	0,098
516	0,120	0,113	0,102	0,114
407	0,097	0,089	0,083	0,093
C01	0,118	0,113	0,101	0,112
C03	0,115	0,104	0,098	0,110
C06	0,122	0,114	0,104	0,116
108	0,090	0,082	0,077	0,087
712	0,096	0,087	0,082	0,092
405	0,098	0,090	0,084	0,094

Tabla 9: Rendimiento buses a hidrógeno cada 100 kilómetros por capacidad nominal de pasajeros

En función de los resultados presentados en la Tabla 9 se puede notar que el bus con peor rendimiento corresponde al bus New Flyer de 12,5 m, lo cual se explica porque dentro del rango de los buses con 80 pasajeros es aquel que es más pesado, por lo cual se ve desfavorecido su rendimiento. Por el lado contrario, el mejor rendimiento se da en el bus Foton.

Los rendimientos obtenidos a partir de la simulación están en línea con lo reportado en otros proyectos, en donde se reportan rendimientos de entre 6,5 a 9 kg-H₂/100 km [31] [32].

6.3 Autonomía

Para el cálculo de la cantidad de vueltas máxima sin la necesidad de recargar se estableció que el bus no puede contar con menos de un 20% de su capacidad del tanque si desea iniciar una nueva vuelta. Este criterio de un 20% es el que se utiliza actualmente para el caso de los buses eléctricos a batería, y si bien en el caso del hidrógeno se podría llegar a una mayor profundidad de descarga del tanque, se recomienda mantener un margen mayor para evitar la posibilidad de que el bus se quede sin hidrógeno durante el servicio.

Recorrido	Autonomía [número de vueltas ¹⁹]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	6	8	7	7
210	6	7	7	6
216	6	7	7	7
G04	23	27	27	25
301	7	8	8	7
I09	9	11	11	10
I11	13	15	15	14
I18	9	10	10	10
428	5	6	6	6
107	5	6	6	5
502	5	6	6	6
504	5	6	6	6
516	5	6	6	5
407	6	7	7	6
C01	8	9	9	8
C03	9	12	12	10
C06	9	10	10	9
108	6	7	7	6
712	4	4	4	4
405	5	6	6	5

Tabla 10: Autonomía buses a hidrógeno

¹⁹ Ida y vuelta

6.4 Tiempo de carga

El análisis de carga se realizó bajo 3 flujos posibles de hidrógeno definidos por la norma SAE J2601/1-2, la cual define las velocidades de dispensado de hidrógeno y establece que se pueden realizar cargas de 30 g/s (Tabla 11), 60 g/s (Tabla 12), y la carga rápida de 120 g/s (Tabla 13). La cantidad de hidrógeno a recargar se consideró como la diferencia entre el tanque completo y el hidrógeno remanente después de realizar la cantidad de vueltas presentadas en la Tabla 10.

Recorrido	Tiempo (30 g/s) [min]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	15,1	27,7	16,8	16,8
210	15,7	25,5	14,9	14,9
216	15,1	24,6	16,7	16,7
G04	16,2	26,5	16,8	16,8
301	16,1	25,3	15,4	15,4
I09	15,6	26,1	16,6	16,6
I11	16,3	26,0	16,7	16,7
I18	16,1	24,8	17,1	17,1
428	14,9	24,9	17,0	17,0
107	15,9	26,0	15,2	15,2
502	14,5	24,8	16,5	16,5
504	15,0	25,4	17,0	17,0
516	15,8	27,1	15,0	15,0
407	16,6	27,1	15,8	15,8
C01	16,6	27,2	15,6	15,6
C03	14,6	26,9	15,5	15,5
C06	16,7	26,5	15,8	15,8
108	16,5	26,4	15,7	15,7
712	12,8	23,4	16,2	16,2
405	16,0	26,7	15,3	15,3

Tabla 11: Tiempos de carga para buses a hidrógeno velocidad 30 g/s

Recorrido	Tiempo (60 g/s) [min]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	7,6	13,9	7,5	8,4
210	7,8	12,7	7,8	7,4
216	7,5	12,3	7,5	8,4
G04	8,1	13,2	8,2	8,4
301	8,0	12,7	7,9	7,7
I09	7,8	13,1	8,2	8,3
I11	8,1	13,0	8,1	8,3
I18	8,1	12,4	7,7	8,5
428	7,4	12,4	7,6	8,5
107	7,9	13,0	8,1	7,6
502	7,3	12,4	7,4	8,3
504	7,5	12,7	7,7	8,5
516	7,9	13,6	8,1	7,5
407	8,3	13,5	8,3	7,9
C01	8,3	13,6	7,9	7,8
C03	7,3	13,5	8,3	7,7
C06	8,4	13,3	7,9	7,9
108	8,2	13,2	8,2	7,9
712	6,4	11,7	7,2	8,1
405	8,0	13,4	8,2	7,6

Tabla 12: Tiempos de carga para buses a hidrógeno velocidad 60 g/s

Recorrido	Tiempo (120 g/s) [min]			
	New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton	Van Hool
203	3,8	6,9	3,8	4,2
210	3,9	6,4	3,9	3,7
216	3,8	6,2	3,8	4,2
G04	4,1	6,6	4,1	4,2
301	4,0	6,3	3,9	3,8
I09	3,9	6,5	4,1	4,1
I11	4,1	6,5	4,0	4,2
I18	4,0	6,2	3,8	4,3
428	3,7	6,2	3,8	4,3
107	4,0	6,5	4,1	3,8
502	3,6	6,2	3,7	4,1
504	3,7	6,3	3,8	4,3
516	4,0	6,8	4,0	3,7
407	4,2	6,8	4,1	4,0
C01	4,1	6,8	4,0	3,9
C03	3,6	6,7	4,1	3,9
C06	4,2	6,6	3,9	4,0
108	4,1	6,6	4,1	3,9
712	3,2	5,8	3,6	4,1
405	4,0	6,7	4,1	3,8

Tabla 13: Tiempos de carga para buses a hidrógeno velocidad 120 g/s

6.5 Consumo de hidrógeno diario para la flota

El análisis previo es a partir de la perspectiva de un único bus, no obstante, en este estudio se busca analizar el comportamiento de la flota, por lo que previo a los resultados de la simulación se muestra en la Tabla 14 el total de salidas²⁰ de buses para los recorridos estudiados para los días laborales (lunes-viernes), sábado y domingo. Esta información es relevante ya que se utilizará para la determinación del consumo total de hidrógeno diario

²⁰ El total de salidas se refiere a la cantidad de veces que se realiza el servicio en cada una de las direcciones.

en cada uno de los recorridos, debido a que a partir de la cantidad de salidas es que se puede multiplicar este valor con el consumo de hidrógeno en la ruta determinado en la Tabla 7. Esta información se obtuvo a partir de lo entregado por el MTT.

Recorrido	Laboral	Sábado	Domingo
203 ida	127	132	114
203 ret	125	132	114
210 ida	178	135	109
210 ret	181	136	109
216 ida	171	111	91
216 ret	164	113	94
G04 ida	182	120	96
G04 ret	188	119	96
301 ida	318	149	120
301 ret	325	158	120
I09 ida	261	134	99
I09 ret	259	125	96
I11 ida	140	75	72
I11 ret	139	75	73
I18 ida	83	71	54
I18 ret	87	74	57
428 ida	142	117	105
428 ret	158	123	106
107 ida	151	107	75
107 ret	154	108	75

Recorrido	Laboral	Sábado	Domingo
502 ida	170	97	83
502 ret	165	94	83
504 ida	111	82	70
504 ret	113	85	73
516 ida	197	101	96
516 ret	195	102	96
407 ida	159	84	77
407 ret	159	84	78
C01 ida	188	140	101
C01 ret	187	140	99
C03 ret ²¹	96	87	61
C06 ida	124	73	64
C06 ret	124	73	64
108 ida	113	86	66
108 ret	107	86	66
712 ida	112	86	85
712 ret	107	87	85
405 ida	140	128	97
405 ret	141	124	97

Tabla 14: Salida de buses días laborales, sábado y domingo en recorridos a estudiar

En función de la Tabla 14 se puede determinar la cantidad de hidrógeno requerido por día para cada uno de estos recorridos y para cada uno de los modelos de buses analizados. El resultado para estos puede ser observado de la Tabla 15 a 18.

²¹ El recorrido C03 solo cuenta con recorrido de retorno, y no de ida.

Recorrido	Laboral [kg-H₂/día]	Sábado [kg-H₂/día]	Domingo [kg-H₂/día]
203	573	600	518
210	843	637	513
216	760	506	418
G04	234	152	120
301	1329	633	496
I09	814	408	306
I11	314	169	163
I18	273	233	178
428	800	641	565
107	870	614	428
502	881	502	434
504	601	447	382
516	1119	577	547
407	794	419	386
C01	700	522	374
C03	280	254	178
C06	414	244	214
108	547	425	326
712	835	669	650
405	809	730	559

Tabla 15: Consumos totales por recorrido con bus New Flyer Xcelsior CHARGE H2 de 12,5 metros

Recorrido	Laboral [kg-H₂/día]	Sábado [kg-H₂/día]	Domingo [kg-H₂/día]
203	786	823	711
210	1173	886	713
216	1063	708	584
G04	324	211	166
301	1829	872	683
I09	1111	557	418
I11	435	234	226
I18	378	323	247
428	1113	893	787
107	1186	837	584
502	1256	716	618
504	850	631	540
516	1599	824	781
407	1108	585	539
C01	1021	762	546
C03	388	351	246
C06	592	348	305
108	752	584	448
712	1148	920	895
405	1124	1016	777

Tabla 16: Consumos totales por recorrido con bus New Flyer Xcelsior CHARGE H2 de 18,5 metros

Recorrido	Laboral [kg-H₂/día]	Sábado [kg-H₂/día]	Domingo [kg-H₂/día]
203	497	521	450
210	730	552	444
216	663	442	365
G04	204	133	104
301	1159	553	433
I09	707	354	266
I11	274	147	143
I18	238	203	155
428	695	558	491
107	757	534	373
502	765	437	377
504	522	388	332
516	966	498	472
407	689	364	335
C01	605	452	324
C03	243	220	154
C06	357	210	184
108	475	369	284
712	723	579	563
405	702	634	485

Tabla 17: Consumos totales por recorrido con bus Foton de 12,5 metros

Recorrido	Laboral [kg-H ₂ /día]	Sábado [kg-H ₂ /día]	Domingo [kg-H ₂ /día]
203	536	561	485
210	786	594	478
216	711	474	391
G04	220	143	112
301	1245	594	465
I09	763	382	287
I11	294	158	153
I18	256	219	167
428	749	601	529
107	815	575	402
502	820	468	404
504	561	417	357
516	1039	536	508
407	743	392	361
C01	648	484	347
C03	263	238	167
C06	386	227	199
108	513	399	306
712	782	626	609
405	758	684	524

Tabla 18: Consumos totales por recorrido con bus Van Hool A330 de 13,1 metros

6.5.1 Resumen consumos de hidrógeno diario

En la Tabla 19 se puede observar un resumen del consumo de hidrógeno diario, considerando únicamente el peor caso, es decir, aquel día en donde se consume la mayor

cantidad de hidrógeno²². Como se puede desprender de la tabla, el mayor consumo de hidrógeno ocurre en el bus New Flyer de 18,5 metros, lo cual se explica principalmente por ser un bus más grande, lo que implica también un mayor peso del sistema, afectando así a las ecuaciones vistas en la sección de metodología.

Posteriormente, se encuentra el bus New Flyer de 12,5 metros, debido a que su peso es aproximadamente 2 toneladas mayor que lo declarado por Foton y Van Hool, lo cual al igual que en el caso anterior, afecta al consumo de energía. Finalmente, de los cuatro buses analizados, los que menos consumen hidrógeno son el bus Foton y el bus Van Hool.

Recorrido	Kilómetros diarios totales recorridos [km]	Consumo hidrógeno diario [kg-H ₂ /día]				
		New Flyer 12,5 m	New Flyer 18,5 m	Foton 12,5 m	Van Hool 13,1 m	Promedio consumo de hidrógeno diario [kg-H ₂ /día]
203	7.031	600	823	521	561	626
210	10.016	843	1.173	730	786	883
216	10.000	760	1.063	663	711	799
G04	3.219	234	324	204	220	246
301	16.911	1.329	1.829	1.159	1.245	1.391
I09	9.958	814	1.111	707	763	849
I11	4.255	314	435	274	294	329
I18	3.655	273	378	238	256	286
428	10.095	800	1.113	695	749	839
107	11.148	870	1.186	757	815	907
502	10.101	881	1.256	765	820	931
504	7.079	601	850	522	561	634
516	11.251	1.119	1.599	966	1.039	1.181
407	9.890	794	1.108	689	743	834
C01	7.144	700	1.021	605	648	744
C03	1.474	280	388	243	263	294
C06	4.105	414	592	357	386	437
108	7.271	547	752	475	513	572
712	10.501	835	1.148	723	782	872
405	9.976	809	1.124	702	758	848

Tabla 19: Consolidado consumos de hidrógeno diario

²² El peor caso de consumo de hidrógeno diario se puede obtener de la información presentada de la Tabla 15 a la 18, en donde se presenta el consumo de hidrógeno diario para cada uno de los recorridos, tanto para días laborales, sábado y domingo.

6.6 Infraestructura

Teniendo ya el consumo de hidrógeno de toda la flota para cada uno de los recorridos es que se analizará la infraestructura necesaria para el repostaje en función de los requerimientos de hidrógeno para las rutas analizadas. La idea de esto es comparar dos escenarios posibles de producción; el primero, en donde se produce únicamente a partir de energía solar, y el segundo, donde el electrolizador está conectado a la matriz energética, teniendo así una fuente energética de forma continua, es decir, 24/7.

A continuación, se verá el dimensionamiento del electrolizador, el cual es el equipo productor de hidrógeno. Para realizar esto se consideró la demanda de hidrógeno en el peor día, es decir, aquel día con el mayor consumo de hidrógeno. Esta definición permite que siempre se pueda satisfacer la demanda de hidrógeno con la producción diaria, sin tener que depender de hidrógeno traído de forma externa.

Para el dimensionamiento del electrolizador se consideran dos escenarios:

- 1. Electrolizador conectado a un sistema de producción solar:** en este caso, el hidrógeno está conectado a una planta fotovoltaica, lo cual tiene como implicancias que, por ejemplo, el electrolizador únicamente operará en las horas en donde exista disponibilidad solar, lo cual está relacionado con el factor planta²³. En este trabajo se consideró el factor planta en el peor caso, lo cual ocurre en invierno (junio) cuando la disponibilidad solar es la menor del año. Lo anterior se calculó a través del Explorador Solar del Ministerio de Energía, localizando una planta de producción solar en la comuna de Pudahuel, obteniendo un factor planta de un 14% con paneles solares bifaciales.

En la Figura 42 se puede observar el perfil de producción de energía solar en Pudahuel. Tal como se puede desprender de la figura, existe una alta variabilidad a lo largo de los meses. Por ejemplo, en enero en un día promedio se producen 273 kWh, mientras que junio únicamente 140 kWh. Esto implica que, si el electrolizador opera a su máxima capacidad mientras exista energía solar disponible, dado que el diseño está considerando el peor caso (junio), en el resto de los meses se producirá más hidrógeno que el requerido, lo cual conlleva desafíos asociados a la búsqueda de nuevos consumidores para esos periodos.

²³ El factor planta es la división entre la energía real generada y la energía generada si se hubiese trabajado a plena carga.

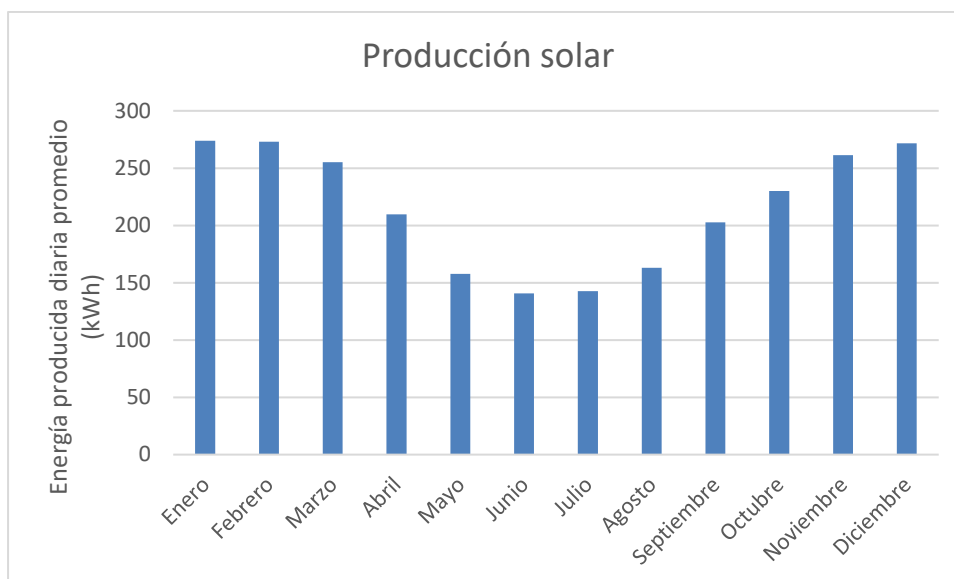


Figura 42: Producción solar de energía en Pudahuel [33]

- 2. Electrolizador conectado a la red:** una segunda alternativa y con el objeto de eliminar la variabilidad asociada a la producción de energía a partir de paneles solares es el uso de electrolizadores que estén conectados a la red. Esto podría permitir que el electrolizador operase de forma continua. La desventaja de esto es que, debido a que la matriz energética del país no es 100% limpia²⁴, se generarían emisiones de CO₂. En el caso del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), su factor de emisión promedio para el año 2021 fue de 0,4187 t-CO₂eq/MWh [34]. El efecto de esto se verá con mayor detalle en la sección de reducción de emisiones (sección 6.7). Una variante, que permite obtener energía de forma continua y limpia es la contratación de un PPA²⁵ verde.

La principal diferencia entre uno y otro para el electrolizador es que, dado que el primero está limitado a las horas solares, para poder cumplir con la demanda de hidrógeno, se va a requerir un sistema mucho más grande de producción de hidrógeno, lo que implica un mayor costo asociado al sistema. Un electrolizador en la actualidad tiene un costo promedio de 1.500.000 USD/MW y se espera pueda alcanzar los 450.000 USD/MW en los próximos 10 años [35].

²⁴ En la actualidad, cerca de un 55% de la energía del país proviene de fuentes térmicas (carbón, gas natural, petróleo), mientras que un poco más del 20% se produce a partir de energía solar o eólica.

²⁵ De manera simplificada, un PPA (Power Purchase Agreement en sus siglas en inglés) o Acuerdo de Compra de Energía es un contrato de compraventa para adquirir energía directamente a un productor independiente, durante un período de tiempo determinado y a un precio acordado que es rentable para ambas partes [41].

Lo anterior queda evidenciado en la Tabla 20 en la cual se muestran los resultados asociados al dimensionamiento del electrolizador para ambos escenarios, es decir, aquel en donde el suministro eléctrico es únicamente a partir de energía solar y el otro en donde el sistema se encuentra conectado a la red (24/7). Lo que es relevante de analizar es que, si se decide la instalación de un electrolizador cuya única fuente energética sea la energía solar, se va a requerir de un sistema de producción de hidrógeno 6 veces mayor respecto al caso en donde se tuviese un suministro eléctrico constante, lo cual repercute directamente en una inversión que se verá amplificada 6 veces.

Otras alternativas que se pudiesen analizar en el futuro es generar una combinación de suministros, en donde, por ejemplo, se dimensione un electrolizador considerando la disponibilidad solar para los meses de verano, y que, para los meses de invierno, se pueda utilizar la energía de la red para suplir la energía solar faltante.

Recorrido	New Flyer 12,5 m		New Flyer 18,5 m		Foton		Van Hool	
	Ez ²⁶ (solar) [MW]	Ez (24/7) [MW]	Ez (solar) [MW]	Ez (24/7) [MW]	Ez (solar) [MW]	Ez (24/7) [MW]	Ez (solar) [MW]	Ez (24/7) [MW]
203	8,1	1,4	11,1	1,9	7,0	1,2	7,6	1,3
210	11,4	1,9	15,8	2,7	9,8	1,7	10,6	1,8
216	10,2	1,7	14,3	2,4	8,9	1,5	9,6	1,6
G04	3,1	0,5	4,4	0,7	2,8	0,5	3,0	0,5
301	17,9	3,0	24,7	4,2	15,6	2,7	16,8	2,9
I09	11,0	1,9	15,0	2,5	9,5	1,6	10,3	1,7
I11	4,2	0,7	5,9	1,0	3,7	0,6	4,0	0,7
I18	3,7	0,6	5,1	0,9	3,2	0,5	3,5	0,6
428	10,8	1,8	15,0	2,6	9,4	1,6	10,1	1,7
107	11,7	2,0	16,0	2,7	10,2	1,7	11,0	1,9
502	11,9	2,0	16,9	2,9	10,3	1,8	11,1	1,9
504	8,1	1,4	11,5	1,9	7,0	1,2	7,6	1,3
516	15,1	2,6	21,6	3,7	13,0	2,2	14,0	2,4
407	10,7	1,8	14,9	2,5	9,3	1,6	10,0	1,7
C01	9,4	1,6	13,8	2,3	8,2	1,4	8,7	1,5
C03	3,8	0,6	5,2	0,9	3,3	0,6	3,5	0,6
C06	5,6	0,9	8,0	1,4	4,8	0,8	5,2	0,9
108	7,4	1,3	10,1	1,7	6,4	1,1	6,9	1,2
712	11,3	1,9	15,5	2,6	9,7	1,7	10,5	1,8
405	10,9	1,9	15,2	2,6	9,5	1,6	10,2	1,7

Tabla 20: Dimensionamiento electrolizador para el caso solar y suministro constante

6.7 Reducción de emisiones

En esta sección se analizará la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como también la reducción de emisiones de ruido por el uso de buses a hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano. En el caso de los GEI la comparación se realizará considerando las emisiones producidas por la combustión del diésel y las emisiones generadas a partir de la producción de hidrógeno o energía en el caso de los buses eléctricos a batería, asumiendo que el proceso puede ser realizado a partir de la energía de la matriz.

²⁶ Ez: Electrolizador

Para el caso de las emisiones de ruido únicamente se realizará un análisis de las emisiones de un bus diésel y un bus de hidrógeno. Para este caso se utilizarán mediciones de ruido a una distancia de 7,5 metros.

6.7.1 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Los recorridos del sistema que están operando en la actualidad son realizados por distintos tipos de tecnología, entre los cuales hay buses eléctricos a batería y buses con norma Euro III, Euro V y Euro VI²⁷. Con el objetivo de determinar las emisiones propias del recorrido es que en primera instancia se debe determinar la proporción de cada una de las tecnologías. Para esto, se realizó un conteo de los buses que realizan el servicio en cada uno de los recorridos estudiados, obteniendo los resultados observados en la Tabla 21, en donde se puede observar que recorridos como el servicio 108 son únicamente realizados por buses eléctricos a batería, por lo que no se generan emisiones en el bus propiamente tal, no obstante, en estos casos sí se consideran emisiones por la energía generada para cargar estos buses.

Recorrido	Eléctrico	EPA 98 o Euro III F	Euro V	Euro VI
203	0%	43%	3%	54%
210	0%	9%	0%	91%
216	0%	0%	0%	100%
G04	0%	100%	0%	0%
301	0%	93%	7%	0%
I09	97%	0%	1%	1%
I11	84%	0%	12%	4%
I18	22%	0%	76%	3%
428	0%	72%	29%	0%
107	0%	16%	5%	80%
502	0%	90%	9%	1%
504	11%	64%	14%	11%
516	75%	15%	9%	1%
407	74%	14%	6%	7%
C01	5%	71%	16%	8%
C03	33%	60%	5%	2%

²⁷ Una norma europea sobre emisiones contaminantes es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea

C06	30%	56%	9%	6%
108	100%	0%	0%	0%
712	0%	0%	38%	62%
405	2%	0%	0%	98%

Tabla 21: Proporción de buses por recorrido

Por otra parte, si se considera la cantidad de salidas por cada uno de los recorridos presentados en la Tabla 14 y la distancia de cada uno de estos indicada en la Tabla 6, se puede calcular la cantidad de kilómetros recorridos, los cuales se presentan en la Tabla 22.

Recorrido	Día Laboral [km]	Sábado [km]	Domingo [km]	Total semanal [km] ²⁸
203	7.031	7.366	6.361	48.881
210	10.016	7.561	6.082	63.724
216	10.000	6.687	5.523	62.208
G04	3.219	2.080	1.627	19.801
301	16.911	8.074	6.312	98.941
I09	9.958	4.960	3.735	58.484
I11	4.255	2.288	2.212	25.773
I18	3.655	3.118	2.387	23.779
428	10.095	8.076	7.100	65.651
107	11.148	7.859	5.483	69.080
502	10.101	5.759	5.005	61.265
504	7.079	5.277	4.519	45.188
516	11.251	5.826	5.511	67.589
407	9.890	5.225	4.821	59.495
C01	7.144	5.334	3.810	44.863
C03	1.474	1.336	937	9.640
C06	4.105	2.417	2.119	25.057
108	7.271	5.685	4.363	46.402
712	10.501	8.392	8.152	69.048
405	9.976	8.946	6.887	65.711

Tabla 22: Distancia recorrido por los servicios analizados en una semana

²⁸ Para el total se asume que se recorre exactamente la misma cantidad de kilómetros en los días laborales, por lo cual este valor sería calculado como 5 veces la cantidad de kilómetros recorridos en un día laboral más la suma del día sábado y domingo.

En la actualidad el MTT cuenta con la información asociada al rendimiento²⁹ de los buses tipo Euro VI, por lo cual se calculará las emisiones asumiendo que este valor es similar para los buses Euro III y Euro V, lo cual en la realidad no es necesariamente cierto, por lo que se propone que en estudios futuros se realice el cálculo de emisiones considerando los rendimientos diferenciados por tipo de norma.

En términos de rendimiento, el MTT declara que el rendimiento promedio de los buses del sistema en base a diésel varía entre 1 km/l a 1,55 km/l, con un promedio de 1,29 km/l. Mientras que en el caso de los buses eléctricos a batería el consumo varía entre 1,13 kWh/km a 2,67 kWh/km, con una media de 1,57 kWh/km [36].

En el caso de los buses diésel sus emisiones pueden ser calculadas a partir de la contribución que generan principalmente tres agentes contaminantes; dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄). Para el cálculo de las emisiones directas de CO₂ se utilizan los rendimientos del combustible declarados por el MTT, mientras que en el caso del N₂O y CH₄, se utilizan los valores sugeridos por el software COPERT [37]. Por lo tanto, los factores de emisión, expresados en términos de CO₂ equivalente³⁰, vienen dados por la Tabla 23.

	Mínimo [g-CO₂e / km]	Media [g-CO₂e / km]	Máximo [g-CO₂e / km]
Euro VI	1730	2071	2675

Tabla 23: Factor de emisión para buses Euro VI

Considerando la distancia recorrida, el factor de emisión, y la distribución de la tecnología por recorrido se puede obtener la cantidad de emisiones equivalentes de los buses de combustión interna generadas en cada servicio, lo cual puede ser observado en la Tabla 24.

²⁹ El rendimiento se calcula a partir de la resolución exenta N°2243, la cual define el protocolo técnico para obtener el consumo energético en buses de transporte público urbano de la ciudad de Santiago. [42]

³⁰ Un equivalente de dióxido de carbono, abreviado como CO₂e es una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios gases de efecto invernadero sobre la base de su potencial de calentamiento global (PCG), convirtiendo las cantidades de otros gases en la cantidad equivalente de dióxido de carbono con el mismo potencial de calentamiento global.

Recorrido	Laboral [t-CO ₂ e]	Sábado [t-CO ₂ e]	Domingo [t-CO ₂ e]	Total [t-CO ₂ e]
203	14,5	15,2	13,2	101
210	20,7	15,6	12,6	132
216	20,7	13,8	11,4	129
G04	6,7	4,3	3,4	41
301	35,0	16,7	13,1	205
I09	0,5	0,3	0,2	3
I11	1,4	0,8	0,7	9
I18	5,9	5,0	3,9	38
428	20,9	16,7	14,7	136
107	23,0	16,2	11,3	143
502	20,9	11,9	10,3	127
504	13,0	9,7	8,3	83
516	5,8	3,0	2,8	35
407	5,3	2,8	2,6	32
C01	14,0	10,5	7,5	88
C03	2,0	1,8	1,3	13
C06	6,0	3,5	3,1	36
108	0,0	0,0	0,0	0
712	21,7	17,4	16,9	143
405	20,3	18,2	14,0	134

Tabla 24: Emisiones por combustión por servicio

En el caso de los buses de hidrógeno y buses eléctricos a batería no se generan emisiones por combustión, no obstante, sí se generan emisiones para producir la energía que requieren estos sistemas cuando esta es producida a través de la matriz energética del país, la cual en la actualidad no es 100% limpia.

Por otra parte, para el caso de los buses eléctricos a batería, asumiendo que no existe ninguna otra pérdida de energía, y que el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es de 0,3907 t-CO₂e/MWh [34], se obtiene que los buses eléctricos a batería generarían emisiones asociadas a la producción de energía requerida para cargar estos sistemas en promedio de 657 gramos de CO₂ cada 1 kilómetro. Lógicamente, si los buses están cargados únicamente por energía renovable, o un mix entre energía renovable y la

matriz energética, se podría reducir el nivel de emisión. Esto ocurre, por ejemplo, en el terminal El Conquistador, el cual cuenta con un parque solar para la autogeneración de energía y posterior carga de buses eléctricos a batería [38].

	Mínimo [g-CO ₂ e / km]	Media [g-CO ₂ e / km]	Máximo [g-CO ₂ e / km]
Eléctrico	441	613	1043

Tabla 25: Factor de emisión buses eléctrico a batería

En el caso de la tecnología con hidrógeno, en la sección 6 se analizó el rendimiento de los buses de hidrógeno, por lo cual, asumiendo una eficiencia del sistema de producción de hidrógeno de 55 kWh/kg-H₂ y el mismo factor de emisión de la matriz mostrado anteriormente, se obtiene que las emisiones equivalentes asociadas a los distintos buses de hidrógeno vienen dadas por la Tabla 26.

Recorrido	Emisiones			
	New Flyer 12,5 m [g-CO ₂ e / km]	New Flyer 18,5 m [g-CO ₂ e / km]	Foton 12,5 m [g-CO ₂ e / km]	Van Hool 13,1 m [g-CO ₂ e / km]
203	1749	2401	1519	1638
210	1811	2521	1569	1689
216	1629	2277	1422	1523
G04	1567	2178	1369	1473
301	1690	2326	1474	1583
I09	1756	2397	1524	1645
I11	1588	2196	1385	1483
I18	1613	2231	1402	1511
428	1711	2383	1488	1603
107	1679	2289	1461	1574
502	1863	2654	1619	1735
504	1831	2588	1590	1707
516	2133	3046	1841	1981
407	1725	2407	1497	1614
C01	2104	3068	1819	1949
C03	2043	2827	1770	1915
C06	2168	3098	1871	2019
108	1607	2207	1397	1507
712	1714	2358	1484	1606
405	1744	2425	1514	1635

Tabla 26: Emisiones buses a hidrógeno

En la Figura 43 se puede observar una comparación del nivel de emisiones por kilómetro a partir del uso de distintos tipos de tecnología y su fuente energética asociada, es importante mencionar que en este análisis solo se consideran las emisiones de los buses en su fase de uso y no se consideran otras fuentes de emisión, tal como podrían ser las emisiones generadas a partir de la producción de materiales requeridos para el desarrollo de baterías y/o electrolizadores. De la figura se puede desprender que las emisiones para los buses de hidrógeno, considerando el caso en donde el hidrógeno es producido con un electrolizador conectado a la red puede inclusive aumentar las emisiones en el sistema.

A partir de lo anterior, y con el objetivo de limitar las emisiones, es que el despliegue de buses de hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano debe ir acompañado con una estrategia para que la fuente energética de los electrolizadores provenga de energías limpias.

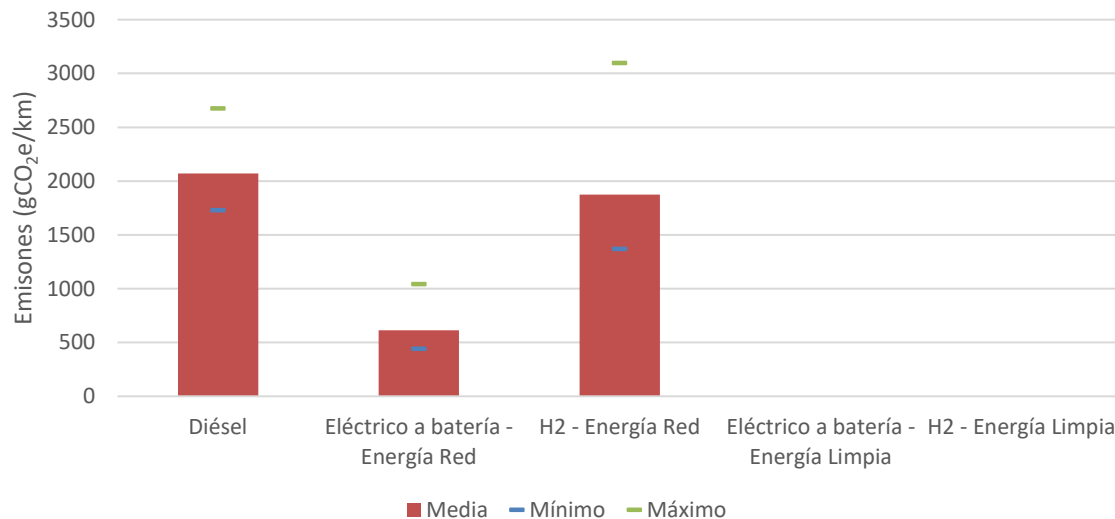


Figura 43: Emisiones por tecnología y fuente energética (g-CO₂e/km) (Elaboración propia)

6.7.2 Reducción de emisiones de ruido

Otra ventaja de los buses de hidrógeno, al ser un sistema eléctrico, al igual que los buses eléctricos a batería, es que sus emisiones de ruido son menores que los sistemas diésel. En la Figura 44 se pueden observar las mediciones de ruido de forma aislada de un bus diésel (Euro V) y un bus de hidrógeno a una distancia de 7,5 metros. A menores velocidades el bus de hidrógeno genera menos ruido que un bus diésel, ya que sus componentes eléctricos

son más silenciosos. No obstante, a medida que se aumenta la velocidad y al alcanzar una velocidad de 50 km/h no se observa diferencia entre el bus de hidrógeno y el bus diésel, lo cual se explica principalmente porque a esa velocidad es el sonido del movimiento el que predomina y no los componentes propiamente tal.

En este caso no se incluye el análisis de caso de los buses eléctrico a batería, ya que, dado que las emisiones de ruido provienen principalmente del motor, y como tanto los buses eléctricos a batería y los buses a hidrógeno cuentan con un motor eléctrico, las emisiones de ruido son similares.

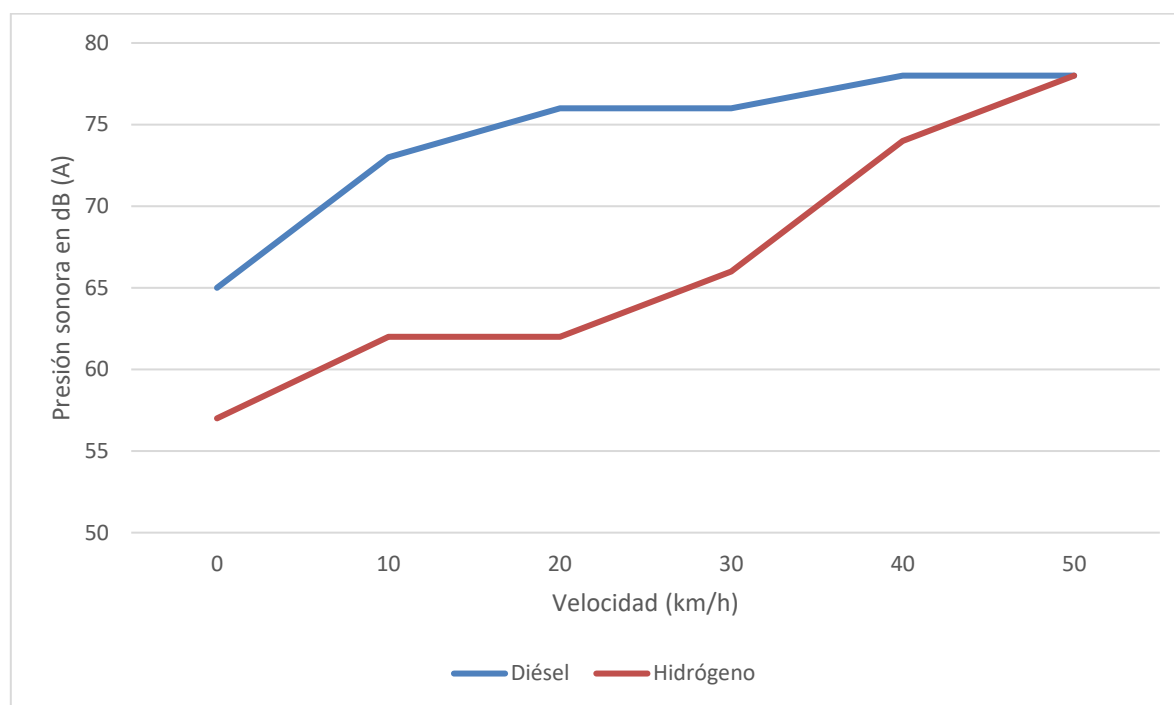


Figura 44: Presión sonora medida a 7,5 metros en buses diésel y buses de hidrógeno [39]

La relevancia de esto es que el ruido puede generar efectos en la salud de las personas, que van desde una molestia común hasta problemas cardiovasculares [40]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que para el tráfico en la ciudad el nivel de ruido durante el día debiese ser menor a 53 dB, mientras que durante la noche debiese ser menor a 45 dB [41]. Si bien de la Figura 44 se puede desprender que con los buses de hidrógeno por sí solos no se logra llegar a los niveles alcanzados por la OMS, de todas maneras, pueden contribuir, en conjunto con otras políticas, para la reducción de ruido en la ciudad especialmente considerando los niveles de emisión de ruido ya existentes.

En el año 2016 el Ministerio del Medio Ambiente desarrolló un Mapa de Ruido del Gran Santiago, tanto para el caso diurno como para el caso nocturno, los cuales pueden ser observados en la Figura 45 y Figura 46 respectivamente. De ellos se puede desprender que existen algunos sectores en donde las emisiones de ruido son particularmente altas respecto al resto de la ciudad, como lo es, por ejemplo, la Avenida Libertador Bernardo O'Higgins.

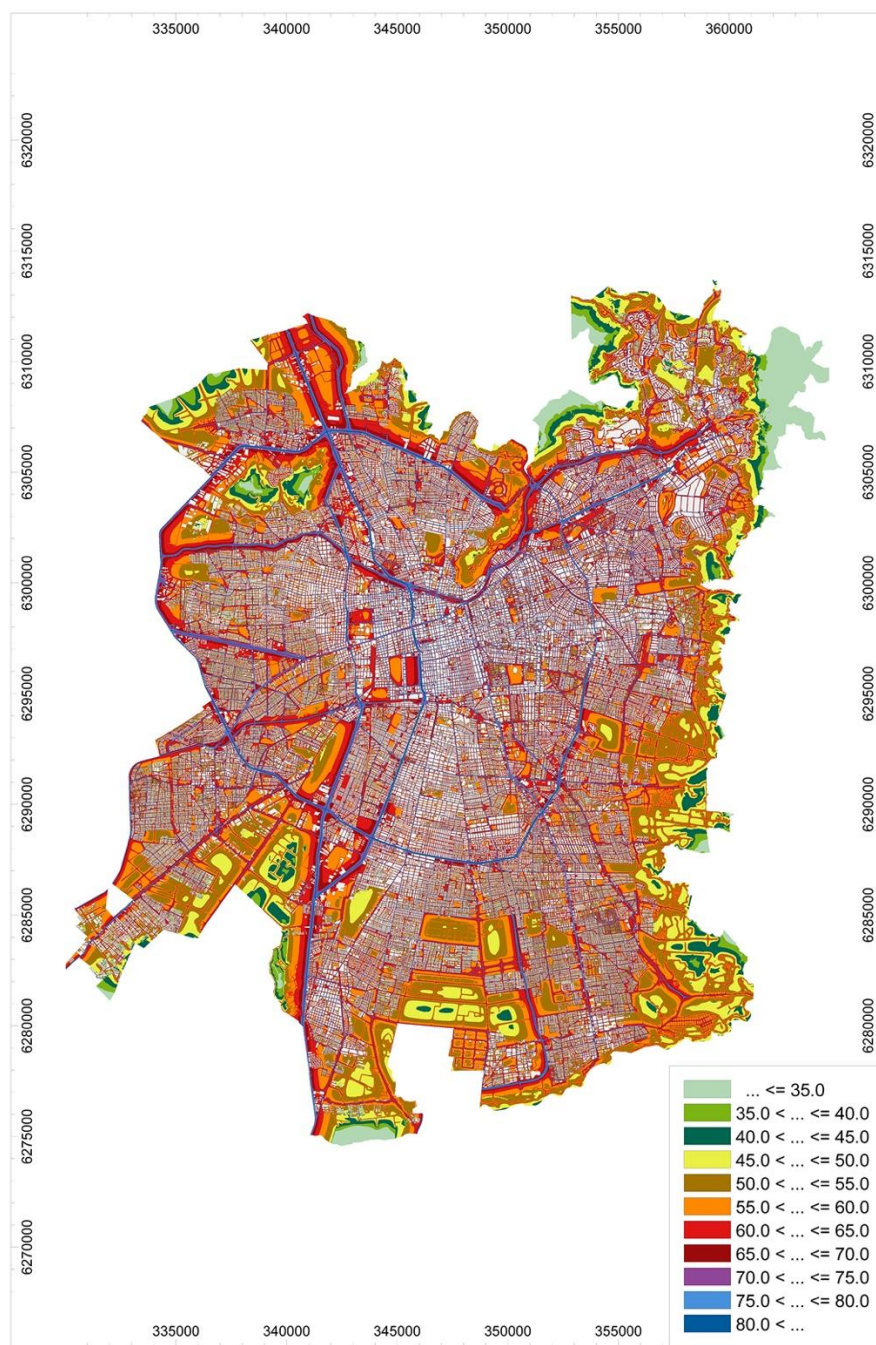


Figura 45: Mapa de Ruido del Gran Santiago diurno [42]

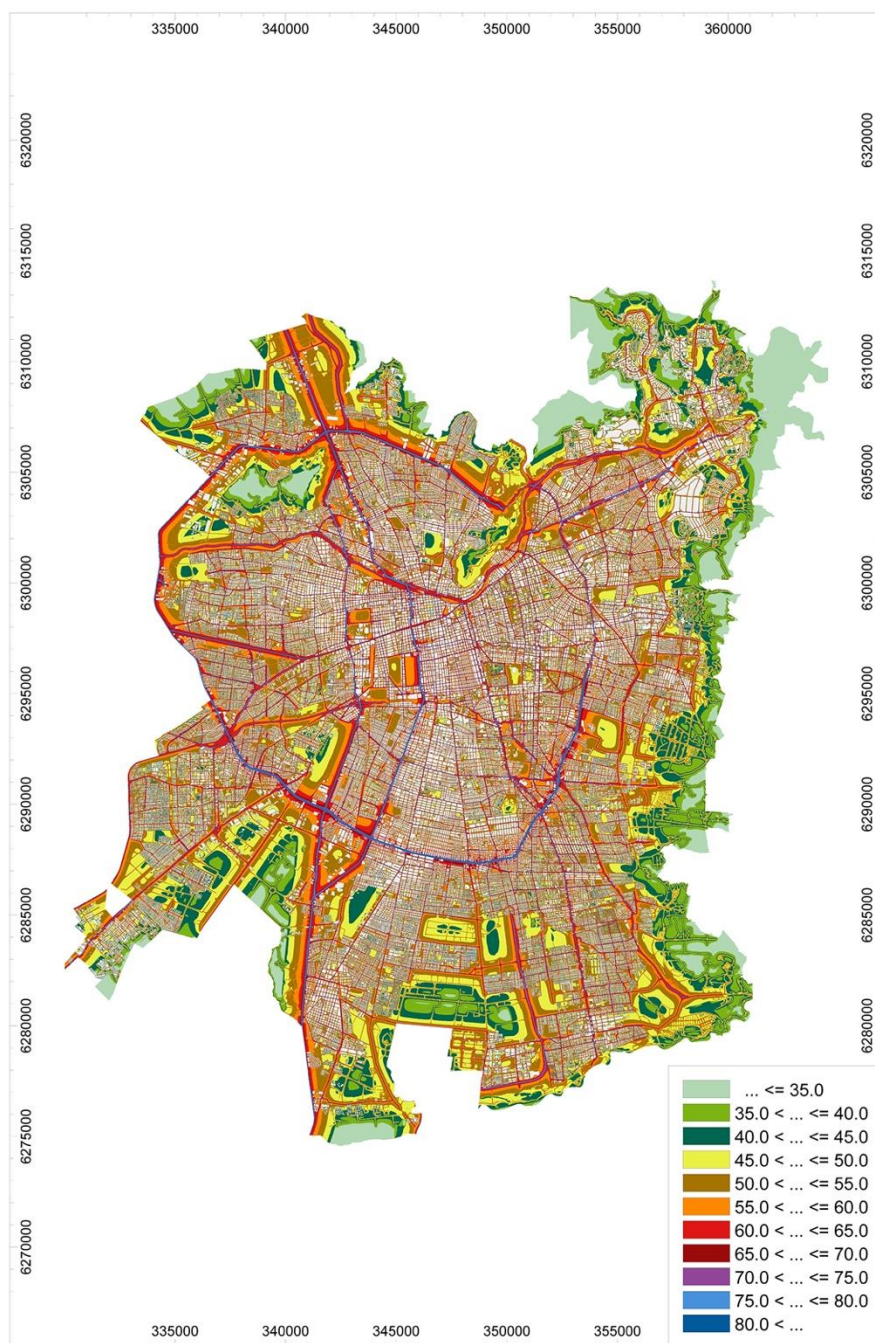


Figura 46: Mapa de Ruido del Gran Santiago nocturno [42]

Considerando la velocidad media de los distintos servicios a lo largo del día se puede establecer un promedio de reducción de emisión de ruido. En la Tabla 27 se observa la

velocidad media del servicio, las emisiones de ruido estimadas para cada uno de ellos tanto para el caso diésel, como para el caso hidrógeno. Como se puede precisar, en promedio, la reducción de ruido, a lo largo del recorrido, es de aproximadamente 14 dB debido al cambio de buses de hidrógeno por buses diésel.

	Velocidad media [km/h]	Diesel [dB]	Hidrógeno [dB]	Reducción [dB]
203	20,1	76	62	14
210	21,7	77	62	14
216	26,4	77	64	13
G04	18,0	76	62	14
301	18,0	76	62	14
I09	19,5	76	62	14
I11	22,7	77	62	14
I18	20,2	76	62	14
428	24,7	77	63	14
107	20,7	76	62	14
502	21,9	77	62	14
504	20,5	76	62	14
516	19,7	76	62	14
407	19,8	76	62	14
C01	23,0	77	62	14
C03	19,4	76	62	14
C06	21,4	76	62	14
108	19,8	76	62	14
712	23,4	77	62	14
405	20,4	76	62	14

Tabla 27: Reducción de ruido

En este estudio no se consideró un análisis asociado al cruce de información asociado a la posibilidad de reducción de ruido con la información actual del mapa de ruido de la ciudad, lo cual se propone como análisis posteriores, ya que podría aportar valor determinar en qué sectores de la ciudad tiene una mayor repercusión la reducción de emisiones sonoras.

7. Elección de ruta para implementación piloto

7.1 Modelo de priorización

En los capítulos anteriores se logró determinar el consumo de hidrógeno de cada uno de los recorridos, como también se mostró que la introducción de buses a hidrógeno permite la reducción de emisiones CO₂, además de ser un aporte a la reducción de ruido en la ciudad. El siguiente paso es determinar una ruta apropiada para comenzar un proyecto piloto.

Dado que existen múltiples opciones, en términos de rutas, en las cuales implementar el proyecto piloto, es que se generó un modelo que busca entregar una sugerencia sobre cuáles rutas debiesen ser implementadas en un proyecto piloto, independiente de la cantidad de buses que se implementen. Es importante mencionar que el desarrollo de un proyecto piloto persigue un objetivo distinto que el despliegue masivo de una tecnología.

En el caso de un proyecto piloto se busca, entre otras cosas, demostrar el uso de la tecnología como también generar un acercamiento de la ciudadanía a la misma, por lo que, por ejemplo, se debiese perseguir la maximización de la visibilización del proyecto.

A partir de lo anterior, es que se generó un modelo matemático el cual permite generar una priorización de rutas, la cual se realiza a través de un modelo multivariable. En este caso, se consideran 4 variables; emisiones de CO₂, pasajeros transportados, recorrido por zona de interés y potencial de uso de infraestructura de producción y carga de hidrógeno. A cada uno de los recorridos, considerando la flota completa, se le asignó un puntaje relativo en cada variable, lo cual se verá a continuación.

- 1. Emisiones de CO₂e (alcance 1):** Para el caso de las emisiones de CO₂e como se vio en la sección 6.7 los recorridos tienen distintos niveles de emisión, lo cual se explica porque los recorridos tienen distancias de viaje distintas, cantidad de salidas y estándares de emisión según tipo de tecnología. En este caso, únicamente se consideraron las emisiones directas, es decir aquellas producidas por la combustión, por lo que en el caso de los buses eléctricos a batería se consideró emisiones 0.

En este caso se le asigna un puntaje mayor a aquel recorrido que genere una mayor cantidad de emisiones en una ventana de 1 semana, ya que se subentiende que si un recorrido genera muchas emisiones este debiese ser privilegiado por sobre otros al introducir tecnologías que buscan eliminar los agentes contaminantes. Para esta

variable, como también para las que se verán posteriormente, el puntaje asignado es relativo a los recorridos a estudiar, por lo que siempre al menos 1 de ellos tendrá el máximo puntaje en cada categoría.

En la Tabla 28 se muestra las emisiones de cada uno de los recorridos durante 1 semana y el puntaje asignado para cada recorrido, el cual es calculado mediante la siguiente ecuación

$$\text{Puntaje emisiones} = \frac{\text{Emisiones recorrido analizado}}{\text{Mayor cantidad de emisiones en recorridos analizados}} * 100$$

Por ejemplo, en la tabla se puede observar que es el recorrido I18 que genera la mayor cantidad de emisiones durante una semana en los recorridos analizados, por lo cual el valor de 408 t-CO₂, correspondería al denominador de la ecuación presentada anteriormente. El puntaje del recorrido 203 se obtiene a partir de la división de (202/408)*100. Para este análisis el recorrido 108, por ejemplo, posee un puntaje de 0 ya que este recorrido es únicamente realizado por buses eléctricos a batería, por lo que no se generan emisiones en el bus.

Recorrido	Emisiones [t-CO ₂ e / semana]	Puntaje
203	101	50
210	132	65
216	129	63
G04	41	20
I18	205	100
I09	3	2
I11	9	4
301	38	19
428	136	66
107	143	70
502	127	62
504	83	41
516	35	17
407	32	16
C01	88	43

C03	13	6
C06	36	18
712	0	70
108	143	0
405	134	66

Tabla 28: Puntaje Emisiones CO2e

- 2. Pasajeros transportados:** Dado que un proyecto piloto busca entregar visibilidad a la tecnología que se está probando es que otra variable de interés para priorizar los recorridos es la cantidad de pasajeros transportados, ya que ellos serán los usuarios directos de este servicio. Para esto, se consideró la cantidad de transacciones en cada recorrido durante 1 semana. Es importante mencionar que esta variable no se hace cargo de la evasión existente en el sistema, la cual es cerca de un 30% [43].

Para el caso de esta variable se le entrega un mayor puntaje a aquellos recorridos que presentan una mayor cantidad de transacciones. En la Tabla 29 se puede observar la cantidad de transacciones como también el puntaje asignado a cada recorrido.

Recorrido	Transacciones	Puntaje
203	36.129	40
210	42.405	47
216	43.210	48
G04	11.093	12
I18	22.121	25
I09	77.191	86
I11	28.849	32
301	81.749	91
428	42.446	47
107	89.600	100
502	69.609	78
504	51.775	58
516	72.242	81
407	69.751	78
C01	46.423	52
C03	36.032	40
C06	33.916	38

712	57.826	65
108	46.811	52
405	74.422	83

Tabla 29: Puntaje Transacciones

- 3. Recorrido por zona de interés:** La exposición de la tecnología no se realiza únicamente a partir de la cantidad de pasajeros que se transportan, sino también por la cantidad que pueda interactuar de otras formas con la tecnología, por ejemplo, que la puedan observar en la calle o en el paradero, etc.

Como se observó en la sección 5 los sectores por los cuales circulan los recorridos son bastante distintos, lo cual genera que la exposición de los mismos sea diferente. Por ejemplo, un bus de hidrógeno circulando por la Alameda genera una mayor exposición que uno que circule por zonas periféricas de la ciudad. La definición de la zona de interés fue realizada por el MTT, el cual indicó 2 zonas, las cuales se muestran en la Figura 47.

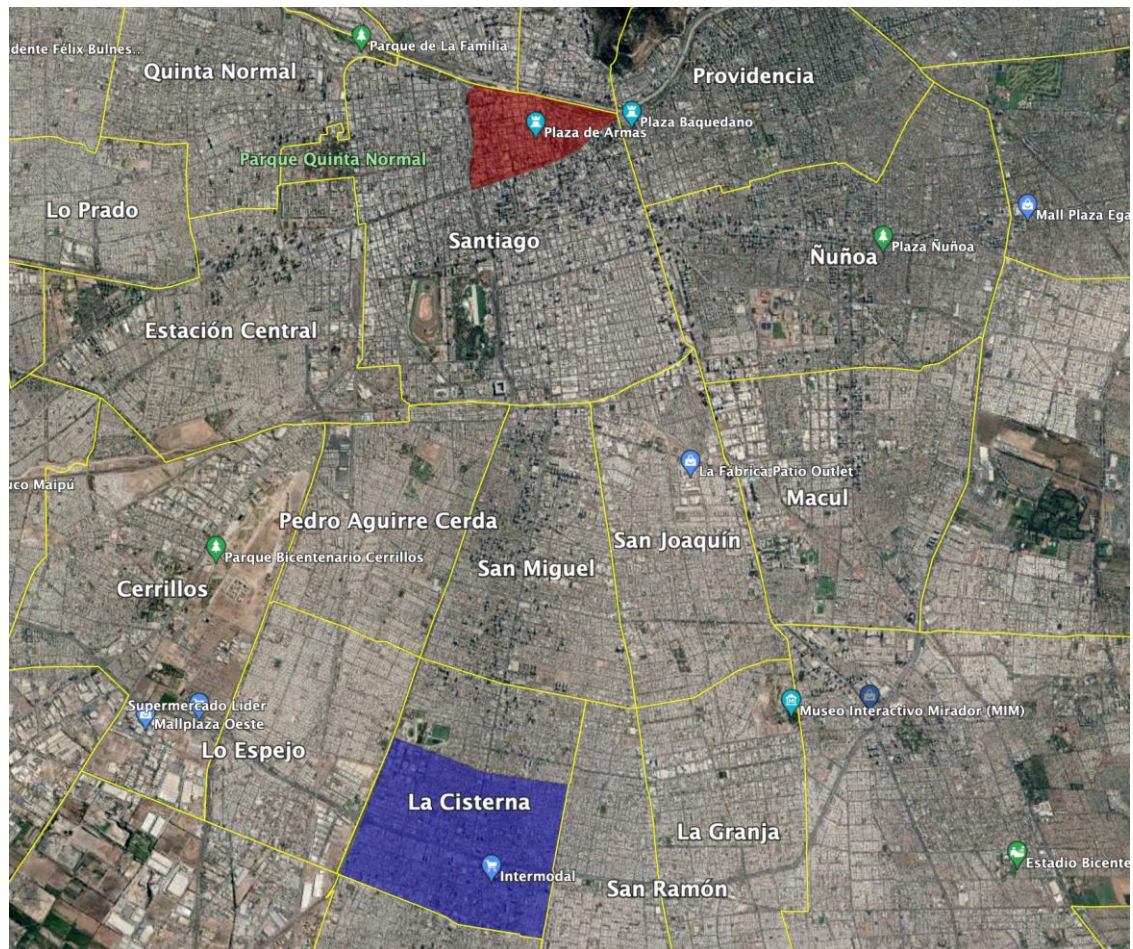


Figura 47: Zonas de interés

La primera zona de interés que se puede observar en la Figura 48 se ubica en la comuna de Santiago y se escogió debido a la gran cantidad de personas que transitan diariamente en el sector. Adicionalmente, este sector posee un alto interés turístico, ya que se encuentran emblemáticos edificios como el Palacio de la Moneda, el Mercado Central de Santiago, el Teatro Municipal y la Biblioteca Nacional, como también el cerro Santa Lucía. Dadas estas dos condiciones, el sector podría ser muy llamativo para la exposición de esta nueva tecnología.



Figura 48: Zona de interés - Santiago Centro

La segunda zona de interés observada en la Figura 49 se ubica en la comuna de La Cisterna. Este sector se encuentra en torno a la Estación Intermodal La Cisterna, la cual es de alta visibilidad para la comunidad debido a la población flotante, además de ser uno de los lugares que concentra más demanda del Sistema RED. Además, en esta zona confluyen servicios que no son operados por buses eléctricos a batería, por lo que se podría favorecer la transición justa hacia la descarbonización del sector.



Figura 49: Zona de interés - La Cisterna

Esta variable está asociada a la cantidad de kilómetros que se desplaza cada uno de los recorridos por estos sectores de interés, por lo tanto, a medida que se recorra una mayor cantidad de kilómetros en el sector, mayor será el puntaje asociado a este recorrido. En la Tabla 30 se observa tanto la distancia total recorrida en estas zonas y el puntaje asignado a cada uno de los recorridos.

Recorrido	Distancia recorrida [km]	Puntaje
203	2,23	25
210	5	56
216	0	0
G04	3,56	40
I18	0	0
I09	2,61	29
I11	0	0

301	8,99	100
428	5,96	66
107	0	0
502	2,62	29
504	4,38	49
516	5	56
407	5,09	57
C01	0	0
C03	0	0
C06	0	0
712	0	0
108	0	0
405	5,09	57

Tabla 30: Puntaje recorrido zona de interés

- 4. Potencial de escalamiento de infraestructura:** Una última variable está relacionada con el potencial de escalamiento del sistema de producción y carga de hidrógeno. Tal como se vio en la sección 6.6, los sistemas de producción de hidrógeno cuentan con una baja variedad respecto a la capacidad nominal de producción, lo cual implica que en muchas ocasiones se tenga que instalar un sistema que sea más grande que el requerido en la práctica, generando así una subutilización del sistema.

Además, para el caso de producción y dispensado de hidrógeno existen economías de escala asociadas a los sistemas, por lo que se podría preferir la instalación de un sistema más grande para suministrar a más buses, que uno que esté únicamente acotado al recorrido a estudiar. Por ejemplo, una planta de producción de 5MW y posterior dispensado tiene un costo cercano, mediante un modelo de leasing, de entre 350.000 USD a 370.000 USD mensual, mientras que una de un tamaño de 2,5 MW se encuentra en el orden de 200.000 USD/mes acorde a información entregada por consultor experto del proyecto, con lo cual se puede notar que el crecimiento de costos no crece de la misma forma que el tamaño de los sistemas, al aprovechar economías de escala. Estos costos no incluyen el costo del agua requerida para realizar la electrólisis ni tampoco el consumo energético del sistema de producción de hidrógeno.

Para la determinación del potencial de uso de infraestructura se consideró la cantidad de buses que están en el mismo terminal del recorrido a estudiar, es decir, la flota del mismo recorrido y la flota de otros servicios que convergen en el mismo

terminal. Se les asigna mayor puntaje a aquellos recorridos cuyo terminal cuenta con una mayor cantidad de buses, ya que se entiende que, potencialmente, podrían ser de hidrógeno. En la Tabla 31 se presentan los respectivos terminales para cada uno de los recorridos³¹ y la cantidad de buses en cada uno de sus terminales. En aquellos casos en donde el recorrido cuenta con dos terminales se utilizó para la asignación de puntaje aquel con una mayor cantidad.

Recorrido	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 1 #Buses	Terminal 2 #Buses	Máximo	Puntaje
203	Recoleta	Santa Rosa	236	248	248	73
210	Pie Andino	San Alfonso	138	100	138	41
216	Santa Rosa	Recoleta	248	236	248	73
G04	Mersan	Miguel Mujica	131	48	131	39
I18	BCG-1	—	75	N.A	75	22
I09	BCG-E	—	93	N.A	93	27
I11	BCG-E	—	93	N.A	93	27
301	Ducaud	Bravo De Saravia	119	12	119	35
428	Lo Echevers	María Angélica	131	129	131	39
107	Huechuraba	Peñalolén	140	139	140	41
502	Las Parras		185	N.A	185	54
504	Los Sauces	Los Abedules	72	91	91	27
516	Los Nogales	Los Espinos	144	103	144	42
407	Las Palmas	Los Abedules	135	91	135	40
C01	El Salto	—	340	N.A	340	100
C03	El Salto	—	340	N.A	340	100
C06	El Salto	—	340	N.A	340	100
712	Los Tilos	Reina de Chile	90	0	90	26
108	El Conquistador	—	305	N.A	305	90
405	El Conquistador	—	305	N.A	305	90

Tabla 31: Puntaje potencial escalamiento

Al ser este un modelo multivariable es que se necesita conjugar cada una de las variables para establecer el puntaje final asociado a la priorización de las rutas. Para esto, se realizó una encuesta a expertos en movilidad y/o hidrógeno en donde se les solicitó asignar a cada una de estas variables el grado de importancia medido en una escala de 1 a 5. En el anexo 3 se encuentra la encuesta realizada, la cual fue respondida principalmente por profesionales del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y del Ministerio de

³¹ En algunos recorridos, como el 405, se cuenta únicamente con un solo terminal.

Energía, y por profesionales que se encuentran desarrollando proyectos de hidrógeno en empresas privadas.

Los resultados de dicha encuesta mostraron que la ponderación de cada una de las variables viene dada por los valores que se pueden encontrar en la Tabla 32. La variable más importante corresponde a aquella relacionada con el potencial de escalamiento de la infraestructura, mientras que la menos relevante es aquella que explica la cantidad de kilómetros que se recorren por una zona de interés definida.

	Peso
Carbono (w_1)	28,49%
Pasajeros (w_2)	23,92%
Zona Interés (w_3)	16,62%
Potencial (w_4)	30,97%

Tabla 32: Peso variables modelo priorización

Quedando de esta forma la ecuación para la asignación de puntaje ponderado

$$\text{Puntaje Ponderado} = \alpha(w_1 * CO_2 + w_2 * \text{Pasajeros} + w_3 * \text{Zona} + w_4 * \text{Potencial})$$

En este caso, α corresponde a una variable binaria de factibilidad, la cual puede tomar valores de 0 o 1. En caso en que la variable tome el valor 0, es decir, que el bus no sea factible en esa ruta, no importará el puntaje ponderado obtenido a partir de las otras variables, ya que automáticamente se le asignará como valor final 0. Los criterios de factibilidad son dos, los cuales están relacionados con la potencia del bus y la autonomía del tanque de hidrógeno. Ambos criterios se detallan a continuación

- 1. Criterio de potencia:** Tal como se mencionó en la metodología, el perfil de conducción se construyó a partir de la información recolectada por el MTT, la cual representa el actual perfil de velocidad de los buses, por lo que los requerimientos de potencia fueron calculados asumiendo que este perfil se mantendrá. Dado que los buses de hidrógeno presentados en la 4 poseen distintos pesos, como también distintos motores eléctricos, es que los requerimientos de potencia son variados y puede ocurrir que la potencia requerida -en algún punto del recorrido- por el sistema sea mayor que la potencia que puede entregar el motor eléctrico.

Si esto ocurre, el único efecto que se verá en la práctica es que el bus acelerará más lento, por lo que tardará un mayor tiempo en tomar la velocidad deseada por el conductor. Si esta situación ocurre de forma repetida en el trayecto, se podría ver

afectada la velocidad media del recorrido, lo cual podría perjudicar la operación del sistema.

En base a lo anterior, se define que, para cumplir este criterio, la potencia calculada requerida no debe superar a la potencia que puede entregar el motor eléctrico del bus durante más de un 5% del trayecto. Si este es el caso, la variable de factibilidad automáticamente tomará el valor de 0.

2. **Criterio de autonomía:** Este criterio establece que los buses de hidrógeno después de realizar un recorrido de ida y vuelta deben volver con al menos un 20% del hidrógeno remanente en el tanque. Si el bus después de realizar este recorrido cuenta en su tanque con menos del 20% del hidrógeno total (asumiendo que parte cargado) la variable de factibilidad tomará el valor 0.

Este criterio permite asegurar que el bus podrá tener la autonomía suficiente para, al menos, realizar un recorrido de ida y de vuelta sin tener la necesidad de detenerse para cargar hidrógeno.

En caso en que uno de los dos criterios no se cumpla, la variable de factibilidad tendrá valor 0.

7.2 Resumen resultados modelo de priorización

La variable de factibilidad está asociada a cada uno de los buses, ya que, por ejemplo, un bus en particular puede cumplir con ambos criterios para algún recorrido, mientras que para el mismo recorrido otro bus podría no cumplirlos. Por lo tanto, en primera instancia se mostrarán los resultados asociados a las 4 variables que no están relacionadas con el bus propiamente tal (emisiones de CO₂, pasajeros transportados, recorrido por zona de interés y potencial de escalamiento de infraestructura) y luego se mostrará la discusión relacionada con la variable de factibilidad para cada uno de los buses en todos los recorridos.

En la Tabla 33 se muestra el resumen de los puntajes anteriormente mencionados, y en la última columna se muestra el puntaje ponderado considerando el peso de cada una de las variables. Es importante recordar que en esta tabla no se ha incluido, aún, la variable de factibilidad, ya que esta depende de cada bus.

Recorrido	Puntaje				Puntaje ponderado
	CO2	Pasajeros	Zona Interés	Potencial	
203	50	40	25	73	50
210	65	47	56	41	52
216	63	48	0	73	52
G04	20	12	40	39	27
I18	19	25	0	22	18
I09	2	86	29	27	34
I11	4	32	0	27	17
301	100	91	100	35	78
428	66	47	66	39	53
107	70	100	0	41	57
502	62	78	29	54	58
504	41	58	49	27	42
516	17	81	56	42	47
407	16	78	57	40	45
C01	43	52	0	100	56
C03	6	40	0	100	42
C06	18	38	0	100	45
712	70	65	0	26	44
108	0	52	0	90	40
405	66	83	57	90	76

Tabla 33: Resultados modelo de priorización

Tal como se puede desprender de la tabla anterior el recorrido 301 es el que obtiene el mayor puntaje ponderado, ya que obtiene muy altos puntajes en las variables asociadas a emisiones, cantidad de pasajeros transportados y desplazamiento por zona de interés. No obstante, el puntaje se ve mermado por un bajo potencial de escalabilidad de infraestructura.

Por otra parte, se tienen recorridos como el I11 cuyo puntaje es el más bajo en este estudio, ya que es un recorrido que genera pocas emisiones, lo cual se explica por una alta presencia de buses eléctricos a batería en el recorrido, teniendo un promedio de un 97% de sus

servicios siendo realizados por buses sin emisiones. Esta situación se repite para recorridos como el 108 cuyo servicio es únicamente realizado por buses eléctricos a batería.

Finalmente, es importante recordar que este modelo no busca entregar de forma certera en qué recorrido se debiese realizar el piloto, ya que otras variables, como el presupuesto disponible, pueden generar otras restricciones asociadas a la elección. Este modelo busca únicamente generar una sugerencia, la cual debe ser vista a partir de aquellos recorridos que están muy bien puntuados respecto a otros.

En la Figura 50 se puede observar gráficamente el resultado ponderado de la Tabla 33, la cual permite comparar los distintos recorridos y notar cuánto afecta cada uno de los puntajes asignados y la posterior ponderación de estos en el resultado final del modelo de priorización.

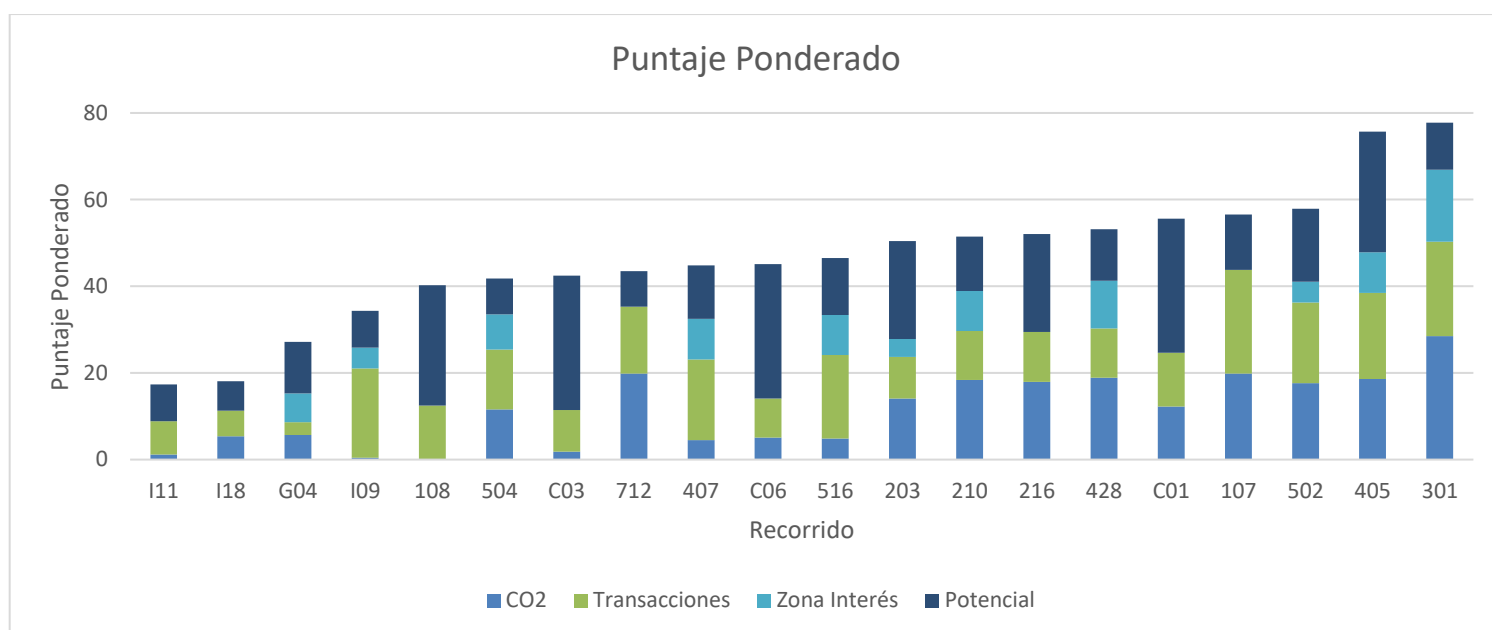


Figura 50: Puntaje ponderado modelo de priorización (Elaboración propia)

Al incluir la variable de factibilidad de los buses en cada uno de los recorridos, se puede observar que por aspectos de autonomía asociados al bus no existe complicación, ya que se vio en la sección 6 todos los buses pueden realizar más de una vuelta con la carga disponible, lo cual no es de sorprender, dado que uno de los principales beneficios del hidrógeno es precisamente su mayor capacidad de almacenamiento energético por unidad de masa.

Por otra parte, al analizar la variable de potencia, tampoco se pudo detectar una mayor afectación en términos del no cumplimiento del actual perfil de velocidad. Ya que como se comentó anteriormente, el margen de tolerancia es de un 5%, no obstante, si se decide disminuir este margen algunos buses aplicados en ciertos servicios podrían efectivamente quedar fuera del puntaje de selección. En la Tabla 34 se puede observar el porcentaje promedio de tiempo en donde la potencia requerida por el perfil de conducción entregado por el MTT de ese recorrido es mayor que la potencia que puede entregar el motor eléctrico del bus. Por ejemplo, en el caso del bus Foton en el recorrido 210 retorno, se indica un valor de 0,01%, lo cual significa que, en promedio, durante un 0,01% del tiempo del recorrido, la potencia requerida es mayor que la potencia que puede entregar el motor eléctrico de ese bus.

Cabe recordar que la importancia de esto es que si ocurre de forma frecuente, se podría ver afectada la velocidad media del recorrido, comprometiendo la operación del servicio. Como se puede desprender de la tabla, es en el recorrido C06 en donde se presenta más frecuentemente un requerimiento de potencia mayor al que puede entregar el motor eléctrico del bus a hidrógeno, no obstante, estos valores se encuentran en promedio en un 1,38% del recorrido, por lo que no se debiese ver afectada la velocidad media del recorrido.

Recorrido	New Flyer 12,5 m		New Flyer 18,5 m		Foton 12,5 m		Van Hool 13,1 m	
	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
203	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%
210	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
216	0,05%	0,39%	0,02%	0,21%	0,06%	0,41%	0,02%	0,21%
G04	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%
301	0,01%	0,05%	0,00%	0,05%	0,01%	0,05%	0,00%	0,05%
I09	0,02%	0,05%	0,02%	0,02%	0,03%	0,08%	0,01%	0,03%
I11	0,16%	0,01%	0,09%	0,00%	0,18%	0,03%	0,08%	0,00%
I18	0,29%	0,04%	0,14%	0,00%	0,37%	0,09%	0,13%	0,00%
428	0,39%	0,13%	0,10%	0,01%	0,58%	0,22%	0,08%	0,01%
107	0,09%	0,03%	0,02%	0,00%	0,15%	0,05%	0,02%	0,00%
502	0,52%	0,16%	0,18%	0,06%	0,80%	0,19%	0,14%	0,04%
504	0,06%	0,10%	0,01%	0,05%	0,09%	0,13%	0,00%	0,05%
516	1,73%	0,01%	0,52%	0,00%	2,13%	0,01%	0,31%	0,00%
407	0,15%	0,07%	0,03%	0,01%	0,27%	0,11%	0,01%	0,01%
C01	1,43%	1,17%	0,51%	0,59%	1,99%	1,38%	0,43%	0,43%
C03	N.A	0,29%	N.A	0,03%	N.A	0,42%	N.A	0,01%

C06	1,05%	2,38%	0,83%	1,20%	1,09%	2,75%	0,86%	0,91%
108	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
712	0,01%	1,73%	0,01%	0,89%	0,02%	1,94%	0,01%	0,66%
405	0,19%	0,07%	0,01%	0,07%	0,47%	0,08%	0,01%	0,07%

Tabla 34: Porcentaje de tiempo de requerimiento mayor al perfil de conducción

7.3 Configuración para ruta escogida

Dado que en el caso del puntaje ponderado se obtuvo que el recorrido 301 es aquel con mayor puntaje se mostrará una configuración de la implementación de buses de hidrógeno en este servicio. Este recorrido se desplaza entre Independencia y San Bernardo con un total de 52,6 kilómetros (ida y vuelta), tardando, en promedio, 3,26 horas. Adicionalmente este servicio cuenta con 67 buses.

Los consumos de hidrógeno de este servicio, dependiendo del bus, y considerando el total de la flota (67 buses) se muestran en la Tabla 35.

New Flyer 12,5 m [kg-H ₂ /día]	New Flyer 18,5 m [kg-H ₂ /día]	Foton 12,5 m [kg-H ₂ /día]	Van Hool 13,1 m [kg-H ₂ /día]
1329	1829	1159	1245

Tabla 35: Consumos hidrógeno recorrido 301

Considerando un promedio de estos consumos, se tiene un requerimiento de hidrógeno de 1.390 kg-H₂/día, lo cual implica, que si se utilizan de dos días de almacenamiento³², que se requieren 2.780 kg-H₂ almacenados en el centro de carga como respaldo. Esto implicaría tener un total de 6 sistemas de almacenamiento *Nel* SS0001 a una presión de 200 bar, lo que permitiría almacenar 3 toneladas. El requerimiento de espacio total sería cercano a 180 m².

En términos del electrolizador, si este es conectado únicamente a energía solar, asumiendo un factor planta de un 17% se requeriría un sistema de 18,7 MW, mientras que, si este es conectado a la matriz o a través de un PPA verde, haciendo que esté operativo las 24 horas del día, el tamaño se reduciría a 3,2 MW.

A modo de ejemplo y para mostrar la factibilidad, el electrolizador HyLYZER 1000 tiene una capacidad 5 MW y una producción de 90 kg-H₂/hora la cual podría satisfacer la necesidad

³² En la actualidad, dependiendo de las condiciones es que se define la cantidad de días de almacenamiento de diésel en cada una de las estaciones de recarga. No obstante, el promedio es de 2 días de almacenamiento, por lo que se utiliza este mismo valor para la operación de hidrógeno.

de producción. Este sistema generaría una capacidad ociosa de cerca de 770 kg-H₂/día, por lo que se podría reducir la carga del electrolizador, o en caso contrario, mantener la producción a máxima capacidad, pero encontrar otros posibles consumidores de hidrógeno, ya sea mediante la introducción de más buses en otros servicios que compartan el mismo terminal, o consumidores externos al sistema.



Figura 51: Electrolizador HyLYZER 1000

El electrolizador HyLYZER 1000 de *Cummins*, es un electrolizador PEM cuya presión de salida es de 30 bar y la pureza del hidrógeno es de un 99,99%. El consumo eléctrico de este sistema es cercano a 51 kWh/kg, lo cual representa una eficiencia cercana a un 65%. No obstante, esta eficiencia se va degradando con el tiempo, con una pérdida cercana a un 1% anual.

Un aspecto relevante de este sistema es que no puede ser instalado al aire libre, por lo que la infraestructura debe ser levantada en el sitio de instalación, además, la temperatura del lugar deber ser entre 5 – 40°C. El espacio requerido por el sistema de producción es cercano a 300 m² (20 x 15 m).

En base al análisis de potencial crecimiento de infraestructura se determinó que el terminal Ducaud ubicado en San Bernardo es aquel con mayor potencial, ya que cuenta con un total de 119 buses³³. En base al análisis del espacio requerido y la disponibilidad en este terminal es que se debe realizar un análisis con mayor profundidad asociado a la posibilidad de instalación en este lugar, ya que tal como se muestra en la Figura 52 y considerando el

³³ Los dos servicios que convergen en este terminal corresponden al 301 y al 301c.

requerimiento de aproximadamente 500 m² se puede notar que se utilizaría gran parte del terminal para el sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno. En color azul se destaca los 300 m² para el sistema de producción y en color amarillo los 200 m² para el almacenamiento de dos días. Naturalmente, el espacio para el almacenamiento se podría ver reducido si se define otra política asociada a la cantidad de almacenamiento requerido.



Figura 52: Configuración sistema Terminal de Buses Ducaud

Una alternativa, con el fin de no realizar la instalación de los equipos de producción y almacenamiento en el terminal es transportar diariamente el hidrógeno requerido. Como se comentó en la sección 2.3 se pueden utilizar *tube trailers* para ello. Estos equipos tienen una capacidad de transporte de 350 kg-H₂ a una presión de 180 bar, por lo que diariamente se requerirían 4 de estos camiones. El costo unitario de cada uno de estos es de entre 100 a 120 USD por día, a lo cual se debe incluir el costo variable asociado a la distancia a transportar, el cual es de 3 USD por kilómetro recorrido. Por lo tanto, la decisión de la instalación del sistema fuera del terminal implicaría un costo adicional de más de 400 dólares diarios.

Como se comentó anteriormente, este sistema de producción de hidrógeno en sitio, sin incluir el almacenamiento de dos días ni el agua y la energía necesaria, es cercano a 350.000 USD/mes, lo cual incluye el sistema de producción propiamente tal, 4 bahías para carga de buses a presión de 350 bar, compresores y tanques de almacenamiento de menor escala. Además, este valor incluye los costos de las instalación y mantención.

Considerando únicamente estos costos, el costo nivelado del hidrógeno³⁴ (LCOH) es cercano a 5,4 USD/kg-H₂. No obstante, un importante valor del costo del hidrógeno está asociado a la electricidad consumida por el electrolizador. Si, por ejemplo, se tiene un costo de la energía promedio de 60 USD/MWh, esto genera un incremento de 3,06 USD/kg-H₂ en el LCOH, generando un total de 8,46 USD/kg-H₂. Lo anterior es relevante por el precio al cual el hidrógeno se vuelve costo competitivo con el diésel. Si bien para cada caso en particular el precio será distinto, se reporta que, en el caso de buses, en promedio, la costo competitividad se alcanza a los 3 USD/kg-H₂ [44], con lo cual aún queda una brecha relevante por cerrar, la que tiene que ser abordada tanto mediante la reducción de costos de las instalaciones, pero también a partir de la reducción de costos de la energía, ya que tal como se vio, puede representar cerca de un 40% del costo final del hidrógeno.

En caso en que se decida la instalación del sistema de producción fuera del terminal, se tendría un costo adicional mensual cercano a 12.000 dólares, lo que repercute en el LCOH, ya que por concepto de transporte se aumentaría este valor en cerca de 0,2 USD/kg-H₂. Un diagrama comparativo de costos puede ser observado en la Figura 53.

³⁴ El costo nivelado del hidrógeno (LCOH) es una metodología utilizada para contabilizar todos los costos de capital y de operación de la producción de hidrógeno.

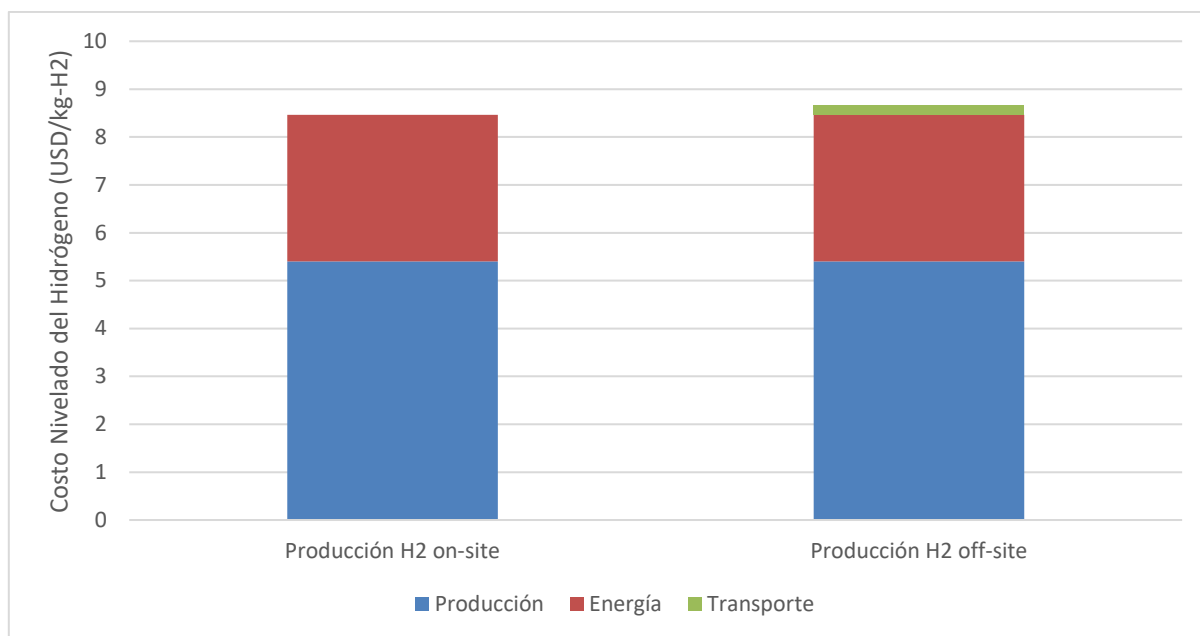


Figura 53: Comparación producción on-site y off-site de hidrógeno (Elaboración propia)

8. Recomendaciones

Los resultados acá presentados demuestran la factibilidad para el uso de buses de hidrógeno (celdas de combustible) en la Red Metropolitana de Movilidad. A la vez, se determinan una serie de parámetros de operación y rendimiento que abren distintas líneas de trabajo para continuar avanzando en la implementación de buses *fuel cell* en el país. Se listan acá una serie de recomendaciones para avanzar en dicha dirección.

- Se propone avanzar a una siguiente etapa de análisis (ingeniería de factibilidad o similar) que incorpore proveedores tecnológicos específicos (y variados) a fin de estimar los recursos necesarios para la implementación de un piloto.
- Se propone avanzar a una siguiente etapa de análisis (ingeniería de factibilidad o similar) con el propósito de estimar con precisión los eventuales tiempos de implementación de un piloto.
- Se recomienda utilizar los indicadores acá determinados para orientar los requerimientos y exigencias técnicas que la autoridad considerase relevantes cumplir en una futura implementación de un proyecto piloto, tales como; determinación de ruta, consumo de hidrógeno, características del bus *fuel cell*, uso de hidrógeno verde y ubicación de hidrolinera.
- Se concluye en este análisis la importancia de contar con hidrógeno verde, puesto que el hidrógeno producido con sistemas *on-grid* presenta altos niveles de emisiones de gases efecto invernadero. Esto debe ser considerado para futuros requerimientos de la autoridad en el levantamiento de propuestas relacionadas con esta tecnología.
- La propuesta de rutas para implementación de tecnología H2V en este trabajo es una primera definición para RED. De esta manera, se propone incorporar otros criterios que se consideren relevantes dentro de los equipos ministeriales.
- Se recomienda profundizar con el análisis de reducción de emisiones de gases efecto invernadero utilizando una línea base con un mayor detalle para los distintos tipos (normas) de buses diésel hoy operando en RED. Esto permitirá establecer una mejor comparación en la reducción de emisiones para buses alternativos.
- De la misma manera, se propone avanzar en la estimación del efecto en la reducción de ruido gracias al uso de buses eléctricos de celdas de combustible. Esto permitirá determinar con más precisión las ventajas de este tipo de tecnologías con respecto a la línea base.

- Se recomienda la difusión de estos resultados que muestran la factibilidad para el uso de buses *fuel cell* en la comunidad, a fin de transferir conocimiento a la ciudadanía sobre el estado del arte de las tecnologías limpias.
- Se propone avanzar en la colaboración de distintas entidades públicas y privadas con el propósito de factibilizar un futuro proyecto piloto. Entre otras, es necesario;
i) Articular y definir proveedores tecnológicos de buses y repuestos, ii) Asegurar la disponibilidad de hidrógeno verde especialmente para las primeras etapas de un piloto, iii) Crear las condiciones para la formación de capital humano específico aplicado a tecnologías de la cadena del hidrógeno de valor acá descrita, trabajando en conjunto con universidades y centros de formación técnica.
- Dado los positivos resultados acá determinados, se recomienda comenzar la formación de capital humano al interior de las unidades ministeriales a fin de lograr las homologaciones de buses *fuel cell* llegado el momento de la implementación de la tecnología.

9. 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 20 recorridos con características distintas ya sea en las propiedades particulares de la ruta, como la distancia, y diferencia de cotas, como también en el *mix* tecnológico asociado a los buses que realizan el recorrido, número de salidas y velocidad media del recorrido.

En primera instancia se realizó un levantamiento de la oferta comercial de buses a hidrógeno disponible en el mercado determinando que en la actualidad el costo por unidad de cada uno de ellos varía entre los 600.000 a 800.000 USD. A partir de un subconjunto de buses analizados (4 de 12) se pudo determinar que estos cuatro cumplen holgadamente con los requerimientos técnicos asociados a las rutas, por lo cual estos buses estarían habilitados para operar en cualquiera de las veinte rutas estudiadas.

Uno de los aspectos más relevantes del estudio fue determinar los consumos de hidrógeno asociado a cada uno de estos recorridos. En promedio, el recorrido G04, es aquel que demanda la menor cantidad de hidrógeno consumida por vuelta, con un total de 1,3 kg-H₂, mientras que el recorrido con mayor consumo es el servicio 712, con un consumo de 8 kg-H₂, lo cual se explica porque el recorrido G04 es el más corto estudiado, mientras que el 712 el que abarca una mayor distancia.

En términos de rendimiento, el recorrido con el mejor rendimiento promedio es el servicio G04, con una media de 7,7 kg-H₂/100 km, mientras que el recorrido con peor rendimiento es el recorrido C06, con una media de 10,7 kg-H₂/100 km, lo cual se explica por las características de la ruta, como también por el perfil de velocidad asociado a cada una de ellas.

A partir de la estimación de consumos y rendimientos para cada recorrido, se realizó un análisis asociado a la cantidad de hidrógeno requerido por la flota completa, es decir, considerando la cantidad total de salidas que se realiza en cada uno de los servicios. A partir de esto, se pudo determinar que, en el caso de cambiar por completo la flota a una de hidrógeno el recorrido G04 es aquel con un menor consumo de hidrógeno diario, con 245 kg-H₂ por día, mientras que el servicio con mayor consumo total sería el recorrido 301, con 1.390 kg-H₂. Lo anterior es sumamente relevante dado que al ser esta una etapa piloto, una restricción importante podría ser la cantidad de hidrógeno con la cual se puede disponer.

Una definición importante asociada al desarrollo de un proyecto piloto de buses de hidrógeno el nivel de emisiones asociada a la producción de hidrógeno, ya que, si se utiliza un electrolizador conectado a la matriz energética actual del país, las emisiones producidas por el consumo de electricidad podrían ser inclusive mayores que las emisiones generadas por la combustión de un bus diésel. Por lo tanto, si se desea reducir el nivel de emisiones, el despliegue del piloto debe ir acompañado con una estrategia asociada a la utilización de energía limpia, ya sea mediante una conexión directa a paneles solares o mediante la contratación de un PPA verde.

Naturalmente, la utilización de paneles solares como único suministro energético para el electrolizador, genera, dada la curva de producción solar, que el electrolizador para cumplir con la demanda requerida deba tener un tamaño entre 4 a 5 veces más si se compara con el caso en donde este es conectado a una fuente energética continua. Esto lógicamente repercute en el costo de inversión asociado a los sistemas, por lo cual también es una definición importante a considerar.

Se generó un modelo multivariable el cual permite tener una aproximación sobre cuál debiese ser el recorrido en donde introducir buses de hidrógeno, en función de cuatro variables; emisiones, pasajeros transportados, recorrido por zona de interés y potencial escalamiento de infraestructura. Este modelo permitió priorizar al servicio 301, explicado principalmente porque, en términos comparativos, es el recorrido que más emisiones genera, y es, además, uno de los recorridos que más pasajeros transporta.

Finalmente, se sugiere como pasos posteriores definir el recorrido en el cual se realizará la introducción del piloto, con el objetivo de generar una ingeniería de mayor detalle para determinar específicamente los requerimientos para cada uno de los servicios, tal como el espacio requerido para la instalación y que esto sea contrastado con la ubicación en donde se pretende realizar la estimación.

10. Bibliografía

- [1] «El País,» [En línea]. Available: <https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/>.
- [2] Deloitte, «Fueling the Future of Mobility: Hydrogen and fuel cell solutions for transportation,» 2020. [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>.
- [3] Ministerio de Energía, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- [4] University of Washington, «What is a lithium-ion battery and how does it work?,» [En línea]. Available: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>.
- [5] IEA, «Transport: Improving the sustainability of passenger and freight transport,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/topics/transport>.
- [6] IEA, «Tracking Transport 2021,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2021>.
- [7] Banco Mundial, «La ruta de Chile hacia un transporte público cero-emisión,» 15 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://blogs.worldbank.org/es/latinamerica/la-ruta-de-chile-hacia-un-transporte-publico-cero-emision>.
- [8] Ministerio de Energía, «Lanzamiento Estrategia Nacional de Electromovilidad: Gobierno anuncia que al 2035 se venderán solo vehículos eléctricos en Chile,» 15 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/lanzamiento-estrategia-nacional-de-electromovilidad-gobierno-anuncia-que-al-2035-se-venderan-solo-vehiculos-electricos-en-chile>.
- [9] Fuel Cell Electric Buses, «Fuel Cell Electric Buses - Knowledge Base,» [En línea]. Available: <https://fuelcellbuses.eu>.
- [10] NREL, «Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: current Status 2020».
- [11] Department of Energy, USA, «Hydrogen Production: Electrolysis,» [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.
- [12] Nel, «Containerized PEM Electrolyser,» [En línea]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/m-series-containerized/>.
- [13] Cummins, «HyLYZER Water Electrolyzers,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hylyzer-250-specsheet.pdf>.

- [14] Nel, «H2Station,» [En línea]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/h2station/>.
- [15] Nel, «Hydrogen Supply Storage 20 MPa - SS001,» [En línea]. Available: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2019/11/SS001-Technical-specification.pdf>.
- [16] Nel, «Hydrogen Dispenser,» [En línea]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/hydrogen-dispenser/>.
- [17] D. Jimenes, S. Hernandez, J. Fraile-Ardanuy, Serrano y R. Á. F. Fernández, «Modelling the Effect of Driving Events on Electrical Vehicle Energy Consumption Using Inertial Sensors in Smartphones,» *Energies*, vol. 11, nº 2, p. 412, 2018.
- [18] R. Dominguez, J. Solano y A. Jacome, «Sizing of Fuel Cell - Ultracapacitors Hybrid Electric Vehicles Based on the Energy Management Strategy,» de *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2018.
- [19] R. Cipollone, D. Di Battista, M. Marchionni y C. Villante, «Model based Design and Optimization of a Fuel Cell Electric Vehicle,» *Energy Procedia*, pp. 71-80, 2014.
- [20] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, «Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe,» 2015.
- [21] Z. Bi, L. Song, R. De Kleine, Mi y G. Keoleian, «Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system,» *Applied Energy*, vol. 146, pp. 11-19, 2015.
- [22] M. Ansarey, M. Shariat Panahi, H. Ziarati y M. Mahjoob, «Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming,» *Journal of Power Sources*, vol. 250, pp. 359-371, 2014.
- [23] D. Gao, Z. Jin, J. Zhang, J. Li y M. Ouyang, «Comparative study of two different powertrains for a fuel cell hybrid bus,» *Journal of Power Sources*, vol. 319, pp. 9-18, 2016.
- [24] C. Bayındırlı, «Drag reduction of a bus model by passive flow canal,» *International Journal of Energy Applications and Technologies*, vol. 6, nº 1, pp. 24-30, 2019.
- [25] E. Arfa, «Traction Motor for a Battery Electric City Bus,» Gothenburg, 2020.
- [26] E. Chung, A. Hopton y T. Reid, «What cities can learn from the biggest battery-powered electric bus fleet in North America,» *CBC*, 2 Diciembre 2020.
- [27] Electrive, «Barcelona orders eight H2 buses from Caetano,» 24 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.electrive.com/2020/09/24/barcelona-orders-eight-hydrogen-buses-from-caetano/>.
- [28] Sustainable Bus, «Solaris fuel cell bus: the Urbino 12 hydrogen takes the road,» 15 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/solaris-urbino-hydrogen/>.

- [29] Electrive, «Five Solaris Urbino 12 H2 buses for Mallorca,» 2 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.electrive.com/2022/03/02/five-solaris-urbino-12-hydrogen-buses-for-mallorca/>.
- [30] Fuel Cell Electric Buses, «RVKS Orders 15 Solaris Fuel Cell Buses,» 12 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/rvks-orders-15-solaris-fuel-cell-buses>.
- [31] Keolis, «Hydrogen buses on the Veluwe,» 7 Abril 2020. [En línea]. Available: https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf.
- [32] Eurotransport, «Fuel cell buses: A flexible, zero-emission transport solution,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/selection.pdf>.
- [33] Ministerio de Energía, «Explorador Solar,» [En línea]. Available: <https://solar.minenergia.cl/fotovoltaico>.
- [34] Comisión Nacional de Energía, «Factores de Emisión,» 2021. [En línea]. Available: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>.
- [35] Oxford Institute for Energy Studies, «Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolyzers?,» Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/01/Cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolyzers-EL47.pdf>.
- [36] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, «Certificación Características Funcionales y Dimensionales Buses Transporte Público Urbano Santiago,» [En línea]. Available: <https://www.mtt.gob.cl/archivos/5597>.
- [37] Emisia, «Methodology for the calculation of exhaust emissions – SNAPs 070100-070500, NFRs 1A3bi-iv,» Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.emisia.com/utilities/copert/documentation/>.
- [38] Generadoras de Chile, «Buses eléctricos: ponen en marcha el electroterminal más grande del país,» 3 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/prensa/buses-electricos-ponen-en-marcha-el-electroterminal-mas-grande-del-pais>.
- [39] F. Laib, A. Braun y W. Rid, «Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany.,» *Transportation Research Procedia*, n° 37, pp. 377-384, 2019.
- [40] European Environment Agency, «Environmental noise in Europe,» 2020.
- [41] Organización Mundial de la Salud, «Environmental Noise Guidelines for the European Region,» 2018.
- [42] Ministerio del Medio Ambiente, «Línea Mapas de Ruido,» [En línea]. Available: <https://ruido.mma.gob.cl/mapas-de-ruido/>.

- [43] Programa Nacional de Fiscalización, «Índice de Evasión en Buses del Sistema de Transporte Público Metropolitano,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.fiscalizacion.cl/wp-content/uploads/2016/10/Indice-Evasion-Oct-Dic-20211.pdf>.
- [44] Hydrogen Council, «Path to hydrogen competitiveness A cost perspective,» 20 Enero 2020. [En línea]. Available: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.
- [45] Solcor Chile, «¿Qué es un PPA o Power Purchase Agreement?,» [En línea]. Available: <https://www.solcorchile.com/servicios/ppa-solar/>.
- [46] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «RESOLUCION 2243 EXENTA APRUEBA PROTOCOLO TÉCNICO PARA OBTENER CONSUMO ENERGÉTICO EN BUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO,» [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121384>.

Anexo

A continuación, se describen cuatro criterios los cuales deberá clasificar conforme al grado de importancia que tienen para usted cada una de estas variables al momento de decidir el recorrido en donde implementar un bus de hidrógeno como piloto.

- 1. **Criterio de emisiones de CO2 reducidas.** Este criterio establece la cantidad de emisiones de CO2 que se pueden reducir en el recorrido sustituyendo los buses diésel por buses de hidrógeno.
- 2. **Criterio de pasajeros transportados.** Este criterio considera la importancia del número de pasajeros que serán expuestos a la nueva tecnología.
- 3. **Criterio de proporción de recorrido por zona de interés.** Este criterio tiene en cuenta la cobertura de un determinado servicio dentro de un área determinada. La definición de esta podrá ser en función de distintos factores, como, por ejemplo, atractivo turístico, población flotante, nivel de acceso a buses eléctricos, entre otras.
- 4. **Criterio de potencial de escalamiento.** Este criterio tiene en cuenta la capacidad en el terminal del recorrido para poder realizar un escalamiento de la infraestructura instalada para el abastecimiento de hidrógeno en el futuro.

Para cada uno de los criterios descritos, en su opinión ¿cuál es el nivel de importancia de cada uno de ellos para definir en qué servicio realizar el piloto?

	Sin ninguna importancia	Algo importante	Importante	Muy importante	Extremadamente importante
Criterio de emisiones de CO2 abatidas	☐	☐	☐	☐	☐
Criterio de pasajeros transportados	☐	☐	☐	☐	☐
Criterio de proporción de recorrido por zona de interés	☐	☐	☐	☐	☐
Criterio de potencial de escalamiento	☐	☐	☐	☐	☐

Anexo 1: Encuesta Ponderadores



Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE**

Ejecutado por:



calac@swisscontact.org.pe

www.programacalac.com

Facebook: @CALACplus

Twitter: @Calacplus

Calle José Gálvez N° 692, Miraflores

Lima 15073 – Perú

Teléfono: +511 5005075

www.swisscontact.org