UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE

POLÍTICA PÚBLICA DE VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE BUSES A GAS NATURAL COMO MEDIDA DE TRANSICIÓN PARA LA ELECTROMOVILIDAD Y SU APORTE PARA UN DESARROLLO BAJO EN EMISIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

CARLOS PATRICIO BARRIENTOS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO DALL'ORSO

OCTUBRE 2020

Índice de Contenidos

1. Resumen Ejecutivo **12**

2. Problema De Investigación **15**

3. Objetivos **19**

3.1. Objetivo General 19

3.2. Objetivos Específicos 19

4. Alcance **20**

5. Marco Teórico **21**

5.1. Cambio climático 21

5.2. Efecto Invernadero y contaminantes locales 24

5.2.1. Balance Energético 24

5.2.2. Contaminantes locales 25

5.3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sector en Chile 27

5.4. Gas Natural Comprimido (GNC) 28

5.5. Motor de Gas Natural Comprimido 29

5.5.1. Componentes básicos de un vehículo de GNC 30

5.6. Herramientas para la evaluación 32

6. Antecedentes **34**

6.1. Producción mundial de gas natural 34

6.2. Situación actual en el transporte público en Chile 35

6.3. Estrategia nacional de Electromovilidad 36

7. Metodología **38**

8. Desarrollo **40**

8.1. Escenario económico y ambiental con la implementación de buses a gas natural 40

8.1.1. Situación base 40

8.2. Comparación de costos entre las distintas tecnologías seleccionadas diésel, eléctricos y a gas natural) 42

8.2.1. Bus Mercedes Benz 500 EURO VI 43

8.2.2. Volvo BR EURO VI 44

8.2.3. BYD K9 Eléctrico 44

8.2.4. Bus Yutong Eléctrico 45

8.2.5. Bus King Long Motor Cummins L9N 'Near Zero' 45

8.3. Proyección de Precios de combustible 47

8.4. Comparación de emisiones entre las distintas tecnologías seleccionadas (Diésel EURO III-V-VI, eléctricos y a gas natural) 49

8.4.1. Emisiones de buses tecnología EURO VI 49

8.4.2. Emisiones de buses eléctricos 50

8.4.3. Emisiones de buses propulsados con gas natural 52

8.5. Proyección del parque de buses de la región metropolitana 53

8.6. Proceso de adquisición de buses 54

8.7. Precio Social del CO2 y contaminantes locales 59

8.8. Cálculo para determinar el total de emisiones por tipo de tecnología 60

8.9. Cálculo para determinar los costos sociales totales de CO2 y contaminantes locales . . 61

8.10. Flujo de costos 63

8.11. Resultados 65

8.11.1. Sólo Adquisiciones de buses diésel 65

8.11.2. Sólo adquisiciones de buses de gas natural 68

8.11.3. Sólo adquisiciones de buses eléctricos 71

8.11.4. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos en la misma proporción (50 % para ambos casos) 74

8.11.5. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos (gas hasta 2025, eléctrico el resto del periodo) 77

8.11.6. Resumen 81

8.11.7. Análisis de sensibilidad 83

9. Conclusiones y Recomendaciones **87**

10.Limitantes **89**

Bibliografía **91**

A. Anexos **95**

Índice de Tablas

1. Composición actual del parque de buses en Santiago. Fuente: MTT 40
2. Resumen de la composición del parque de buses para el año 2020. Fuente: Elaboración propia 40
3. Consumo y costos de mantención de los buses con normativa EURO III Y EURO V. Fuente: Elaboración propia. 43
4. Información del kilometraje, horas de trabajo y precio de las partes del bus de gas natural. Fuente: National Renewable Energy Laboratory. 46
5. Proyección de precios de combustible para cada tecnología. Fuente: Elaboración propia. 48
6. Contaminantes locales producidos por un bus EURO VI por cada kilómetro recorrido. Fuente: Elaboración propia. 50
7. Contaminantes locales producidos por cada bus propulsado con gas natural. Fuente: Elaboración propia. 53
8. Primera sección del flujo de costos, donde se observa la cantidad de buses adquiridos y dados de baja. Fuente: elaboración propia. 56
9. Años de operación de buses con norma EURO III, EURO V Y EURO VI. Fuente: Elaboración propia. 58
10. Precios sociales del CO2 medidos en pesos chilenos a diciembre de 2019 y en UF. Fuente: “Precios Sociales 2020”, Subsecretaria de Evaluación Social. 59
11. Precios sociales de los contaminantes locales en dólares y UF. 59
12. proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones diésel. Fuente: Elaboración propia. 66

13. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia. 67
14. Valor actual neto escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia. 67
15. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones gas natural. Fuente:Elaboración propia. 68
16. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia. 69
17. Valor actual neto escenario sólo gas. Fuente: Elaboración propia. 70
18. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones de buses eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 71
19. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia. 73
20. Valor actual neto escenario sólo eléctrico. Fuente: Elaboración propia. 73
21. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones mix gas-eléctricos. Fuente:Elaboración propia. 74
22. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia. 76
23. Valor actual neto escenario mix eléctrico y gas en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia. 76
24. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones mix gas hasta 2025-eléctricos. Fuente:Elaboración propia. 78
25. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia. 80

26. Valor actual neto escenario mix eléctrico y gas (gas hasta 2025, eléctrico hasta 2040). Fuente: Elaboración propia. 80
27. Tabla resumen de los distintos escenarios expuestos anteriormente. Fuente: Elaboración propia. 81
28. Factor de emisión de la electricidad a lo largo de los años. Fuente: Elaboración propia. 99
29. Proyección del parque de buses en al región metropolitana. Fuente: MTT. 100
30. Proyección de la población urbana de la región Metropolitana en base al año 2017. Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 101
31. Proyección de los precios del combustible diésel, gas natural y electricidad. Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE). 102
32. Proceso de adquisición y operación de buses para los años 2020-2040 considerando 10 años de vida útil por bus. Fuente: Elaboración propia. 103
33. Escenario sólo adquisiciones diésel, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia. . . 104
34. Continuación escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia. 105
35. Escenario sólo adquisiciones de buses a gas natural, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia. 106
36. Continuación escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia. 107
37. Escenario sólo adquisiciones de buses eléctricos , sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia. 108
38. Continuación escenario sólo eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 109
39. Escenario mix de buses eléctricos y gas natural en la misma proporción, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia. 110
40. Continuación escenario mix eléctricos y gas natural en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia. 111

41. Escenario mix de buses de gas natural hasta el año 2025 y eléctricos de 2025 a 2040, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia 112

42. Continuación escenario mix de buses de gas natural hasta el año 2025 y eléctricos de 2025 a 2040. Fuente: Elaboración propia 113

Índice de Figuras

1. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto del escenario "Políticas Actuales en MtCO2e". 16
2. Metas para el sector transporte para el año 2030. 17
3. La superficie de la Tierra recibe del Sol 161 w/m2 y del Efecto Invernadero de la Atmósfera 333w/m^2, en total 494 w/m2, como la superficie de la Tierra emite un total de 493 w/m2 (17+80+396), supone una absorción neta de calor de 0,9 w/m2, que en el tiempo actual está provocando el calentamiento de la Tierra. Fuente: CIIFEN, 2017. 25
4. Emisiones GEI de Chile por Sector, MtCO2e. Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile (SNI Chile,2016). 28
5. Consumo y producción proyectada de gas natural para el año 2050. Fuente: La Tercera. 34
6. Comparación de emisiones entre los buses que circulan actualmente en el servicio de transporte público durante un periodo de 8 meses, se observan las cantidades de contaminantes entre los buses EURO III o EPA 98 articulado y no articulado. Fuente: La Tercera. 41
7. Comparación de emisiones entre los buses que circulan actualmente en el servicio de transporte público, se observan las cantidades de contaminantes entre los buses EURO V o EURO VI articulado y no articulado. Fuente: La Tercera. 42
8. Características comparativas del bus Mercedes Benz 500 EURO VI. Fuente: Patrick Oemick, 2019. 44
9. Características comparativas del bus Volvo BR EURO VI. Fuente: Patrick Oemick, 2019. 44
10. Características comparativas del bus BYD K9 Eléctrico. Fuente: Patrick Oemick, 2019. 45
11. Características comparativas del bus Yutong Eléctrico. Fuente: Patrick Oemick, 2019. . 45

12. Características comparativas del bus King Long Cummins. Fuente: Elaboración propia. 47
13. Proyección de los factores de emisión al año 2050 medido en toneladas de CO2 por cada mega Watt hora generado. 51
14. Proyección al año 2040 del parque de buses en a región metropolitana. Fuente: MTT. . 54
15. Adquisiciones de buses diésel hasta el año 2018. Fuente: DTPM. 55
16. Proceso de adquisiciones. Fuente: Elaboración propia. 56
17. Proyección del factor de emisión del CO2 para el año 2050, medido en toneladas de CO2 por MegaWatt-hora generado. 60
18. Proyección al año 2040 de la población de la región urbana de Santiago. Fuente: INE 2020. 62
19. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia. 66
20. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo gas natural. Fuente: Elaboración propia. 69
21. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 72
22. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario mix en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia. 75
23. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario mix gas natural - 2025 eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 78
24. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia. 83
25. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia. 84

26. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio del gas natural. Fuente: Elaboración propia. 85

27. Costos e inversión de cada bus analizado. Fuente: Elaboración propia. 95

28. Factores de emisión para las 3 tecnologías para el año 2020. Fuente: Elaboración propia. 96

29. Factor de emisión para contaminantes locales por tipo de norma. Fuente: Elaboración propia. 97

30. Información técnica para buses EURO III y EURO V. Fuente: Elaboración propia. . . 97

31. VAN correspondiente a cada escenario analizado. Fuente: Elaboración propia. 98

32. Resultados obtenidos al sensibilizar el precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia. 98

33. Resultados obtenidos al sensibilizar los costos de mantención. Fuente: Elaboración propia. 98

34. Resultados obtenidos al sensibilizar el precio del gas. Fuente: Elaboración propia. . . . 99

1. Resumen Ejecutivo

Los índices de contaminación y gases de efecto invernadero han alcanzado puntos críticos, las emisiones totales de GEI se incrementaron en un 113,4 % entre 1990 y 2013.

La concentración de CO2 ha traspasado las 400 partes por millón, la última medición realizada en junio del año 2019 fue de 413,92 PPM, si esta concentración continúa ascendiendo en este siglo, podría llevar al planeta a una concentración atmosférica no experimentada desde hace millones de años.

Los daños ocasionados por esta situación están siendo irreversibles, si no se actúa hoy, las consecuencias serán gravísimas.

¿Cómo es la situación en nuestro país?, ¿Qué podemos hacer como país para revertir en un pequeño porcentaje esta situación? los esfuerzos deben centrarse en la detención de emisiones de estos gases y su concentración en la atmósfera. La meta en el sector energía y transporte es alcanzar la electro movilidad en el año 2040.

En el desarrollo de esta investigación, se aborda específicamente el problema de las emisiones del sector transporte y sus medidas de mitigación en el recambio tecnológico del transporte público como una medida de apoyar la transición hacia la electro movilidad definida para el año 2040 utilizando motores de gas natural comprimido. El gas natural comprimido (GNC) no es más que gas natural comprimido a alta presión, logrado mediante un proceso de compresión 200-250 bar. Su volumen es considerablemente menor que en su estado gaseoso (unas 600 veces menor).

Para determinar la mejor opción, Se establecen 5 escenarios distintos a comparar, considerando 10 años de vida útil por bus:

1. Seguir adquiriendo buses diésel.

2. Adquirir sólo buses de gas natural.

3. Adquirir sólo buses eléctricos.

4. Establecer un mix entre gas natural y eléctricos.

5. Establecer un nuevo mix donde inicialmente se adquieran buses de gas natural para proseguir con la adquisición de buses eléctricos.

Con el fin de comparar estos escenarios se ha realizado una evaluación social considerando variables como: Inversión, consumos, costo de mantenimiento, costos de operación, distancias recorridas, buses dados de baja al año, costos sociales para emisiones de dióxido de carbono y contaminantes locales y las distintas proporciones de adquisición entre cada tecnología.

De esta forma teniendo inicialmente un total de 6.979 buses en el transporte público donde 6.413 son diésel, 566 eléctricos y una cantidad que se considera despreciable para buses de gas natural, se obtienen los siguientes resultados:

Para el escenario sólo diésel, se tiene que en el periodo 2020-2040 se habrán generado casi 15 millones de toneladas de dióxido de carbono, 150 toneladas de material particulado y 11.363 toneladas de NOX. El valor actual neto resulta ser de -247.610.499 UF.

Para el escenario sólo gas natural, se tiene que para el mismo periodo (2020-2040) se habrán generado 8 millones de toneladas de dióxido de carbono, 136 toneladas de material particulado y 7.501 toneladas de NOX. El valor actual neto resulta ser de -228.146.717 UF.

Siguiendo, el escenario sólo eléctrico, para dicho periodo se habrán generado casi 7 millones de toneladas de dióxido de carbono, 132 toneladas de material particulado y 7.072 toneladas de NOX. El valor actual neto resulta ser de -205.496.295 UF.

Continuando, para el caso mix eléctrico y gas natural, se generan poco más de 7 millones de toneladas de CO2, 134 toneladas de MP y 7.286 toneladas de NOx. El VAN resulta -216.821.506 UF.

Finalmente, para el último escenario que considera un mix de gas natural los primeros 5 años y el

resto adquisiciones de buses eléctricos, se generan una cantidad muy cercana al escenario anterior de poco más de 7 millones de toneladas de CO2, 135 toneladas de MP y 7.364 toneladas de NOx. El VAN resulta -222.129.238 UF.

Así, se concluye que el escenario que genera menor impacto ambiental y económico es el que considera sólo adquisiciones de buses eléctricos.

Por lo tanto, la recomendación es realizar el recambio tecnológico lo antes posible a un escenario donde las adquisiciones de buses sean 100 % eléctricos. Así, se podrá adelantar la electro movilidad en 10 años y convertir a Chile en pionero en el uso de esta tecnología en el trasporte público.

2. Problema De Investigación

Corría el año 1896 y el científico sueco Svante Arrhenius ya proclamaba que los combustibles fósiles podrían acelerar el calentamiento en el planeta. Estableció una relación entre las concentraciones de dióxido de carbono (CO2) y la temperatura. Además, planteó que la temperatura media superficial de la tierra es de 15 ℃ gracias a la capacidad de absorción de la radiación y el dióxido de carbono al cual se le conoce como efecto invernadero natural. El científico estableció que una concentración doble de gases de dióxido de carbono provocaría un aumento de 5 ℃ en la temperatura terrestre, y que el aumento de la temperatura puede ser provocada por las actividades del ser humano. Décadas más tarde, y de una manera rapidísima, las proclamaciones del científico Arrhenius no tardaron en hacerse realidad.

En 1988 finalmente se reconoció la teoría del efecto invernadero y se estableció el Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) por el Programa medioambiental de las Naciones Unidas. El propósito de esta organización es predecir el impacto de los gases de efecto invernadero teniendo en cuenta modelos previstos sobre el clima e información bibliográfica disponible (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

Rápidamente con la revolución industrial, los avances en los procesos de generación de energía, la necesidad de utilizar el combustible fósil como mecanismo de transporte y de producción, los índices de contaminación y gases de efecto invernadero han alcanzado puntos críticos. Así, surge la Política Energética Nacional (PEN) en Chile que fue dada a conocer el año 2015 y propone una visión del sector energético inclusivo y sostenible con el fin de alcanzar una matriz energética renovable y sustentable. Las metas de este compromiso se encuentran en la Figura 1 mostrada a continuación:

Sector	2020	2025	2030
Escenario Metas PEN			
Generación de Electricidad	0,03	2,97	8,78
Transporte	0,52	2,53	5,07
Industria y Minería	0,41	1,40	2,38
Comercial, Público y Residencial	0,12	0,55	1,09
Total, Sector de Energía	**1,09**	**7,46**	**17,33**
Escenario Esfuerzo Adicional			
Generación de Electricidad	0,03	2,97	8,78
Transporte	0,99	2,53	8,70
Industria y Minería	0,41	1,40	3,47
Comercial, Público y Residencial	0,14	0,55	3,19
Total, Sector de Energía	**1,57**	**7,46**	**24,14**

Figura 1. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto del escenario "Políticas Actuales en MtCO2e".

Sólo por un caso, las emisiones generadas por el sistema de transporte en Chile muestran un diagnóstico negativo. Los buses oruga son los que más contaminan debido a que su vida útil ya ha culminado (La Tercera, 2019).

Dado lo anterior, ¿Se están aplicando las políticas necesarias para lograr mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en Chile?, es de suma importancia hacer todo lo posible por alcanzar estas metas y contribuir a toda costa con cada política de reducción de gases contaminantes considerando que las emisiones totales de gases de efecto invernadero se incrementaron en un 113,4 % entre 1990 y 2013.

En la Figura 2, se enuncian las metas que se implementarán en el sector de transporte 2016-2030:

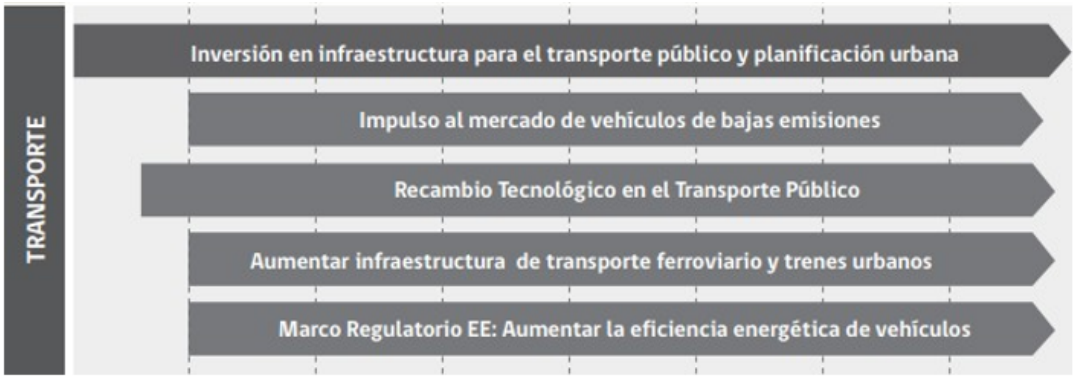

Figura 2. Metas para el sector transporte para el año 2030.

A lo largo de esta investigación se abordará específicamente el problema de las emisiones del sector del transporte y sus medidas de mitigación en el recambio tecnológico del transporte público como una medida de apoyar la transición hacia la electro movilidad definida para el año 2040 utilizando motores de gas natural comprimido. Este gas es simplemente gas natural almacenado a altas presiones, contiene un 95 % de metano y es uno de los combustibles más limpios y poco contaminantes, un motor de GNC reduce las emisiones de dióxido de carbono desde un 15 % a 90 %, un 65 % menos de monóxido de carbono (CO) y un 90 % menos de óxidos nitrosos (NOx) (Agas21, 2019).

Cabe mencionar que, en Los Ángeles, Estados Unidos, el transporte público eliminó el uso de diésel y ahora opera con gas natural en su totalidad con el fin de cumplir sus exigencias medioambientales. Lo mismo ocurre en Madrid donde los buses urbanos han estado introduciendo este combustible, logrando altos beneficios ambientales y económicos. Gracias a una implementación en el sector de transporte público de buses impulsados mediante un motor a base de GNC, se podrá aportar a la solución de ese gran problema mundial de contaminación y al cambio climático.

Es por esto que para poder clarificar la conveniencia ambiental y económica de ingresar buses de gas natural al sistema de transporte público se determinarán diversos escenarios donde se variará la proporción de buses propulsados por diésel, electricidad y gas natural donde se evaluarán los impactos ambientales y económicos que generaría este escenario, con el fin de determinar la mejor combinación

de tecnologías para contribuir a la transición a la electro movilidad definida para el año 2040.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar socialmente la conveniencia económica y ambiental en la implementación de buses de gas natural como una de las medidas de transición a la electro movilidad y su impacto en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el corto plazo a través de un análisis cuantitativo con el fin de clarificar la viabilidad de implementación y sus beneficios ambientales.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las principales variables económicas, técnicas y ambientales relacionadas con la implementación de esta nueva tecnología en el sistema de transporte público, generando una base sólida para determinar la viabilidad y beneficios de su implementación.
- Cuantificar el impacto de los medios de transporte actuales para compararlo con los impactos que generará el nuevo sistema, con el fin de esclarecer el beneficio que traerá la implementación de los buses GNC.
- Determinar distintos escenarios para comparar y verificar la conveniencia de ingresar buses propulsados con gas natural, variando la proporción de buses diésel, eléctricos y de gas natural del parque de buses en la región Metropolitana.
- Elaborar un análisis de sensibilidad para observar el comportamiento de las variables críticas y su impacto en el resultado final.

4. Alcance

Dentro del alcance del proyecto, para elaborar el flujo de costos y los distintos escenarios a comparar, el estudio se centrará estrictamente en Chile, Región Metropolitana, específicamente en la zona urbana. Se considerarán sólo variables operativas del sistema, es decir, variables relacionadas con la mantención, consumo, kilómetros recorridos por tipo de bus, factores de emisión, inversión, costos sociales de los distintos contaminantes, densidad poblacional y adquisiciones anuales de buses. Cabe destacar que no se considerarán costos de infraestructura, capacitaciones, salarios u otras variables no relacionadas con los costos operacionales mencionados anteriormente.

Por otro lado, los buses a analizar y sus costos de mantención y operación, serán obtenidos de una muestra de buses con distintas normas (EURO III EURO V, EURO VI, eléctrico y gas natural (Near Zero)) utilizando valores promedio de consumo, costo de inversión y costo de mantención.

Los escenarios a analizar, contemplarán la variación de proporción entre las distintas tecnologías de propulsión, es decir, diésel, eléctrico y gas natural con el fin de encontrar un valor óptimo que minimice los costos totales.

El periodo de análisis considera 20 años a partir del año 2020, siendo el año 2040 el término del análisis, donde se espera que el parque de buses sea completamente eléctrico. Lo anterior corresponde a la principal restricción del problema.

En cuanto a los contaminantes, se cuantificará el impacto de las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono utilizando sus costos sociales.

Finalmente para la comparación entre los distintos escenarios, se considerarán costos de inversión, toneladas emitidas y el indicador económico 'Valor Actual Neto (VAN)' en el mismo horizonte de estudio definido en 20 años, cuya tasa de descuento corresponde al valor social de ésta definida en un 6 %.

5. Marco Teórico

5.1. Cambio climático

El origen del cambio climático ha sido provocado por las actividades humanas cuando se inició la explotación y el uso de los combustibles fósiles elevando las concentraciones de Dióxido de Carbono a la atmósfera. Lo anterior ya está establecido de manera definitiva por el informe del Programa de Investigación de EEUU sobre el cambio global publicado en diciembre del 2017 titulado "US global Change Research Programe" y algunas de sus conclusiones más importantes son las siguientes:

El casi inminente cambio climático que tendrá lugar en las próximas décadas depende principalmente de la cantidad de gases de efecto invernadero (principalmente CO2) que se emitan y que se han estado acumulando desde la primera revolución industrial. Si no se producen reducciones a nivel global, la temperatura podría aumentar hasta los devastadores 5 ℃ . Si se toman las medidas adecuadas y de manera rápida, éste aumento podría limitarse a sólo los 2 ℃ , evitándose así los efectos irreversibles y más peligrosos del cambio climático.

La concentración de CO2 ha traspasado las 400 partes por millón, la última medición realizada en junio del año 2019 fue de 413,92 PPM (CO2 – Earth,2019), si esta concentración continúa ascendiendo en este siglo, podría llevar al planeta a una concentración atmosférica no experimentada desde hace millones de años.

Los aumentos de CO2 durante los últimos 15 - 20 años son proporcionales al desarrollo industrial y económico, si bien durante crisis económicas las emisiones de este gas disminuyeron, esto no quiere decir que si se mantiene esas disminuciones se invierta la situación manteniendo la temperatura bajo los 2 ℃ .

El periodo actual es el más caluroso de la historia moderna, durante los últimos años se han superado récords de periodos de calor y frio extremos, los últimos cinco años (2015-2019) han sido los

más calurosos para el planeta.

Como ya se ha visto, existen muchos otros aspectos en que el cambio climático ha afectado al planeta, se han registrado cambios en la temperatura de la superficie terrestre, en la atmósfera y océanos, se han visto grandes derretimientos de los glaciares, disminución de espesores de nieves eternas, aumento de vapor y acidificación de océanos.

Por otro lado, el promedio del nivel del mar ha aumentado de 14 a 18 cm desde 1900, este aumento ha sido el más grande ocurrido en cualquier siglo anterior. Lo anterior afecta directamente a todo el ecosistema, vidas humanas, biodiversidad y calidad del agua, ya sea para consumo humano o para actividades agrícola-industriales. En todo el mundo la incidencia de incendios forestales ha aumentado drásticamente, en particular en Chile, los incendios seguirán ocurriendo con mayor fuerza y daños a medida que la temperatura global aumenta (El Mostrador,2018).

Pero ¿Cómo es la situación en nuestro país?, ¿Qué podemos hacer como país para revertir en un pequeño porcentaje esta situación? Como se ha mencionado, los gases que producen el calentamiento global son el dióxido de carbono, metano, el ozono, los clorofluorocarbonados y el vapor de agua. Por lo tanto, los esfuerzos deben centrarse en la detención de emisiones de estos gases y su concentración en la atmósfera. Para el año 2050 se debe haber reducido las emisiones de estos gases en un 40-70 % para cumplir la meta de no sobrepasar los 2 ℃ .

¿Por qué Chile es un país altamente vulnerable frente al cambio climático? Nuestro país cumple 7 de 9 criterios de vulnerabilidad que lo hacen extremadamente frágil:

1. Áreas costeras de baja estatura.

2. Zonas áridas y semiáridas.

3. Zonas de bosques.

4. Propensión a los desastres naturales.

5. Sequía y desertificación.

6. Zonas urbanas con contaminación atmosférica.

7. Ecosistemas montañosos.

Los últimos análisis, científicos indican que, si actuamos ya, se podría reducir las emisiones de aquí a 11 años y frenar el aumento de la temperatura media anual.

Los sistemas de transporte son responsables del 15 % del consumo mundial del petróleo y el uso del automóvil es una de las principales causas de contaminación atmosférica en las grandes ciudades como Santiago.

Transformar el sistema de transporte sin usar combustibles fósiles para el año 2040 es una tarea muy difícil pero no imposible. Para lograr este objetivo se debe prohibir la explotación del petróleo y detener la fabricación de motores de combustión y reemplazarlos por motores eléctricos y de GNC.

En Chile aproximadamente el 68 % de la energía que se consume proviene de combustibles fósiles.

Además, según un informe elaborado por autoridades locales, luego de analizar 6.655 buses del Transantiago, se llegó a la conclusión de que la flota liberó un total de 434.745,3 toneladas de contaminantes entre enero y octubre del 2018. Los que presentan mayores emisiones son los vehículos con tecnología antigua, con motores tipo Epa 98 (norma de emisión vehículos pesados) o EURO III (norma europea de emisiones del año 2000 para vehículos pesados) y dotados con filtro. Cada uno de estos liberó cerca de 96.646 kilos de compuestos nocivos. En tanto, los articulados sin filtro emitieron 87.189,7 kg por bus (Cesar Muñoz, 2019).

A pesar de lo anterior, Chile posee una gran ventaja, y esta se trata de los abundantes recursos energéticos naturales que posee. Esto permite una buena transición para reemplazar los combustibles fósiles por energías más limpias.

Anteriormente se ha mencionado que el principal agente contaminante es el dióxido de carbono,

pero ¿Cómo este afecta a la atmósfera? Este gas es uno de los principales responsables del efecto invernadero.

5.2. Efecto Invernadero y contaminantes locales

Este es un proceso natural que resulta de absorción y emisión de los flujos de calor en la atmósfera, este efecto contribuye a establecer una temperatura estable en la tierra. Sin embargo, la presencia de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero bloquean y reflejan parte de la radiación proveniente de la superficie, provocando un efecto de rebote donde la energía bloqueada se devuelve a la superficie terrestre aumentando su temperatura (CIIFEN,2017).

5.2.1. Balance Energético

El Sol es la fuente principal emisora de energía que recibe el planeta, esta energía llega en forma de radiación electromagnética. Este flujo de energía es fijo y se llama constante solar, tiene un valor de alrededor de 1361 W/m2 y la cantidad media de energía solar que llega al planeta es de aproximadamente 342 W/m2. El sistema debe estar en equilibrio en un periodo suficientemente largo, esto se logra cuando la radiación solar entrante a la tierra es compensada por la radiación saliente o emanada por esta. Esto quiere decir que, si la radiación saliente es menor que la entrante, se produciría un calentamiento. Toda alteración de este balance de energía ya sea por causas naturales u originado por el ser humano, llevaría a un cambio en el clima en el tiempo.

Estos flujos de energía pueden ocasionar fenómenos en la atmósfera, en la superficie o en los océanos. La radiación entrante se puede dispersar en la atmósfera o ser reflejada por nubes o aerosoles. La superficie terrestre también puede reflejar y absorber esta radiación donde finalmente vuelve a ser emitida a la atmósfera.

El problema es que la presencia de CO2 y los gases de efecto invernadero están bloqueando la

salida de la radiación reflejándola hacia la tierra, siendo absorbida por ésta provocando el aumento de temperatura.

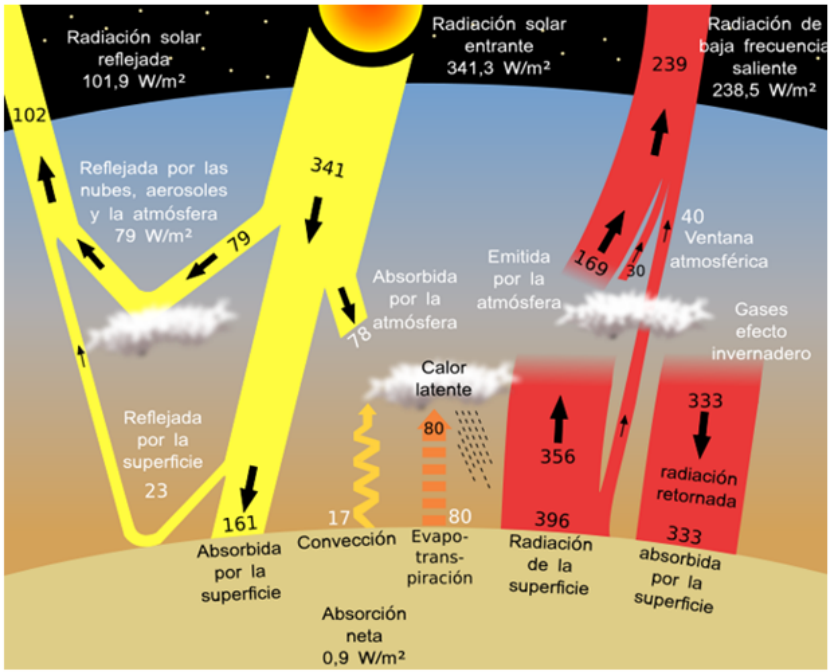

Figura 3. La superficie de la Tierra recibe del Sol 161 w/m2 y del Efecto Invernadero de la Atmósfera 333w/m², en total 494 w/m2, como la superficie de la Tierra emite un total de 493 w/m2 (17+80+396), supone una absorción neta de calor de 0,9 w/m2, que en el tiempo actual está provocando el calentamiento de la Tierra. Fuente: CIIFEN, 2017.

5.2.2. Contaminantes locales

Para esta investigación, como se ha mencionado en el alcance del proyecto, se analizarán los efectos y características de dos contaminantes locales, el material particulado y los óxidos de nitrógeno.

- Material particulado (MP): Es un contaminante atmosférico correspondiente a toda partícula líquida o sólida que se encuentra en suspensión. Estas partículas se clasifican según su diámetro en 'grueso' (MP10), 'fino' (MP2,5).

  El material particulado grueso es aquel cuyo diámetro es menor a 10 micrómetros, en cambio el material particulado fino es aquel cuyo diámetro de las partículas es menos a 2,5 micrómetro, éste se encuentra contenido en el material partícula grueso (MP10).

Las partículas de diámetro menor a 10 micrómetros, es decir el MP10, corresponde al material particulado respirable. Estas penetran a lo largo de todo el sistema respiratorio hasta los pulmones, produciendo irritaciones e incidiendo en diversas enfermedades.

Por lo tanto, La exposición a estas partículas puede afectar tanto a los pulmones como al corazón. Algunos de sus efectos son (EPA, 2019):

1. Muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares.
2. Infartos de miocardio no mortales.
3. Latidos irregulares.
4. Asma agravada.
5. Función pulmonar reducida.
6. Síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar.

Estos contaminantes poseen un costo social de 0,9 dólares/ton*persona equivalentes a 0,0248 UF/ton*persona.

Por lo tanto, para cuantificar económicamente un impacto social, se debe tener en cuenta la cantidad de personas que se verán afectadas. De esta forma, se debe conocer la población urbana de Santiago ya que ahí será donde circulen los buses del transporte público.

- Óxidos de nitrógeno (NOx): Los óxidos de nitrógeno son generados por las altas temperaturas que se producen en los procesos de combustión. Estos reaccionan en la atmósfera formando ácido nítrico o nitratos. Este ácido es muy corrosivo y llega a ser uno de los constituyentes de las lluvia ácida.

  El dióxido de nitrógeno puede impactar gravemente al ser humano. Puede ocasionar diversas

enfermedades respiratorias, disminución de la capacidad de los pulmones, además de derivar en casos de enfisema pulmonar (enfermedad obstructiva crónica en estos órganos) (La Vanguardia, 2019).

Estos contaminantes poseen un costo social de 0,025 dólares/ton*persona equivalentes a 0,000689 UF/ton*persona y al igual que el material particulado, para determinar el costo social total se debe tener en cuenta la cantidad de población que este contaminante afecta.

5.3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sector en Chile

La quema de combustibles en los sectores eléctricos y de transporte representan la mayor proporción de emisiones, siendo alrededor de un 60 % de las emisiones totales del sector energético. La industria también es un contribuyente significativo, en donde el uso de energía en la minería del cobre y otros, es la fuente más grande. El resto de las emisiones proviene de los sectores comercial, público y residencial, principalmente asociados a la producción de calor en los hogares, oficinas y edificios públicos. A pesar del aumento del uso de energías renovables en el país en la última década, el sector energético depende principalmente de combustibles fósiles, representando cerca del 65 % del balance energético primario el 2013. Las principales fuentes primarias utilizadas son el petróleo, que representa el 30,2 % del consumo total, la biomasa (29,1 %), el carbón (22,3 %) y el gas natural (12 %).

La Figura 4 muestra cómo se descomponen las emisiones de GEI resultantes, por tipo de combustible: los combustibles líquidos lideran la lista con un 51,4 %, seguidos por combustibles sólidos como el carbón, con un 35,8 %, combustibles gaseosos con un 10,9 % y biomasa, con un 1,8 %.

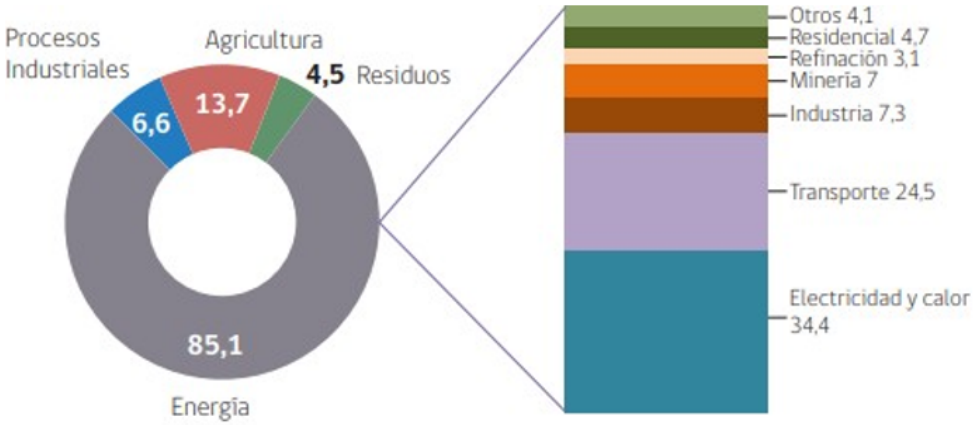

Figura 4. Emisiones GEI de Chile por Sector, MtCO2e. Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile (SNI Chile,2016).

Como puede observarse, las emisiones provenientes del sector energía en especial en el sector de transporte, electricidad y calor son altísimas, el plan en que el país ha tratado de reducir las emisiones actualmente es el llamado plan de mitigación. "Lo consideramos como un primer paso en pos de lograr una reducción paulatina de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en el sector energía de Chile hacia el año 2050, cuya magnitud deberá estar en línea con los umbrales de emisión que la ciencia a nivel mundial nos ha señalado. Además, con este Plan de Mitigación estamos dando respuesta al compromiso establecido en la Política Energética Nacional (PEN) de contar con dicho instrumento, y a la vez, dando pasos decididos para avanzar en el cumplimiento de los compromisos de Chile ante el Acuerdo de París" (Ministerio de Energía,2017).

5.4. Gas Natural Comprimido (GNC)

El GNC no es más que gas natural comprimido a alta presión, logrado mediante un proceso de compresión 200-250 bar. Su volumen es considerablemente menor que en su estado gaseoso (unas 600 veces menor). Lo anterior minimiza considerablemente el costo de transporte sin perder sus características fundamentales. El gas natural comprimido es una mezcla de hidrocarburos ligeros, que contiene más de un 95 % de metano y proporciones menores de etano, propano, butano, nitrógeno y dióxido de

carbono. Sus especificaciones y propiedades que serán utilizadas en esta investigación son:

- Metano (95 %): CH4
- A 1 atm su temperatura de ebullición es de -160°C
- Poder calorífico: 11.990 kcal/kg
- Peso específico: 650 kg/m3

Este es el combustible fósil más puro y limpio que existe, genera muchísimo menos emisiones de gases de efecto invernadero y material particulado que los demás combustibles fósiles, por lo que lo convierte en un combustible amigable con el ambiente, esta pureza implica además una menor generación de emisiones en su producción, esto lo hace uno de los combustibles preferidos para la reducción de emisiones de dióxido de carbono y otros elementos.

5.5. Motor de Gas Natural Comprimido

Anteriormente se mencionaron los beneficios del uso del gas natural como combustible siendo conveniente para su aplicación en motores para buses del transporte público.

¿Cómo funciona un motor de gas natural comprimido (también llamado gas natural vehicular)?

Para que un motor funcione con gas natural debe ser de explosión, técnicamente hablando el ciclo termodinámico que sustenta el funcionamiento es el ciclo Otto, se aplica en los motores de combustión interna de encendido provocado por una chispa eléctrica. En automóviles el ciclo utilizado es el de cuatro tiempos ya que tiene un buen rendimiento y contamina mucho menos que uno de dos tiempos.

El proceso de combustión es muy similar al de un motor de gasolina, el aire aspirado por el motor se mezcla en el colector de admisión con el gas natural por efecto Venturi o por inyección, el efecto Venturi sustenta el hecho de que cuando aumenta la velocidad de un fluido, su presión disminuye, es

decir, si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Permite la inyección de carburante en un motor de combustión.

5.5.1. Componentes básicos de un vehículo de GNC

A continuación, se presentan los componentes básicos que posee un vehículo propulsado con gas natural (Agas21, 2019).

1. Botella de gas natural comprimido: Es un depósito de combustible que almacena el gas comprimido a 200 bar de presión, los más comunes son de acero sin soladura. En los vehículos que vienen de fábrica a GNC este estanque se sitúa bajo el piso del vehículo de manera de no disminuir la capacidad interior.

2. Válvula de botella: Se instala en la salida del gas del estanque, este es un dispositivo de seguridad en caso de exceso de presión, además permite la apertura y el cierre rápido del circuito.

3. Tubos de conexión: Consisten en tubos rígidos de alta presión que conectan el estanque de GNC con el motor.

4. Regulador de presión: Regula la presión para la alimentación de GNC al motor, a través de esta la presión se puede regular entre la presión atmosférica y 3 bar de presión dependiendo del sistema de alimentación.

5. Indicador de nivel: Indica el nivel de GNC disponible en la botella de almacenamiento al interior del vehículo.

6. Válvula de llenado: Se trata de una válvula de carga de GNC que puede estar instalada dentro del compartimento del motor o en algún lugar exterior del vehículo.

7. Manómetro: Indica la presión entre el estanque y el regulador de presión, esta mide continuamente

la presión de GNC almacenado en el depósito. Este instrumento envía la señal al panel del vehículo la cantidad de gas disponible.

5.6. Herramientas para la evaluación

Para obtener el mejor escenario, se realizará una evaluación social, que al igual que una evaluación de proyecto de inversión privada utiliza criterios similares para determinar la viabilidad de ejecutarlo.

De esta forma, una evaluación de proyecto social difiere en la valoración de ciertas variables para realizar dicha evaluación. En este caso se utilizarán precios sociales para los distintos contaminantes locales y, por supuesto, se utilizarán los precios sociales para el contaminante global dióxido de carbono. Así, se podrá cuantificar económicamente el impacto ambiental que generaría cada escenario.

Este tipo de proyecto buscará medir el efecto, tanto directo como indirecto, que tendrá el proyecto para la sociedad o comunidad en la que estará inserto.

La tasa utilizada para los proyectos sociales en Chile, es de un 6 % por lo que esta será la tasa con la cual se evaluarán los costos finales.

Para comparar económicamente los distintos escenarios, se utilizará el valor actual neto (VAN).

El VAN o Valor Actual Neto también llamado VPN (Valor Presente Neto) es una herramienta que consiste en actualizar los flujos futuros de un proyecto para determinar cuánto se va a ganar o perder con esa inversión. Es decir, indica el flujo de efectivo generado al día de hoy del proyecto en un horizonte establecido de planificación. Para calcularlo se utilizará una tasa 'r' definida en un 6 % para proyectos sociales. Esta herramienta expresa la rentabilidad del proyecto en términos monetarios. Su fórmula es simple y fácil de utilizar, esta se expresa de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{Fe_t}{(1+r)^t} \tag{1}$$

Donde:

Fet: Corresponde al flujo de efectivo en el periodo "t".

r: Tasa de descuento o costo de oportunidad.

n: horizonte de evaluación del proyecto.

Por lo que, si el valor del VAN es positivo, quiere decir entonces que el proyecto es rentable, es decir, genera riqueza al inversionista. Al contrario, si este valor es negativo, indica que de llevarlo a cabo se generarían perdidas, por lo que la realización del proyecto no sería conveniente. Sin embargo para efectos sociales un valor negativo no necesariamente puede significar un mal proyecto, si el fin del estudio es cuantificar económicamente el impacto al generar emisiones, esta herramienta podría ser de gran utilidad. Es importante definir correctamente el horizonte de planificación ya que si es muy pequeño en comparación a la envergadura de un proyecto es muy probable que este valor sea negativo, siendo positivo en un horizonte de tiempo mayor.

6. Antecedentes

6.1. Producción mundial de gas natural

A nivel mundial la producción de gas natural está creciendo constantemente y experimenta el mayor aumento de producción de todos los combustibles fósiles durante el período de proyección en todos los casos. El crecimiento en la producción de gas natural incentiva el aumento del consumo interno, particularmente en los sectores industrial y eléctrico, y mayores niveles de exportaciones de gas natural.

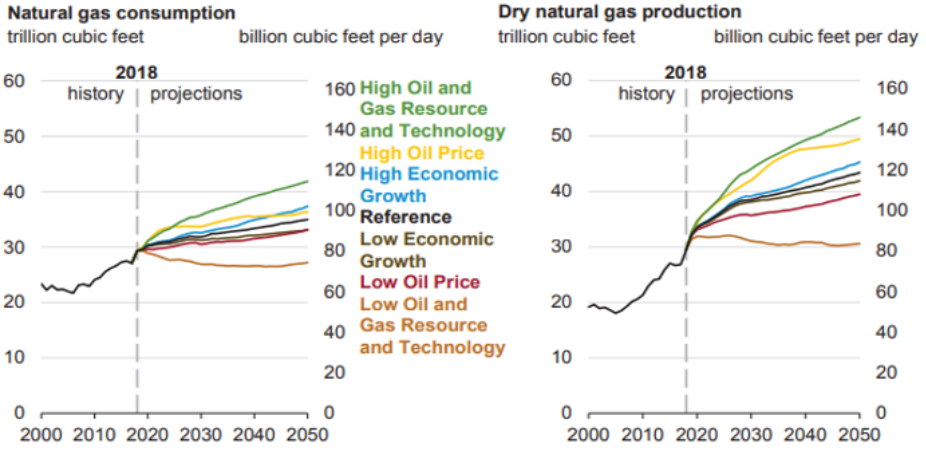

Figura 5. Consumo y producción proyectada de gas natural para el año 2050. Fuente: La Tercera.

La producción de gas natural en el caso de referencia (línea negra en el gráfico) crece un 7 % por año de 2018 a 2020, que es más que la tasa de crecimiento promedio de 4 % por año entre 2005 a 2015. Sin embargo, después de 2020, el crecimiento se desacelera a menos del 1 % por año tanto en el consumo interno como en la demanda de exportaciones de gas natural de Estados Unidos.

En Chile para el año 2017 (año de estudio más reciente) se consumieron 4.910,51 millones de m3 de gas natural (Energía Abierta, 2019), donde 4168,86 millones de m3 corresponde a importaciones (cerca de un 85 %), con una producción bruta de solo 1.225,6 millones de m3.

Según el informe de importaciones de Energía Abierta, el gas natural que se abastece a Chile

proviene de 5 países que poseen reservas. Estos países son Trinidad y Tobago, Estados Unidos, China, Argentina y Guinea, donde la decisión de elegir desde donde importar depende factores como el precio establecido (Energía Abierta, 2019).

6.2. Situación actual en el transporte público en Chile

Según un informe solicitado por ley de transparencia al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), actualmente existen 6.979 buses en el transporte público, donde 6.413 de ellos son diésel, los cuales se diferencian por su norma, los EURO III, cuya norma es la más antigua, alcanza una cifra de 4.147 buses, seguido por los buses con norma EURO V con 1.226 máquinas en circulación, luego los buses con norma EURO VI con 929 buses y finalmente 565 buses eléctricos.

Es decir, actualmente en Chile existen 5.373 (EURO III y EURO V) buses en el transporte público con altos índices de contaminación, donde, además, la vida útil de estos se está acabando o ya se acabó. Por esta razón, existe una gran oportunidad de incorporar nuevos buses a gas natural como parte de la transición de la estrategia nacional de electro movilidad, cuya meta es ofrecer en 2040 un servicio completamente basado en movilidad eléctrica en el transporte público.

Por otro lado, Chile presentó en julio de 2019 el primer autobús a gas natural de origen chino suministrado por Metrogas para el sistema público de transporte que ya ha circulado a modo de prueba, este autobús es de la marca King Long y será parte del servicio 104 que conecta el sector de Mall Plaza Tobalaba en Puente Alto con la estación de Metro Los Leones en Providencia.

Este nuevo bus cuenta con un motor L9N "Near Zero"desarrollado por Cummins. Este motor funciona con gas natural con la normativa Near Zero, conocida por ser una de las normas más estrictas del mundo. Con el fin de cumplir esta exigencia, el motor realiza un proceso especial de combustión, donde se quema completamente una mezcla que no emite oxígeno en su escape, así, un catalizador de tres vías permite controlar los gases de efecto invernadero emanados del bus, disminuyendo notoriamente

sus emisiones.

"Una vez en operación, la motorización de este bus permitirá reducir aproximadamente un 80 % las emisiones de material particulado, un 90 % las emisiones en óxidos de nitrógeno (NOx) y un 70 % las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, en comparación a un vehículo que utiliza diésel en similares características" (Cummins, 2019).

6.3. Estrategia nacional de Electromovilidad

Hoy en día, en Chile se está llevando a cabo la Estrategia Nacional de Electromovilidad la cual permitirá masificar en forma segura y sustentable la electricidad como medio de transporte en los próximos años, permitiendo la llegada de vehículos de mayor eficiencia energética con menores emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Además, busca acelerar la introducción de tecnologías más eficientes en el parque vehicular del país.

El objetivo principal es delinear las acciones que Chile debe tomar en el corto y mediano plazo para lograr que el 40 % de los vehículos particulares y el 100 % de los vehículos de transporte público sean eléctricos al 2050, aportando así a las metas de eficiencia energética y mitigación de gases de efecto invernadero, contribuyendo a mejorar la movilidad y la calidad de vida de las personas y a potenciar la presencia del país como líder regional en la materia (Ministerio de Energía, 2020). Hay que destacar que como una medida para la estrategia carbono neutralidad, se ha adelantado esta meta en 10 años debido a la alta electromovilidad de los buses del transporte publico y a la expansión del metro a regiones.

Algunos de sus objetivos específicos son:

- Establecer las regulaciones y requerimientos necesarios de estandarización de componentes que favorezcan un desarrollo eficiente de la electromovilidad desde los puntos de vista energético, ambiental y de movilidad.

- Impulsar decididamente la penetración de los vehículos eléctricos en el transporte público mayor y menor en las distintas ciudades del país.
- Apoyar la investigación y desarrollo de la electromovilidad y potenciar la formación del capital humano en sus distintos niveles que permita su avance.
- Impulsar el desarrollo de la electromovilidad, generando nuevos equilibrios que permitan que el mercado se sustente a sí mismo.

Por lo tanto, se tomarán en cuenta estas estrategias a nivel nacional para cada escenario a analizar.

7. Metodología

Los buses para comparar serán seleccionados de acuerdo con las tecnologías más recientes que se han incorporado al transporte público, las cuales son:

- EURO VI
- Eléctricos
- Gas Natural

Esta selección se basa principalmente en que son tecnologías recientes que han tomado fuerza en su incorporación en el transporte debido a que son tecnologías eficientes y bajas en emisiones.

Con el fin de esclarecer las características de cada tecnología a comparar, se utilizará una metodología de comparación por factores generales, que consiste en identificar factores comunes comparables en cada objeto de análisis. En este caso, las características comparables serán:

- Consumo: Se refiere a la cantidad de combustible que se ha consumido por cada kilómetro recorrido.
- Costo Mantenciones: Es el costo por kilómetro en relación a las mantenciones requeridas.
- Costo bus: Hace referencia al costo de mercado del bus analizado.
- Carrocería: Estructura que se apoya sobre la base y que alberga en su interior al conductor, los pasajeros, la carga, motores y distintas estructuras mecánicas del vehículo.
- Vida útil: Se compararán también, la vida útil del vehículo, que hace referencia al tiempo desde su compra hasta el desecho.

- Normativa de emisión: Las normativas de emisión son una medida de protección medioambiental cuyo propósito es limitar las emisiones de ciertos gases contaminantes que emiten los vehículos de carretera. Entre estas se encuentran la norma EURO III, EURO V y EURO VI.

Luego de realizar la selección de los buses y su comparación de precios, mantenciones, consumo, etc. Se procederá a cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero para cada tecnología. De esta forma se construirá una proyección de estas emisiones por cada tecnología individualizada al año 2050.

En primer lugar se cuantificarán las emisiones para los buses de las distintas tecnologías utilizando su factor de emisión correspondiente y los kilómetros recorridos, se tomará un promedio de 90.000 km anuales por bus (Directorio de Transporte Publico Metropolitano, 2019).

Enseguida, para cuantificar el impacto total en Santiago a lo largo de los años, se debe proyectar el parque de buses al año 2040 con el fin de determinar las emisiones y costos totales por todo el sistema de transporte público en la región Metropolitana.

A continuación, se determinarán las emisiones totales por tipo de tecnología utilizando el valor obtenido de kilogramos de dióxido de carbono y contaminantes locales por kilómetro recorrido.

Luego, utilizando los precios sociales del dióxido de carbono y contaminantes locales, se procederá a calcular el costo social total de ambos contaminantes.

Finalmente, se elaborará un flujo de caja con el fin de determinar el mejor escenario de implementación de buses de gas natural, considerando un equilibrio óptimo entre la cantidad de buses Diesel, eléctricos y a gas natural. Para esto se modificarán los porcentajes de compra de nuevos buses de los distintos tipos para lograr encontrar el mínimo de inversión y costos totales.

8. Desarrollo

8.1. Escenario económico y ambiental con la implementación de buses a gas natural

8.1.1. Situación base

Mediante información solicitada por ley de transparencia a la Subsecretaría de Transportes (MTT), se tiene la siguiente composición del parque de buses en Santiago para el año 2020, cabe destacar que se considerará despreciable la cantidad de buses a gas natural hasta el presente año.

Norma	**Buses**
Eléctrico	565
EPA 98 O EURO III	323
EPA 98 O EURO III AV	1202
EPA 98 O EURO III AV F	2223
EPA 98 O EURO III F	399
EURO IV	1
EURO V	1336
EURO VI	929
VPE Vehículo propulsión eléctrica	1
Total	**6979**

Tabla 1. Composición actual del parque de buses en Santiago. Fuente: MTT

Esta información se ha resumido en la siguiente tabla:

Tecnología	**Buses**
Diésel	6413
Eléctrico	566
Gas Natural	0

Tabla 2. Resumen de la composición del parque de buses para el año 2020. Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la gran mayoría corresponde a buses de tipo diésel.

Por otro lado, para cuantificar el impacto ambiental en la actualidad, se tiene un estudio del año 2018 (La Tercera, 2019) que plantea que 6.655 buses del Transantiago liberaron en total 434.745,3 toneladas de contaminantes a la atmósfera. De esa cantidad de buses 2.605 (39,8 %) corresponden

a EPA 98 o EURO III con filtro. Otros 2.528 (37,9 %) son de la misma tecnología, pero sin filtro, y los Euro V eran 1.464 (22 %). En ese periodo, sólo había diez de los más modernos Euro VI en circulación (0,2 %) y tres buses eléctricos. Al analizar las emisiones por tipos de bus, los que emiten mayor contaminantes son los buses articulados con tecnologías de motor más antigua, tipo Epa 98 o Euro III con filtros. Estos liberaron 96.646,6 kg y sin filtro liberaron 87.189,7 kg. De los no articulados Euro III, los dotados con filtro liberaron 65.605,1 kg y sin filtro 70.936,2 kg. Por otro lado, los buses Euro V y euro VI liberaron 56.060 kg y 58.307,7 kg respectivamente.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las distintas tecnologías y sus emisiones:

Tecnología	BUS EURO III		BUS ARTICULADO	
Contaminación (kg)	EPA 98 O EURO III	EPA 98 O EURO III con filtro	EPA 98 O EURO III	EPA 98 O EURO III con filtro
PM10	18,4	5,3	20,9	6,5
PM25	16,7	3,3	19	4,3
HC	35,7	27,9	39,5	45,4
NOX	685,1	534,3	860,8	971,7
CO	179,2	165,3	240,7	269,7
CO2	70.001,10	64.869,00	86.008,80	95.349,00
Total	**70.936,2**	**65.605,1**	**87.189,7**	**96.646,6**

Figura 6. Comparación de emisiones entre los buses que circulan actualmente en el servicio de transporte público durante un periodo de 8 meses, se observan las cantidades de contaminantes entre los buses EURO III o EPA 98 articulado y no articulado. Fuente: La Tercera.

Tecnología	EURO V	EURO VI
Contaminación (kg)		
PM10	7,1	4,1
PM25	5,5	2,3
HC	1,9	1,9
NOX	402	43
CO	151,9	77,9
CO2	55.491,60	58.178,50
Total	56.060,0	58.307,7

Figura 7. Comparación de emisiones entre los buses que circulan actualmente en el servicio de transporte público, se observan las cantidades de contaminantes entre los buses EURO V o EURO VI articulado y no articulado. Fuente: La Tercera.

8.2. Comparación de costos entre las distintas tecnologías seleccionadas diésel, eléctricos y a gas natural)

En primer lugar, se deben conocer los consumos y costos de mantención de los buses con norma EURO III y EURO V con el fin de cuantificar los costos en los primeros años en el flujo que se elaborará.

Se ha entrevistado a Ariel Cruz Pizarro, escritor y blogger de transporte en Chile, y facilitó la información de consumo para los buses EURO III y EURO V recalcando que este es muy similar entre ambas normas, en ambos casos existen buses articulados cuyo consumo es 1 km/lt y no articulados con 2 km/lt, al existir un mix entre ambos, se tiene un promedio de 1,5 km/lt equivalentes a un consumo de 0,67 lt/km.

Incluso para EURO VI, el consumo es similar con un valor de aproximadamente 0,56 lt/km

Por otro lado, se tiene un costo de mantención de estos buses con un valor similar de 0,00418 UF por kilómetro recorrido.

Así, se obtiene la siguiente tabla resumen:

BUSES normativa antigua	**Consumo Lt/km**	**Mantenciones UF/km**
Bus EURO III	0,67	0,00418
BUS EURO V	0,67	0,00418

Tabla 3. Consumo y costos de mantención de los buses con normativa EURO III Y EURO V. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, según información extraída del estudio de investigación "Evaluación económica y social de la incorporación de buses eléctricos al transporte público urbano de Santiago" (Patrick Oemick, 2019), se presentarán las comparaciones entre los precios y los costos de operación de los buses cuya tecnología ha sido seleccionada de acuerdo con la metodología expuesta anteriormente. Como se ha mencionado, se compararán buses cuyas tecnologías son diésel EURO VI, eléctricos y a gas natural, pero también es importante conocer los costos de un bus diésel de normativa más antigua, debido a que estos afectarán al flujo de costos en los años iniciales. De esta forma se han seleccionado los siguientes buses.

8.2.1. Bus Mercedes Benz 500 EURO VI

Este modelo 500 LE cumple con la normativa de emisiones Euro VI y se encuentra circulando a partir del año 2016. Este bus cumple con todos los estándares internacionales, mide 13.2 metros y posee puertas en ambos costados. Estos buses son ensamblados en Brasil y cuentan con nuevos sistemas de seguridad en todas sus versiones, ABS, ESP con Tracción Antideslizante.

Características	
Consumo Diésel	**0.54 Lt/km**
Costo Mantenciones	**$120/km**
Costo total	**220.000 USD**
Carrocería	Caio Mondego II
Vida útil	**1 millón de km 12 años**
Normativa de Emisión	**Euro VI EPA 2010**

Figura 8. Características comparativas del bus Mercedes Benz 500 EURO VI. Fuente: Patrick Oemick, 2019.

8.2.2. Volvo BR EURO VI

El bus Volvo modelo B8R LE cumple con normativa de emisiones Euro VI y se encuentra circulando desde el año 2017, fue adquirido por la empresa Redbus y cumple con todos los estándares internacionales, mide 13.2 metros y posee puertas en ambos costados, cuenta con capacidad para 99 pasajeros de los cuales 32 pueden ir sentados

Características	
Costo Consumo	**0.58Lt/km**
Carrocería	**Marcopolo Torino**
Costo total	**225.000 USD**
Costo Mantenciones	**$120/km**
Vida útil	**1 millón de km 12 años**
Normativa de Emisión	**Euro VI EPA 2010**

Figura 9. Características comparativas del bus Volvo BR EURO VI. Fuente: Patrick Oemick, 2019.

8.2.3. BYD K9 Eléctrico

Este bus eléctrico BYD es de origen chino y opera con 12 baterías, es el primer bus eléctrico que operó en Chile con la empresa Metbus, su autonomías es de aproximadamente 250 kilómetros y su

tiempo de carga es de aproximadamente 3 horas, sus dimensiones son 12 metros de largo y posee 31 asientos.

Caractrísticas	
Consumo	1,57 kWh/km
Costo Mantenciones	$135/km
Costo Total	285.000 USD
Vida Útil	10-14 años
Instalación de Cargador	15.000 USD

Figura 10. Características comparativas del bus BYD K9 Eléctrico. Fuente: Patrick Oemick, 2019.

8.2.4. Bus Yutong Eléctrico

Bus eléctrico de origen chino, posee un motor de 324 kw que funciona con 12 baterías, su autonomía es levemente mayor al BYD K9 utilizado por Metbus, y es posible cargar en aproximadamente 2,5 horas, sus dimensiones son 12 metros de largo y posee 30 asientos.

Caractrísticas	
Consumo	1,48 kWh/km
Costo Mantenciones	$130/km
Costo Total	287.000 USD
Vida Útil	10-14 años
Instalación de Cargador	13.000 USD

Figura 11. Características comparativas del bus Yutong Eléctrico. Fuente: Patrick Oemick, 2019.

8.2.5. Bus King Long Motor Cummins L9N 'Near Zero'

Este bus, cuenta con el estándar Red, y es operado por la empresa STP, posee una capacidad para transportar 101 pasajeros, también cuenta con una autonomía superior a los 400 kilómetros.

Es traído a Chile por Vivipra, mientras que la empresa MetroGas se encargará de proporcionar el combustible y el punto de carga respectivo. Por otro lado, se tiene un estudio realizado por "National Renewable Energy Laboratory" (NREL,2008) que establece la siguiente fórmula para determinar el costo de mantenimiento de los buses de gas natural:

$$Costo\,por\,km = \frac{(H \cdot Chh + Cp))}{km} \tag{2}$$

Donde,

H: Horas de trabajo.

Chh: Costo mano de obra por hora.

Cp: Costo de las partes.

Adicionalmente, se tiene la siguiente información:

Bus	**Años de evaluación**	**Distancia km**	**partes USD**	**Horas recorridas**
CNG	1	440.710	99.980	5.133

Tabla 4. Información del kilometraje, horas de trabajo y precio de las partes del bus de gas natural. Fuente: National Renewable Energy Laboratory.

Donde las partes corresponden a filtros, sistemas de enfriamiento, bujías, sistema eléctrico, ajustes, ventilación, entre otros. Por otro lado, un mecánico de buses en Chile posee una renta promedio de $504.000 ofrecida por STP, por lo que, tomando jornadas de 45 horas semanales, se obtiene un costo de hora hombre (Chh) de $2.800 (Mipleo, 2020). Así, extrapolando los datos del estudio a Chile con un valor de dólar de $812,19 al día 19 de junio del 2020, se obtiene lo siguiente:

$$Costo\,por\,km = \frac{(5{,}133\,[h] \cdot 2{,}800\left[\frac{\$}{h}\right] + 99{,}980\,[USD] \cdot 812,9\left[\frac{\$}{USD}\right])}{440{,}710\,[km]} \tag{3}$$

$$Costo\,por\,km = \$216,8 \tag{4}$$

Con esto, se ha elaborado la tabla comparativa para el bus con tecnología de gas natural.

Caractrísticas	
Consumo	0,29 Lt/km
Costo Mantenciones	$217/km
Costo Total	275.000 USD
Vida Útil	10-12 años

Figura 12. Características comparativas del bus King Long Cummins. Fuente: Elaboración propia.

Con esta información se procede a calcular en primer lugar los costos de operación de cada bus, teniendo en cuenta la proyección de precios del combustible.

8.3. Proyección de Precios de combustible

Para obtener los costos de operación de cada bus, se debe tener en cuenta los precios del combustible de las 3 tecnologías, así, teniendo la cantidad de kilómetros recorridos por bus, su consumo, y el precio de los combustibles, se obtendrá el costo total por kilómetro recorrido en operación.

Desde la Comisión Nacional de Energía, el ministerio de Energía y el sitio web Bencina en Línea (Bencina en Línea, 2020), se ha construido una tabla comparativa hasta el año 2040 de los precios del combustible, donde los precios están en UF/litro para el caso de diésel y gas natural y UF/kWh para los eléctricos.

Año	Diésel UF/lt	Gas UF/lt	Electricidad UF/kWh
2019	0,0157	0,0161	0,00151
2020	0,0165	0,0168	0,00161
2021	0,0171	0,0169	0,00159
2022	0,0173	0,0170	0,00148
2023	0,0179	0,0173	0,00150
2024	0,0187	0,0178	0,00143
2025	0,0192	0,0184	0,00142
2026	0,0200	0,0187	0,00136
2027	0,0207	0,0189	0,00139
2028	0,0212	0,0193	0,00143
2029	0,0217	0,0194	0,00148
2030	0,0222	0,0195	0,00134
2031	0,0226	0,0195	0,00129
2032	0,0230	0,0199	0,00129
2033	0,0233	0,0200	0,00131
2034	0,0237	0,0203	0,00133
2035	0,0241	0,0205	0,00134
2036	0,0244	0,0207	0,00137
2037	0,0246	0,0208	0,00138
2038	0,0249	0,0209	0,00139
2039	0,0251	0,0210	0,00141
2040	0,0254	0,0213	0,00142

Tabla 5. Proyección de precios de combustible para cada tecnología. Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que se ha realizado la proyección utilizando el valor mínimo del combustible obtenido, esto se debe a que los operadores poseen convenios que les permiten acceder a menores precios. Por otro lado, se debe considerar que el precio de la electricidad considera un 10 % de costos de transmisión.

De esta forma, se tiene que los costos en UF totales de operación para buses eléctricos es:

$$Costo\,de\,operación = Distancia\,recorrida\,[km] \cdot Consumo\left[\frac{kWh}{km}\right] \cdot Precio\,Combustible\left[\frac{UF}{kWh}\right] \quad (5)$$

Para el caso de buses diésel y gas natural:

$$Costo\,de\,operación = Distancia\,recorrida\,[km] \cdot Consumo\left[\frac{lt}{km}\right] \cdot Precio\,Combustible\left[\frac{UF}{lt}\right] \quad (6)$$

8.4. Comparación de emisiones entre las distintas tecnologías seleccionadas (Diésel EURO III-V-VI, eléctricos y a gas natural)

En primer lugar, se compararán las emisiones por cada tipo de tecnología presente en los buses de tipo EURO VI, eléctricos y de gas natural. Se obtendrá la cantidad de toneladas de CO2 por kilómetro recorrido para así observar el impacto que tendría cada bus para el medio ambiente y el costo asociado a este.

8.4.1. Emisiones de buses tecnología EURO VI

Para realizar el cálculo de las emisiones de un bus diésel, se deben tener en cuenta los factores de emisión para tecnologías basadas en combustible diésel.

Para esto, a diferencia de los buses eléctricos, se deben calcular las emisiones directas de dióxido de carbono por kilómetro recorrido. Según la guía práctica para el cálculo de emisiones de CO2 (Oficina Catalana del Cambio Climático, 2011), el factor de emisión para los buses propulsados con diésel es el siguiente:

$$FE = 2,61 \left[\frac{kgCO_2}{lt}\right] \tag{7}$$

Así, para calcular las emisiones directas se tiene la siguiente expresión:

$$Emisiones\,de\,CO_2 \left[\frac{Ton}{km}\right] = Consumo \left[\frac{lt}{km}\right] \cdot FE \left[\frac{kgCO_2}{lt}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{Ton}{kg}\right] \tag{8}$$

Por lo tanto, si se considera un promedio del consumo de los buses EURO VI seleccionados correspondientes a los modelos Volvo BR y Mercedes Benz 500, se tiene:

$$Consumo = 0,56 \left[\frac{lt}{km}\right] \tag{9}$$

De esta forma, utilizando un factor de emisión de 2,61 kgCO2/litro y el valor de consumo presentado anteriormente, se obtiene:

$$Emisiones\, de\, CO_2 \left[\frac{Ton}{km}\right] = 0,56 \left[\frac{lt}{km}\right] \cdot 2,61 \left[\frac{kgCO_2}{lt}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{Ton}{kg}\right] \tag{10}$$

$$Emisiones\, de\, CO_2 = 0,001462 \left[\frac{Ton}{km}\right] \tag{11}$$

Es decir, un bus Diesel EURO VI emite 1,462 kg de dióxido de carbono por cada kilómetro recorrido.

Por otro lado, se tienen los siguientes contaminantes locales para los buses diésel EURO VI:

FE EURO VI	g/km	ton/km
MP	0,0023	2,3E-09
NOx	0,597	0,000000597

Tabla 6. Contaminantes locales producidos por un bus EURO VI por cada kilómetro recorrido. Fuente: Elaboración propia.

8.4.2. Emisiones de buses eléctricos

En cuanto a los buses eléctricos, al no emitir contaminantes de manera directa, se deben calcular las emisiones indirectas ya que la generación de energía no proviene sólo desde fuentes renovables, sino también de fuentes contaminantes, por lo tanto, generar 1 MWh de energía produce grandes cantidades de CO2.

Para obtener las emisiones de un bus eléctrico se deben considerar los factores de emisión del sector eléctrico establecidos por el Ministerio de Energía. Así, con los datos obtenidos, se ha construido un gráfico de la proyección al año 2050 de los factores de emisión.

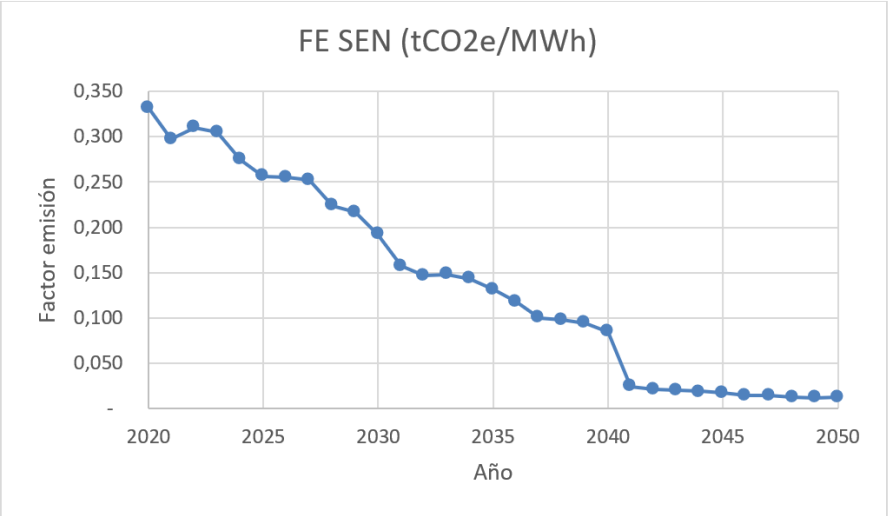

Figura 13. Proyección de los factores de emisión al año 2050 medido en toneladas de CO2 por cada mega Watt hora generado.

Por lo tanto, el cálculo para las emisiones indirectas es:

$$Emisiones\,de\,CO_2\left[\frac{Ton}{km}\right] = Energa\left[\frac{kWh}{km}\right]\cdot FE\left[\frac{TonCO_2}{MWh}\right]\cdot\frac{1}{1000}\left[\frac{MWh}{kWh}\right] \tag{12}$$

De esta forma, utilizando un factor de emisión del año 2020 de 0,332 TonCO2/MWh y un valor promedio de consumo energético de 1,525 kWh/km por bus, se obtiene:

$$Emisiones\,de\,CO_2\left[\frac{Ton}{km}\right] = 1,525\left[\frac{kWh}{km}\right]\cdot 0,332\left[\frac{TonCO_2}{MWh}\right]\cdot\frac{1}{1000}\left[\frac{MWh}{kWh}\right] \tag{13}$$

$$Emisiones\,de\,CO_2 = 0,000506\left[\frac{Ton}{km}\right] \tag{14}$$

Es decir, las emisiones por km recorrido por cada bus eléctrico tienden a cero, con un valor de 0,000506 toneladas de CO2 por km recorrido, equivalentes al año 2020, es decir, cerca de medio kilogramo de dióxido de carbono por tan solo 1 kilómetro recorrido.

8.4.3. Emisiones de buses propulsados con gas natural

Para el caso de los buses propulsados mediante gas natural, el cálculo debe tener en cuenta, al igual que en todos los casos, el factor de emisión de dióxido de carbono para esta tecnología. Así, también se deben calcular las emisiones directas de dióxido de carbono por kilómetro recorrido. Según la guía práctica para el cálculo de emisiones de CO2 (Oficina Catalana del Cambio Climático, 2011), el factor de emisión para los buses propulsados con gas natural es el siguiente:

$$FE = 2,71 \left[\frac{kgCO_2}{kg\,gas}\right] \tag{15}$$

Así, para calcular las emisiones directas se tiene la siguiente expresión:

$$Emisiones\,de\,CO_2 \left[\frac{Ton}{km}\right] = Consumo \left[\frac{lt\,gas}{km}\right] \cdot FE \left[\frac{kgCO_2}{lt\,gas}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{Ton}{kg}\right] \tag{16}$$

Dado que el consumo del bus de gas natural viene dado en unidades de lt/km hay que tener en cuenta que el factor de emisión debe convertirse a unidades de $\left[\frac{kg\,CO_2}{lt\,gas}\right]$

De esta forma, se tiene que la densidad en su estado comprimido es:

$$Densidad\,gas\,Natural = 650 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{m^3}{lt}\right] \tag{17}$$

$$Densidad\,gas\,Natural = 0,65 \left[\frac{kg}{lt}\right] \tag{18}$$

Con esto se procede a calcular en las nuevas unidades el factor de emisión.

$$FE = 0,65 \left[\frac{kg}{lt}\right] \cdot 2,71 \left[\frac{kgCO_2}{kg}\right] \tag{19}$$

$$FE = 1,7615 \left[\frac{kgCO_2}{lt}\right] \tag{20}$$

De esta forma, utilizando un factor de emisión de 1,7615 kgCO2/litro y un valor de consumo de 0,29 lt/km, se obtiene:

$$Emisiones\,de\,CO_2 \left[\frac{Ton}{km}\right] = 0,29 \left[\frac{lt}{km}\right] \cdot 1,7615 \left[\frac{kgCO_2}{lt}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{Ton}{kg}\right] \tag{21}$$

$$Emisiones\,de\,CO_2 = 0,000511 \left[\frac{Ton}{km}\right] \tag{22}$$

Es decir, un bus propulsado con gas natural emite de manera directa 0,511 kg de dióxido de carbono por cada kilómetro recorrido.

En cuanto a los contaminantes locales, se tiene la siguiente información:

FE Gas	g/km	ton/km
MP	0,00046	4,6E-10
NOx	0,0597	5,97E-08

Tabla 7. Contaminantes locales producidos por cada bus propulsado con gas natural. Fuente: Elaboración propia.

8.5. Proyección del parque de buses de la región metropolitana

Para realizar el flujo de costos del parque de buses, se debe tener en cuenta en primer lugar la proyección de la cantidad de buses presentes en la flota. Así, se podrá analizar y encontrar el valor óptimo de la proporción de estas tres tecnologías, el cual incidirá directamente en los costos finales que consideran inversión, costos de mantenimiento, costos de operación y costos sociales.

A continuación, se presenta la proyección de buses en la región metropolitana:

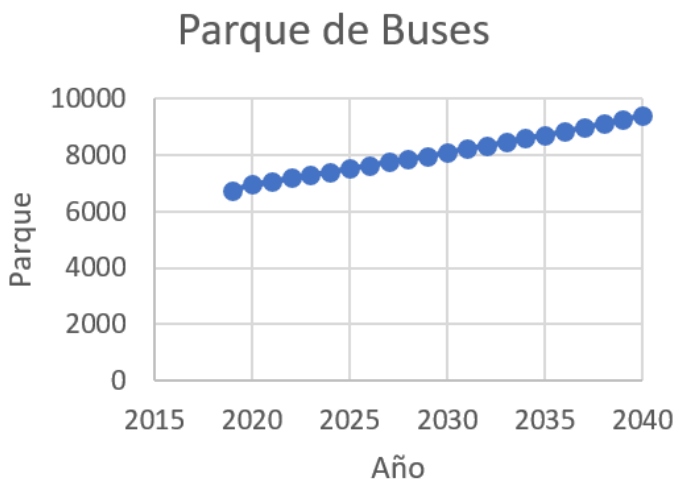

Figura 14. Proyección al año 2040 del parque de buses en a región metropolitana. Fuente: MTT.

Donde se tiene que inicialmente en el año 2019 existen en operación 6.754 buses y para el año 2040 se tendrán 9.387 buses.

8.6. Proceso de adquisición de buses

Según un estudio realizado por el Directorio de Transporte Publico Metropolitano, para garantizar un buen servicio, la vida útil de un bus del Transantiago es de 10 años.

De esta forma para realizar el proceso de adquisiciones de buses se considerará esta vida útil, es decir, los buses se darán de baja y se comprarán otros nuevos una vez hayan pasado 10 años desde su adquisición.

A continuación se presenta la radiografía de la flota hasta el año 2018, donde se puede observar la cantidad de buses diésel adquiridos por cada año.

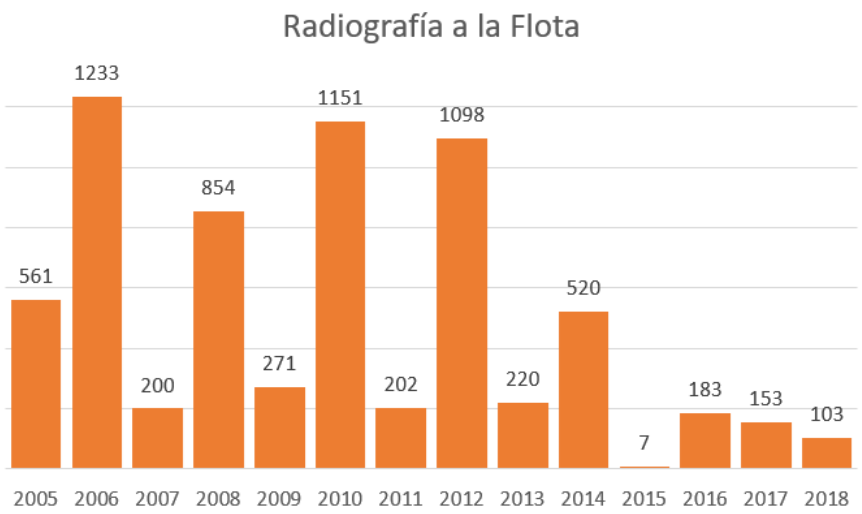

Figura 15. Adquisiciones de buses diésel hasta el año 2018. Fuente: DTPM.

De esta forma, por ejemplo, si en el año 2018 se adquirieron 103 buses, para el año 2028 se darán de baja 103 buses y se deben adquirir inmediatamente esta misma cantidad adicionando también los buses correspondientes para cumplir con la proyección de buses.

Con esto, se tiene la siguiente fórmula para determinar la cantidad de buses nuevos.

$$Buses\,Nuevos_t = Dados\,de\,Baja_{t-1} + (Total\,Buses_t - Total\,Buses_{t-1}) \tag{23}$$

Donde (t) corresponde al periodo actual y (t-1) al periodo inmediatamente anterior.

Utilizando esta fórmula se ha calculado la cantidad de buses nuevos y dados de baja hasta el año 2040. Así, se presenta la primera sección que se utilizará para el flujo de costos.

Año	Número de buses nuevos	Número de buses dados de baja
2020	283	3.050
2021	3.154	1.098
2022	1.204	220
2023	327	520
2024	629	7
2025	118	183
2026	295	153
2027	267	103
2028	219	1.362
2029	1.479	283
2030	402	3.154
2031	3.275	1.204
2032	1.327	327
2033	452	629
2034	755	118
2035	246	295
2036	425	267
2037	399	1.298
2038	1.432	400
2039	536	402
2040	540	-

Tabla 8. Primera sección del flujo de costos, donde se observa la cantidad de buses adquiridos y dados de baja. Fuente: elaboración propia.

Lo cual gráficamente resulta:

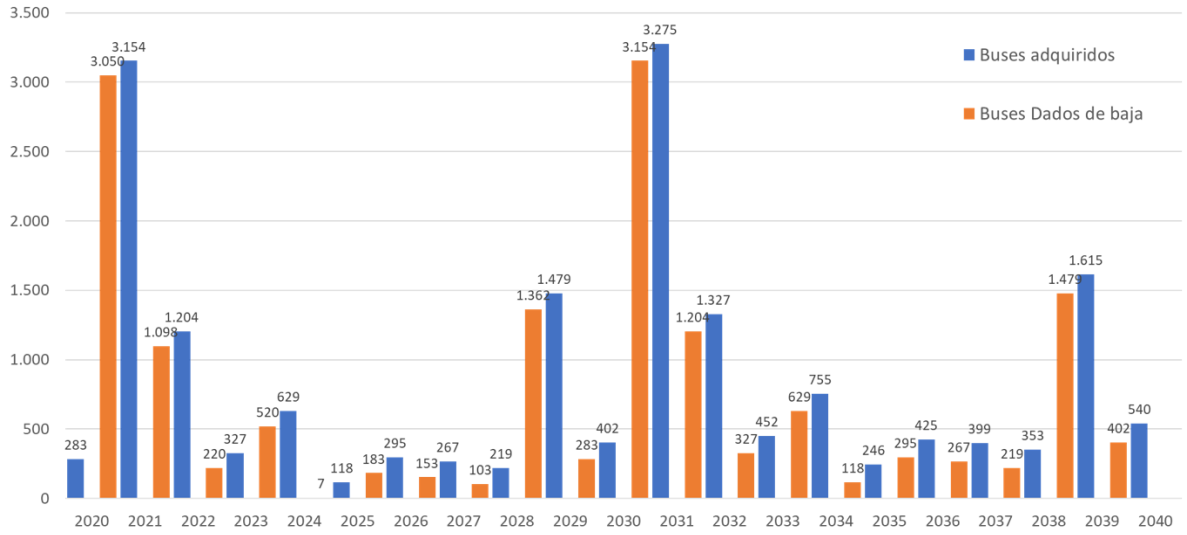

Figura 16. Proceso de adquisiciones. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los buses nuevos, estos también se analizarán variando la proporción de estas 3 tecnologías, por ejemplo, en el año 2025 se puede tener 118 buses adquiridos donde 100 son diésel, 10

eléctricos y 8 a gas natural, donde la selección de esta proporción será con el objetivo de minimizar los costos en la transición a electro movilidad.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que en los primeros años del flujo, dentro del total de buses se encuentran en operación máquinas con normativas anteriores a la EURO VI (EURO III, EURO V, la norma EURO IV se considerará despreciable) (Red Metopolitana de Movilidad, 2016) por lo que se debe tener en cuenta el año en el que se adquirieron por última vez estas tecnologías para cuantificar los cotos de operación, mantención y emisiones generadas hasta el término de su vida útil.

La tecnología EURO VI fue ingresada al sistema en el año 2016. Por lo que como supuesto, se establece que en el año 2015 fueron las últimas adquisiciones de buses con norma EURO V.

La norma EURO V fue incorporada en el año 2013 para vehículos diésel en Chile. Además, como el flujo de costos parte desde el año 2019, al considerar una vida útil de cada bus de 10 años, se tomarán adquisiciones de buses EURO III desde el año 2009 al 2012 para efectos de cálculo.

Resumiendo, se tienen las siguientes adquisiciones:

- EURO III: Adquiridos entre los años 2009 y 2012, se darán de baja en los años 2019, 2020, 2021 y 2022.
- EURO V: Adquiridos entre los años 2013 y 2015, los cuales se darán de baja en los años 2023, 2024 y 2025.
- EURO VI: Adquiridos desde los años 2016 en adelante. Donde se darán de baja luego de 10 años de ser adquiridos.

Basándose en la radiografía de la flota, y en la información obtenida por el MTT, se tiene que los buses EURO III adquiridos en los años 2005, 2007, 2008, 2009 y 2010 siguen en operación hasta el año 2021. De esta forma se ha construido una tabla, con sus debidos ajustes y asumiendo una licitación de recambio de buses en el año 2021, que muestra los años en operación de los buses EURO III, EURO V

Y EURO VI:

AÑOS EN OPERACIÓN	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
EURO III	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561										
		1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233												
			200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	11										
				854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854										
					271	271	271	271	271	271	271	271	271	271	271	271										
						1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151										
							202	202	202	202	202	202	202	202	202	202										
								1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098									
TOTAL EURO III	**561**	**1794**	**1994**	**2848**	**3119**	**4270**	**4472**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**4337**	**4148**	**1098**									
EURO V									220	220	220	220	220	220	220	220	220	220								
										520	520	520	520	520	520	520	520	520	520							
											7	7	7	7	7	7	7	7	7	7						
AJUSTE															589	589	589	589	589	589	589	589	589	589		
TOTAL EURO V									**220**	**740**	**747**	**747**	**747**	**747**	**1336**	**1336**	**1336**	**1336**	**1116**	**596**	**589**	**589**	**589**	**589**		
EURO VI												183	183	183	183	183	183	183	183	183	183					
													153	153	153	153	153	153	153	153	153	153				
														103	103	103	103	103	103	103	103	103	103			
EURO VI fijos															490	490	490	490	490	490	490	490	490	490		
TOTAL EURO VI FIJOS														**439**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**746**	**593**	**490**		
TOTAL														**6756**	**6602**	**6413**	**3363**	**2265**	**2045**	**1525**	**1518**	**1335**	**1182**			
ELÉCTRICOS FIJOS															283	283	283	283	283	283	283	283	283	283		
																283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	
TOTAL Eléctricos															**283**	**566**	**566**	**566**	**566**	**566**	**566**	**566**	**566**	**566**	**283**	

Tabla 9. Años de operación de buses con norma EURO III, EURO V Y EURO VI. Fuente: Elaboración propia.

Así, los valores marcados en verde son valores fijos iniciales de operación para el flujo de costos.

Esta información es de vital importancia para confeccionar la Tabla 8 presentada anteriormente en este mismo punto.

8.7. Precio Social del CO2 y contaminantes locales

La integración del cambio climático al sistema nacional de inversiones públicas de Chile permite atribuir un precio social a las emisiones de CO2. Este precio permite incorporar dentro de las evaluaciones los beneficios o costos sociales por disminuir o aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero, es decir, esto permite evaluar los cambios en las emisiones de CO2 derivados de la implementación de un proyecto.

La elaboración de este precio resulta relevante para la contribución de Chile en los esfuerzos mundiales para la reducción de los GEI causantes del calentamiento global. De esta forma, con los precios sociales, se construirá un flujo de caja para encontrar el punto óptimo en la combinación de las distintas tecnologías en el parque de buses en el transporte público.

De acuerdo de la información obtenida del documento elaborado por la Subsecretaria de Evaluación Social llamado "Precios Sociales 2020" (Precios Sociales, 2020), se tiene un análisis que determina un precio de CO2 de 32,5 [USD/tonCO2], que corresponde a 0,823 UF/ton CO2 para el año de calibración (30 de diciembre de 2016). A un valor de la Unidad de Fomento al 30-dic-2019 de 28.309,03 CLP/UF, se obtiene un valor de 23.298 Pesos por Tonelada de CO2.

Base	**($/TON CO2) dic 2019**	**(UF/TON CO2)**
Precio Social del CO2	$ 23.298	0,823 UF

Tabla 10. Precios sociales del CO2 medidos en pesos chilenos a diciembre de 2019 y en UF. Fuente: "Precios Sociales 2020", Subsecretaria de Evaluación Social.

En el caso de los contaminantes locales, se tiene que el precio social depende directamente de la cantidad de habitantes en la población y corresponden a:

Precios sociales contaminante local	
Dólares	**UF/ton*persona**
MP $0.9	0,024812
NOx $0.025	0,000689

Tabla 11. Precios sociales de los contaminantes locales en dólares y UF.

Se debe tener en cuenta la proyección de los habitantes de la región metropolitana urbana para calcular el impacto y los costos sociales totales de los contaminantes locales.

8.8. Cálculo para determinar el total de emisiones por tipo de tecnología

Una vez determinados los factores de emisión, los precios sociales y las características técnicas de cada bus, se procede a calcular las emisiones por tecnología para el parque de buses en Santiago hasta el año 2040. Se considerará un promedio anual de 90.000 km recorridos por cada bus (Directorio de Transporte Publico Metropolitano, 2019).

En primer lugar se tiene la proyección del factor de emisión de CO2 hasta el año 2050, cabe destacar que el factor va disminuyendo a lo largo de los años ya que en el pronóstico se considera la disminución de generación de electricidad a partir de fuentes contaminantes.

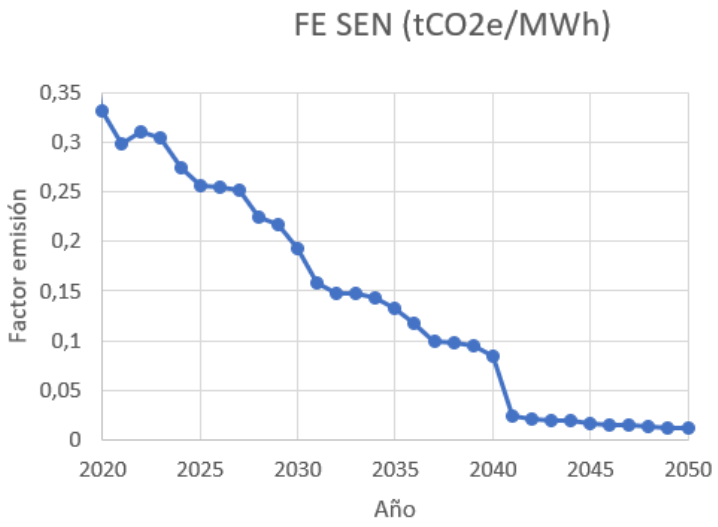

Figura 17. Proyección del factor de emisión del CO2 para el año 2050, medido en toneladas de CO2 por MegaWatt-hora generado.

Así para obtener las emisiones por tipo de tecnología se debe calcular:

$$Emisiones\, CO_2 = Distancia\, Recorrida\, [km] \cdot Consumo \left[\frac{lt}{km}\right] \cdot Factor\, emision \left[\frac{TonCO_2}{lt}\right] \quad (24)$$

De esta forma se obtendrán las toneladas de CO2 emitidas por cada bus y por cada kilómetro recorrido. De la misma manera, se calculan las emisiones por contaminante local por cada tecnología, cabe destacar que en el caso de los buses propulsados por electricidad, estos valores serán igual a cero, ya que localmente este bus no afecta a los santiaguinos debido a que la generación de electricidad no es producida mayormente en Santiago, lo cual se considerará nula. Caso opuesto ocurre con el CO2 ya que por definición es un contaminante global.

La forma de cálculo será:

$$Emisiones\,Contaminantes\,Locales = Distancia\,Recorrida\,[km]\,\cdot\,Factor\,emision\left[\frac{Ton}{km}\right] \tag{25}$$

Así, se obtendrán las emisiones de contaminantes locales y globales para el parque de buses de Santiago.

8.9. Cálculo para determinar los costos sociales totales de CO2 y contaminantes locales

Ya calculadas las emisiones por tipo de tecnología, se procede a determinar los costos sociales totales por cada tipo de bus.

En primer lugar, para determinar los costos sociales para el CO2 se tiene la siguiente expresión, donde el costo social de CO2 corresponde a 0,823 [UF/Ton CO2]:

$$Costo\,Social\,Total = Emisiones\,CO_2\,[Ton]\,\cdot\,Precio\,Social\,CO_2\left[\frac{UF}{Ton}\right] \tag{26}$$

Por otro lado, el cálculo para los contaminantes locales es distinto ya que se debe tener en cuenta la cantidad de población que se verá afectada por las emisiones de la flota.

Para esto, ya que esta investigación está centrada en la flota de buses presentes en el gran Santiago, se utilizarán las proyecciones de la población urbana metropolitana provenientes del estudio realizado por el instituto nacional de estadísticas, cabe destacar que estas proyecciones están elaboradas con el año 2017 como base (INE, 2020).

Con esto, se ha construido el siguiente gráfico:

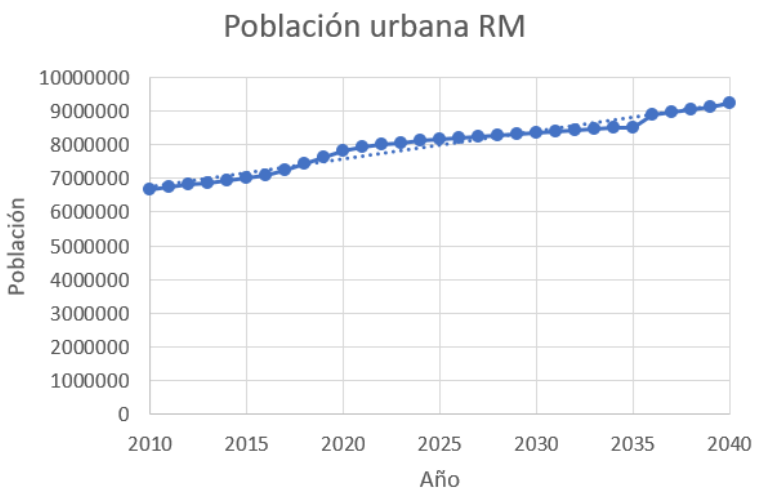

Figura 18. Proyección al año 2040 de la población de la región urbana de Santiago. Fuente: INE 2020.

Lo anterior permite realizar el cálculo para determinar el costo social total para el caso de los contaminantes locales (CL). De esta forma se tiene:

$$Costo\,Social\,CL\,Total = Emisiones\,CL\,[Ton]\ \cdot\ Precio\,Social\,CL\left[\frac{UF}{Ton \cdot Persona}\right] \cdot Persona \quad (27)$$

Una vez definido y calculado lo anterior, se procede a analizar los resultados para los distintos escenarios y proporciones entre los tipos de buses en operación.

8.10. Flujo de costos

Como se ha mencionado se evaluarán los costos de los distintos escenarios para la proporción entre los buses de las distintas tecnologías. Para esto se construirá un flujo de costos desde el año 2020 al año 2040.

Este flujo tendrá los siguientes parámetros de entrada:

1. Total buses Santiago: Corresponde a la cantidad de buses en el transporte público de la región Metropolitana por cada año.

2. Número de buses nuevos: Es la cantidad de buses a comprar en un año, la cantidad de cada tecnología dependerá de la proporción del escenario de análisis.

3. Número de buses dados de baja: Es la cantidad de buses que han cumplido con su vida útil definida en 10 años.

4. Total de buses de cada tecnología: Corresponde a tres parámetros de entrada equivalentes al total de buses diésel, eléctricos y gas natural resultante de su respectiva proporción.

5. Distancia recorrida: Es la cantidad de kilómetros recorridos por cada bus de cada tipo en un año. También se divide en tres entradas correspondientes a las tres tecnologías a analizar.

6. Consumos: Corresponde a los litros o kWh consumidos por kilómetro recorrido de cada bus.

7. Precios: Corresponde a tres entradas. Precio diésel, precio gas natural y precio electricidad. Estos valores corresponden a la proyección al año 2040 realizada anteriormente.

8. Población: Población de la provincia de Santiago, es decir, la zona urbana. Este dato es útil para determinar los costos sociales asociados a los contaminantes locales.

9. Factores de emisión: Son tres parámetros de entrada dependiendo de la tecnología del bus. Son las toneladas emitidas por cada litro o kWh consumido por el bus.

10. Emisiones: Corresponde a las emisiones medidas en toneladas de dióxido de carbono y en toneladas de contaminantes locales por cada tipo de bus.

Cabe destacar que considerando la vida útil de 10 años, las compras de todos los buses a partir del año 2030 serán de tipo eléctrico debido a que el gobierno apunta a lograr para el año 2040 que el 100 % del transporte público sea impulsado mediante electricidad (Revistaei, 2019). Por eso, esta es una de las restricciones del problema, lo que conlleva a analizar las proporciones de compra de buses hasta el año 2030.

Como parámetros de salida, se tendrán todos los costos resultantes en unidades monetarias (UF):

1. Inversión: Se refiere al costo de cada bus adquirido en la sección 'Número de buses nuevos'.

2. Costo de operación: Corresponde al costo que resulta de operar el bus por cada kilómetro recorrido. Relaciona el concepto de kilómetro recorrido, consumo y precio del combustible.

3. Costos de mantenimiento: Es el valor en UF de los costos de mantención de cada tipo de bus por cada kilómetro recorrido.

4. Costos sociales CO2: Corresponde al valor de los costos sociales relacionados con las emisiones de dióxido de carbono de las tres tecnologías.

5. Costos sociales contaminantes locales : Es el valor monetario de los costos sociales asociados a las emisiones de contaminantes locales (material particulado y NOx).

8.11. Resultados

Para analizar la viabilidad de la incorporación de buses propulsados con gas natural como transición a la electro movilidad, se han establecido diversos escenarios de adquisición e inversión de acuerdo a la metodología relacionada con los años de vida útil de cada bus. Cabe destacar que se asumirá que la licitación de recambio de buses se realizará en el año 2021. De esta forma se han establecido los siguientes escenarios.

1. Sólo adquisiciones de buses diésel.
2. Sólo adquisiciones de buses de gas natural.
3. Sólo adquisiciones de buses eléctricos.
4. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos en la misma proporción (50 % para ambos casos).
5. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos, donde e adquieren buses de gas natural gasta el año 2025 y el resto sólo eléctricos.

8.11.1. Sólo Adquisiciones de buses diésel

Este escenario contempla hasta el año 2030 las adquisiciones de buses diésel EURO VI por cada bus dado de baja en el año inmediatamente anterior más una cantidad de buses nuevos para cumplir con las proyecciones en el parque de buses. De esta forma, se obtiene que para el año 2030 la totalidad del parque de buses será tecnología diésel EURO VI. A partir de este año, y para cumplir un 100 % de electro movilidad para el año 2040, sólo se harán adquisiciones de buses eléctricos.

La proporción de buses a lo largo del tiempo considerando sólo adquisiciones diésel se presenta a continuación:

Año	Total Buses	% diésel	% eléctricos	% CNG
2020	6979	92 %	8 %	0 %
2021	7083	92 %	8 %	0 %
2022	7189	92 %	8 %	0 %
2023	7296	92 %	8 %	0 %
2024	7405	92 %	8 %	0 %
2025	7516	92 %	8 %	0 %
2026	7628	93 %	7 %	0 %
2027	7742	93 %	7 %	0 %
2028	7858	94 %	6 %	0 %
2029	7975	96 %	4 %	0 %
2030	8094	100 %	0 %	0 %
2031	8215	60 %	40 %	0 %
2032	8338	45 %	55 %	0 %
2033	8463	40 %	60 %	0 %
2034	8589	32 %	68 %	0 %
2035	8717	31 %	69 %	0 %
2036	8847	27 %	73 %	0 %
2037	8979	23 %	77 %	0 %
2038	9113	9 %	91 %	0 %
2039	9249	4 %	96 %	0 %
2040	9387	0 %	100 %	0 %

Tabla 12. proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones diésel. Fuente: Elaboración propia.

Lo cual, gráficamente resulta:

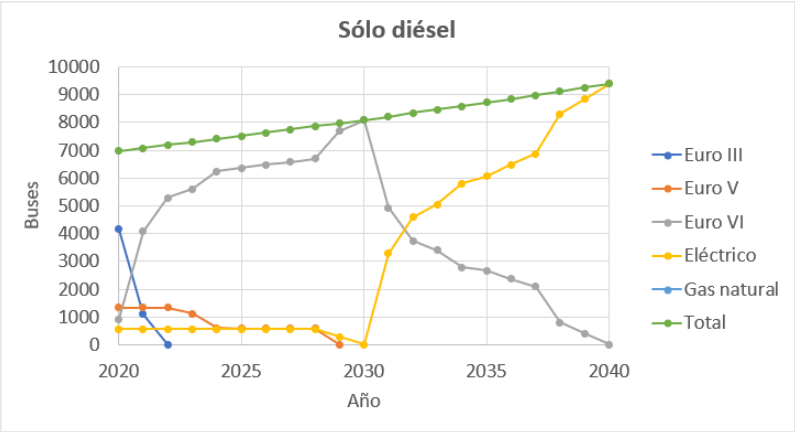

Figura 19. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia.

Así, la proporción de buses diésel aumenta desde un 92 % en el año 2020 hasta un 100 % para el año 2030 donde a partir de este periodo comenzará a disminuir rápidamente hasta que la totalidad del parque de buses sea totalmente eléctrico, lo cual ocurriría en el año 2040 con un total de 9.387 buses.

Por otro lado, en el año 2031 se observa un fuerte aumento de buses eléctricos, lo cual supone una

gran inversión para ese año, con un valor de 27.086.634 UF.

En cuanto a las emisiones de CO2, con este escenario se tiene que en el periodo 2020-2040 se habrán generado casi 15 millones de toneladas de dióxido de carbono (14.799.994,4 toneladas). Donde en el año 2030 se tendrá el punto máximo de emisiones de CO2 con un valor de 1.064.717,1 toneladas.

Para los contaminantes locales, se tiene que en este mismo periodo, se habrán generado 150 toneladas de material particulado y 11.363 toneladas de NOX.

BUS	**Toneladas CO2**	**Toneladas Mp**	**Toneladas NOX**
EURO III	825.631,2	97,7	4.428,7
EURO V	1.271.025,1	33,6	2.245,9
EURO VI	11.479.055,6	18,3	4.688,7
Eléctrico	1.224.282,5	0,0	0,0
Gas natural	0,0	0,0	0,0
Total	**14.799.994,4**	**149,6**	**11.363,3**

Tabla 13. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

Así, considerando todos los parámetros de salida del flujo de costos, y considerando una tasa de descuento de 6 % establecido para proyectos sociales, se obtiene un VAN de -247.610.498,94 UF.

Escenario	VAN
Sólo diésel	-247.610.498,94 UF

Tabla 14. Valor actual neto escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia.

8.11.2. Sólo adquisiciones de buses de gas natural

Este escenario contempla, de manera similar al escenario anterior, adquisiciones de buses de gas natural hasta el año 2030 por cada bus dado de bajo el año inmediatamente anterior más la cantidad de buses necesaria para cumplir con las proyecciones. Así, a diferencia del escenario anterior, se tendrá un 100 % de buses de gas natural en circulación, donde a partir de este año sólo se harán adquisiciones de buses eléctricos. De esta forma, estos buses se darán de baja año a año hasta alcanzar un 100 % de electro movilidad.

La proporción de buses a lo largo del tiempo considerando sólo adquisiciones diésel se presenta a continuación:

Año	Total Buses	% Diesel	% eléctricos	% CNG
2020	6979	92 %	8 %	0 %
2021	7083	47 %	8 %	45 %
2022	7189	32 %	8 %	61 %
2023	7296	28 %	8 %	64 %
2024	7405	21 %	8 %	72 %
2025	7516	20 %	8 %	72 %
2026	7628	18 %	7 %	75 %
2027	7742	15 %	7 %	77 %
2028	7858	12 %	6 %	82 %
2029	7975	0 %	4 %	96 %
2030	8094	0 %	0 %	100 %
2031	8215	0 %	40 %	60 %
2032	8338	0 %	55 %	45 %
2033	8463	0 %	60 %	40 %
2034	8589	0 %	68 %	32 %
2035	8717	0 %	69 %	31 %
2036	8847	0 %	73 %	27 %
2037	8979	0 %	77 %	23 %
2038	9113	0 %	91 %	9 %
2039	9249	0 %	96 %	4 %
2040	9387	0 %	100 %	0 %

Tabla 15. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones gas natural. Fuente:Elaboración propia.

Gráficamente:

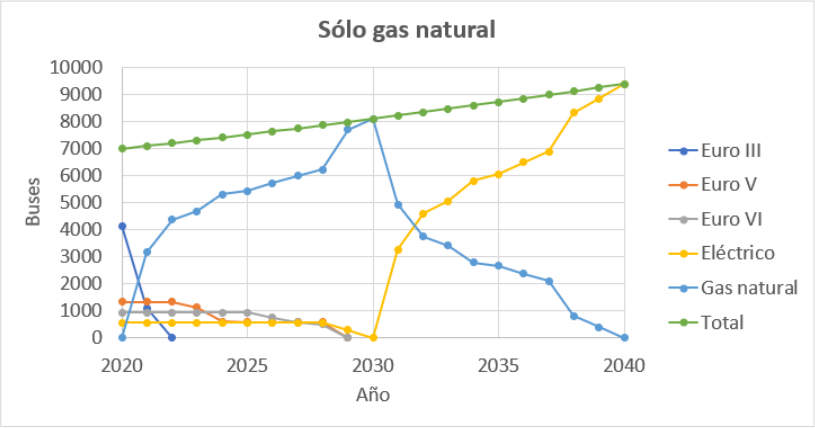

Figura 20. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo gas natural. Fuente: Elaboración propia.

Se observa una gran disminución de buses diésel entre los años 2020 y 2021 pasando de un 92 % a un 47 % asumiendo la licitación de recambio tecnológico de buses en el año 2021, con esto, la inversión constaría de 3.154 buses de gas natural por un monto de 23.912.053 UF.

Por otro lado, al igual que en el caso anterior, se observa un gran aumento de buses eléctricos en el año 2031, pasando de 0 % a 40 % con 3.275 buses adquiridos, donde la inversión correspondería a 27.086.634 UF.

BUS	**Toneladas CO2**	**Toneladas Mp**	**Toneladas NOX**
EURO III	825.631,2	97,7	4.428,7
EURO V	1.271.025,1	33,6	2.245,9
EURO VI	973.820,2	1,5	397,8
Eléctrico	1.224.282,5	0,0	0,0
Gas natural	3.671.621,5	3,3	429,1
Total	**7.966.380,5**	**136,2**	**7.501,5**

Tabla 16. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, considerando todos lo parámetros del flujo de costos, se obtiene un VAN de -228.146.717 UF. Resultado que es considerablemente mayor al primer escenario, por lo que como conclusión rápida, este escenario es conveniente para ambas aristas (económico-ambiental).

Cabe destacar, a lo largo de los años, que los costos de mantención de cada tecnología son menores que los costos de operación a excepción de los buses de gas natural. Esto provoca un gran costo asociado al mantenimiento y que impacta en gran manera al resultado final, sin embargo, debido a las emisiones y costos sociales, termina siendo más conveniente que el escenario anterior.

Escenario	VAN
Sólo gas	-228.146.717 UF

Tabla 17. Valor actual neto escenario sólo gas. Fuente: Elaboración propia.

8.11.3. Sólo adquisiciones de buses eléctricos

Este escenario contempla, de manera similar al escenario anterior, adquisiciones de buses eléctricos hasta el año 2040. Así, se alcanzará el 100 % de buses eléctricos en el año 2030, lo cual significaría adelantar la electro movilidad en 10 años. La proporción de tecnologías en el parque de buses considerando sólo adquisiciones de buses eléctricos se muestra a continuación:

Año	Total Buses	% Diesel	% eléctricos	% CNG
2020	6979	92 %	8 %	0 %
2021	7083	47 %	53 %	0 %
2022	7189	32 %	68 %	0 %
2023	7296	28 %	72 %	0 %
2024	7405	21 %	79 %	0 %
2025	7516	20 %	80 %	0 %
2026	7628	18 %	82 %	0 %
2027	7742	15 %	85 %	0 %
2028	7858	12 %	88 %	0 %
2029	7975	0 %	100 %	0 %
2030	8094	0 %	100 %	0 %
2031	8215	0 %	100 %	0 %
2032	8338	0 %	100 %	0 %
2033	8463	0 %	100 %	0 %
2034	8589	0 %	100 %	0 %
2035	8717	0 %	100 %	0 %
2036	8847	0 %	100 %	0 %
2037	8979	0 %	100 %	0 %
2038	9113	0 %	100 %	0 %
2039	9249	0 %	100 %	0 %
2040	9387	0 %	100 %	0 %

Tabla 18. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones de buses eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente:

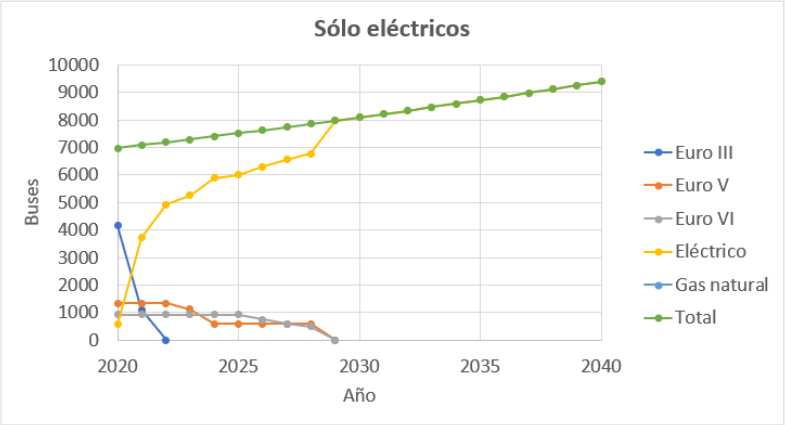

Figura 21. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario sólo eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior se observa un fuerte aumento de buses eléctricos en el año 2021 como adquisiciones resultantes de la licitación que se asume se hará en el año 2021. Además, existe una disminución de los buses diésel para ese mismo año los cuales se dieron de baja para adquirir la nueva tecnología.

Esta adquisición consta de 3.154 buses eléctricos con sus respectivos cargadores alcanzando una suma de 26.085.876 UF.

Además, se aprecia que la cantidad de buses diésel decrece rápidamente hasta su término de circulación en el año 2029, caso contrario ocurre con los buses eléctrico que aumentan su proporción considerablemente en solo 9 años.

En cuanto a las emisiones de CO2, en el periodo comprendido entre el año 2020 y el año 2040, se habrán generado casi 7 millones de toneladas de dióxido de carbono (6.667.129,2 toneladas) donde el punto máximo de emisiones se alcanza en el año 2020 que es justamente el año donde la proporción de buses diésel supera el 90 %.

para los contaminantes locales, en este escenario se habrán generado 132,8 toneladas de material particulado y 7.072,4 toneladas de óxidos de nitrógeno.

BUS	**Toneladas CO2**	**Toneladas Mp**	**Toneladas NOX**
EURO III	825.631,2	97,7	4.428,7
EURO V	1.271.025,1	33,6	2.245,9
EURO VI	973.820,2	1,5	397,7
Eléctrico	3.596.652,6	0,0	0,0
Gas natural	0,0	0,0	0,0
Total	**6.667.129,2**	**132,8**	**7.072,4**

Tabla 19. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que los costos de operación para los buses eléctricos terminan siendo menor a los costos de mantención, caso similar ocurre con los buses propulsados por gas natural, lo cual impacta considerablemente al flujo final, sin embargo, los impactos ambientales son enormemente bajos debido a que el factor de emisión de dióxido de carbono para el caso de buses eléctricos disminuye año a año tendiendo a cero. Igual caso ocurre para los contaminantes locales que son nulos durante todo el periodo.

Dicho esto, se obtiene un VAN de -205.496.295,28 UF. Valor que hasta ahora es el mayor para todos los escenarios considerados hasta este punto.

Escenario	VAN
Sólo eléctricos	-205.496.295,28 UF

Tabla 20. Valor actual neto escenario sólo eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

8.11.4. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos en la misma proporción (50 % para ambos casos)

Este escenario contempla la compra de buses de gas natural y eléctricos en la misma proporción, es decir, se harán adquisiciones del 50 % para cada tecnología por cada bus dado de baja más los buses necesarios para cumplir con la proyección de buses presentada en los puntos anteriores. La proporción de buses considerando este escenario se muestra a continuación:

Año	Total Buses	% Diesel	% eléctricos	% CNG
2020	6979	92 %	8 %	0 %
2021	7083	47 %	30 %	22 %
2022	7189	32 %	38 %	30 %
2023	7296	28 %	40 %	32 %
2024	7405	21 %	44 %	36 %
2025	7516	20 %	44 %	36 %
2026	7628	18 %	45 %	38 %
2027	7742	15 %	46 %	39 %
2028	7858	12 %	47 %	41 %
2029	7975	0 %	52 %	48 %
2030	8094	0 %	50 %	50 %
2031	8215	0 %	70 %	30 %
2032	8338	0 %	78 %	22 %
2033	8463	0 %	80 %	20 %
2034	8589	0 %	84 %	16 %
2035	8717	0 %	85 %	15 %
2036	8847	0 %	87 %	13 %
2037	8979	0 %	88 %	12 %
2038	9113	0 %	96 %	4 %
2039	9249	0 %	98 %	2 %
2040	9387	0 %	100 %	0 %

Tabla 21. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones mix gas-eléctricos. Fuente:Elaboración propia.

Gráficamente:

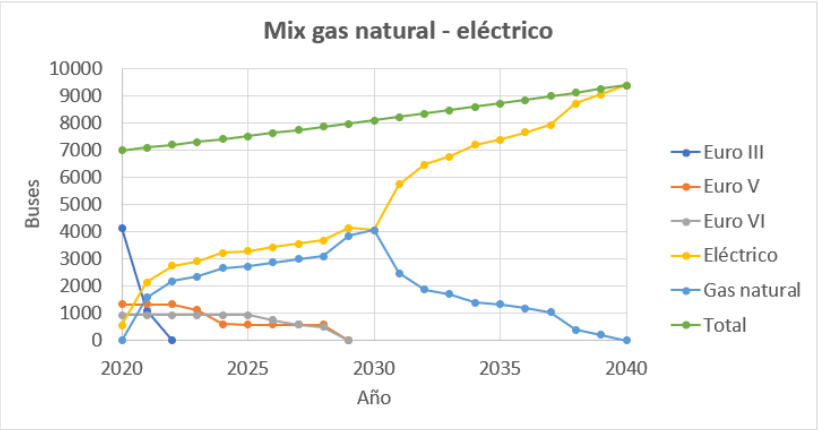

Figura 22. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario mix en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia se observa que a pesar que se adquieren buses de gas y eléctricos en la misma proporción, se tiene una mayor proporción inicial de buses eléctricos debido a los valores fijos establecidos anteriormente.

Por otro lado, con este escenario se lograría la electro movilidad para el año 2040 donde ya se habrán dado de baja todos los buses de gas natural en el año 2039. Además, los buses diésel dejarían de operar en el año 2029.

La mayor inversión a lo largo de los años se produce en el año 2031, adquiriendo 3.275 buses por un monto de 27.086.634 UF que sólo corresponderían a buses eléctricos.

Analizando las emisiones del parque de buses, se tiene que en el periodo 2020-2040 se habrán generado poco más de 7 millones de toneladas de dióxido de carbono (7.316.754,8 toneladas). Donde en el año 2020 se tendrá el punto máximo de emisiones de CO2 con un valor de 1.010.982,9 toneladas.

Para los contaminantes locales, en este escenario se habrán generado 134,5 toneladas de material particulado y 7.286,9 toneladas de óxidos de nitrógeno.

BUS	**Toneladas CO2**	**Toneladas Mp**	**Toneladas NOX**
EURO III	825.631,2	97,7	4.428,7
EURO V	1.271.025,1	33,6	2.245,9
EURO VI	973.820,2	1,5	397,7
Eléctrico	2.410.467,5	0	0
Gas natural	1.835.810,7	1,7	214,5
Total	**7.316.754,8**	**134,5**	**7.286,9**

Tabla 22. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

Con este mix, a lo largo de los años se obtienen costos de inversión y operación más altos para los buses eléctricos a excepción de los costos de mantenimiento que son mayores para los buses de gas natural.

Así, el VAN es de -216.821.506,14 UF. Por lo tanto, se obtiene un VAN menor que en el caso anterior. Sin embargo, en términos ambientales, es uno de escenarios más convenientes junto con el escenario "sólo eléctricos".

Escenario	VAN
Mix eléctrico-gas igual proporción	-216.821.506,14 UF

Tabla 23. Valor actual neto escenario mix eléctrico y gas en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia.

Para el último escenario que se verá a continuación, se buscará encontrar un mínimo reduciendo los costos de operación e inversión de los buses eléctricos que permita reducir los costos totales del flujo realizando adquisiciones de buses de gas natural en los primeros 5 años para posteriormente sólo adquirir buses de eléctricos.

8.11.5. Mix entre adquisiciones de gas natural y eléctricos (gas hasta 2025, eléctrico el resto del periodo)

Para este escenario, como se ha mencionado en el punto anterior, se buscará un valor mínimo haciendo una reducción en los costos de operación e inversión en los buses eléctricos adquiriendo sólo buses de gas natural en los primeros cinco años debido a que el costo de inversión o adquisición es menor en los buses de gas natural. Además, se debe considerar que el precio de la electricidad y el factor de emisión tendrán su valor más alto.

Así, en los primeros cinco años se tiene adquisiciones de buses de gas natural por cada bus dado de bajo en el año inmediatamente anterior más la cantidad de buses para cumplir con las proyecciones. Posteriormente, sólo se harán adquisiciones de buses eléctricos hasta el final del periodo. Cabe destacar que con este escenario se adelanta la electro movilidad en cinco años.

Por otro lado, los buses de gas natural estarán en operación hasta el año 2035, año en que se darán de baja los últimos buses propulsados por este combustible.

La proporción de buses para este escenario se muestra a continuación:

Año	Total Buses	% Diesel	% eléctricos	% CNG
2020	6979	92 %	8 %	0 %
2021	7083	47 %	8 %	45 %
2022	7189	32 %	8 %	61 %
2023	7296	28 %	8 %	64 %
2024	7405	21 %	8 %	72 %
2025	7516	20 %	8 %	72 %
2026	7628	18 %	11 %	71 %
2027	7742	15 %	15 %	70 %
2028	7858	12 %	27 %	61 %
2029	7975	0 %	32 %	68 %
2030	8094	0 %	33 %	67 %
2031	8215	0 %	72 %	28 %
2032	8338	0 %	87 %	13 %
2033	8463	0 %	91 %	9 %
2034	8589	0 %	99 %	1 %
2035	8717	0 %	100 %	0 %
2036	8847	0 %	100 %	0 %
2037	8979	0 %	100 %	0 %
2038	9113	0 %	100 %	0 %
2039	9249	0 %	100 %	0 %
2040	9387	0 %	100 %	0 %

Tabla 24. Proporción de buses diésel, eléctricos y gas para el escenario de adquisiciones mix gas hasta 2025-eléctricos. Fuente:Elaboración propia.

Gráficamente:

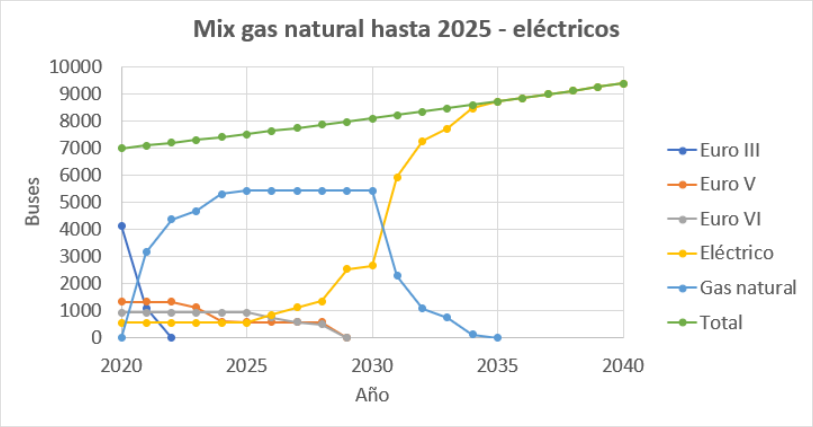

Figura 23. Cantidad de buses diferenciados por norma y tecnología a lo largo de los años para el escenario mix gas natural - 2025 eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para el año 2021, prácticamente se hace un recambio completo de casi la mitad de los buses diésel del año 2020, esto supone una adquisición de 3.154 buses de gas natural por un monto de 23.912.053 UF que es el año donde más se invierte en adquisiciones junto al año 2031 que se asume que también se realizara una nueva licitación de recambio tecnológico invirtiendo en 3.275

buses eléctricos por un monto de 27.086.634 UF y que representaría el 80 % de los costos de ese año.

Por otro lado, como se ha mencionado, se alcanzaría un 100 % del parque eléctrico de buses en el año 2035, lo cual adelanta la electro movilidad establecida para el 2040 en cinco años.

Analizando las emisiones del parque de buses, se tiene que en el periodo 2020-2040 se habrán generado poco más de 7 millones de toneladas de dióxido de carbono (7.330.642,7 toneladas). Donde en el año 2020 se tendrá el punto máximo de emisiones de CO2 con un valor de 1.010.982,9 toneladas. Para los contaminantes locales, en este escenario se habrán generado 135,1 toneladas de material particulado y 7.364,2 toneladas de óxidos de nitrógeno. Valores levemente mayores a los expuestos en el escenario anterior.

BUS	**Toneladas CO2**	**Toneladas Mp**	**Toneladas NOX**
EURO III	825.631,2	97,7	4.428,7
EURO V	1.271.025,1	33,6	2.245,9
EURO VI	973.820,2	1,5	397,8
Eléctrico	1.762.796,0	0,0	0,0
Gas natural	2.497.370,1	2,2	291,9
Total	**7.330.642,7**	**135,1**	**7.364,2**

Tabla 25. Toneladas generadas por cada tecnología en el periodo 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

Así, el VAN es de -222.129.238,18 UF. Por lo tanto, se obtiene un VAN menor que en los casos 'sólo eléctricos' y 'mix gas-eléctrico (50 %-50 %)'.

Escenario	VAN
Mix eléctrico-gas (gas hasta 2025, eléctrico hasta 2040)	-222.129.238,18 UF

Tabla 26. Valor actual neto escenario mix eléctrico y gas (gas hasta 2025, eléctrico hasta 2040). Fuente: Elaboración propia.

8.11.6. Resumen

A continuación, se presentará una tabla resumen que contendrá las emisiones y el valor actual neto de cada escenario de manera de facilitar su comparación.

Escenarios	VAN UF	VAN Dólares	Emisiones CO2 ton	Emisiones MP ton	Emisiones Nox ton
Solo diésel	-247.610.498	-8.981.452.308	14.799.994,4	149,4	11.363,3
Solo gas	-228.146.717	-8.275.452.239	7.966.380,5	136,2	7.501,5
Solo eléctrico	-205.496.295	-7.453.864.773	6.667.129,2	132,8	7.072,4
Mix eléctrico y gas	-216.821.506	-7.864.658.506	7.316.754,8	134,5	7.286,9
Mix gas hasta 2025- eléctricos	-222.129.238	-8.057.183.227	7.330.642,7	135,1	7.364,2

Tabla 27. Tabla resumen de los distintos escenarios expuestos anteriormente. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, como es de esperar, el escenario 'sólo diésel' es el menos beneficioso en términos económicos y ambientales. Se observa que las emisiones de dióxido de carbono es casi o más del doble que en los otros escenarios, lo cual conlleva a costos sociales de dióxido de carbono considerablemente altos. Por otro lado, los contaminantes locales como material particulado y óxidos de nitrógeno también son los más altos, generando altos costos sociales.

Para el escenario 'sólo gas', los costos totales disminuyen en casi 20 millones de UF debido prácticamente sólo a la disminución de emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Por otro lado, cuando entran en juego las adquisiciones de buses eléctricos, la situación es aún más favorable, además de adelantar la electro movilidad en 10 años, se obtienen los costos más bajos entre todos los escenarios, lo mismo ocurre para las emisiones de dióxido de carbono debido al factor de emisión decreciente a lo largo del tiempo, gracias a esto los costos sociales son significativamente menores que en los demás escenarios.

Por el lado de los contaminantes locales, los buses eléctricos no generan este tipo de contaminantes en la región metropolitana, por lo que los valores que se obtienen son netamente producidos por los buses en operación de normativas antiguas que se han fijado para cumplir con la proporción de buses obtenida por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones para el año 2020.

En el caso del mix de buses eléctricos y de gas, se buscó obtener un valor mínimo en emisiones y costos. Estos costos se reducen en comparación al escenario 'sólo gas' y 'sólo diésel', sin embargo estos valores siguen siendo mayores al caso de adquisición 'sólo eléctricos'.

En el último escenario, se trató de minimizar los costos de operación e inversión de los buses eléctricos adquiriendo sólo buses de gas natural en los cinco años iniciales y teniendo en cuenta que el valor de la electricidad es más alto en los primeros años.

Se obtienen costos totales y valores de emisión muy similar entre ambos escenarios, sin embargo el mix de buses de gas natural y eléctricos en la misma proporción posee valores levemente más bajos para las emisiones y un mejor valor actual neto. Esto se produce debido a que el escenario que contempla sólo la adquisición de buses de gas natural hasta el año 2025, el costo de mantenimiento en los primeros años se eleva, al igual que los costos sociales por emisiones.

Esto conduce a que la mejor opción, si es que se quiere utilizar el gas natural como transición, es el mix en la misma proporción, sin embargo, económica y ambientalmente hablando, el escenario 'sólo eléctricos' es significativamente el más conveniente entre todos los casos presentados.

8.11.7. Análisis de sensibilidad

A continuación, se realizarán tres análisis de sensibilidad, en el primer caso se modificará el valor del precio de la electricidad a lo largo del tiempo para observar el comportamiento del valor actual neto y verificar si existe algún precio que beneficie el uso de buses de gas natural.

En el otro caso, se modificará el costo de las mantenciones del bus de gas natural debido a su alto valor, el objetivo, es verificar para que valor de mantención resulta más conveniente utilizar estos buses.

En el último caso, se analizará la variación de los precios del gas para observar el impacto sobre los costos totales y así encontrar un posible precio de manera que sea beneficioso utilizar un escenario que contemple adquisiciones de buses de gas natural.

Para el primer análisis, se ha variado el precio disminuyéndolo hasta un 40 % y aumentándolo en un 100 %. Los valores obtenidos se presentan en el siguiente gráfico:

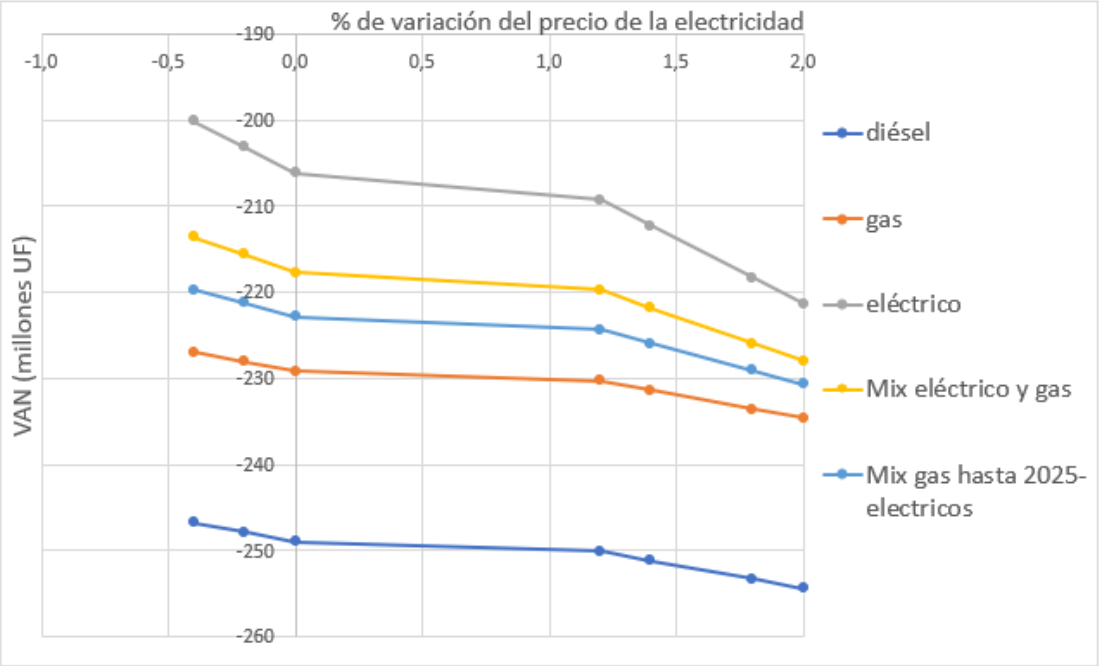

Figura 24. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, a pesar de las variaciones negativas o positivas para el precio de la

electricidad, el escenario sólo eléctricos representado por la linea gris, sigue siendo el más conveniente a pesar de aumentar al doble el precio. Como es de esperar, el VAN disminuye drásticamente a medida que aumenta el valor de la electricidad.

Cabe destacar que todos los escenarios se ven afectados por esta variación a pesar de ser escenarios que no contemplan adquisiciones de buses eléctricos, esto se produce debido a la cantidad inicial de buses eléctricos que operarían por 10 años, es decir, desde 2020 a 2030 que corresponden a 283 buses.

Para el segundo análisis, se ha variado el valor de los costos de mantención de los buses de gas natural disminuyéndolo hasta un valor extremo de 80 % y aumentándolo hasta un 50 %. Los resultados se presentan en el siguiente gráfico:

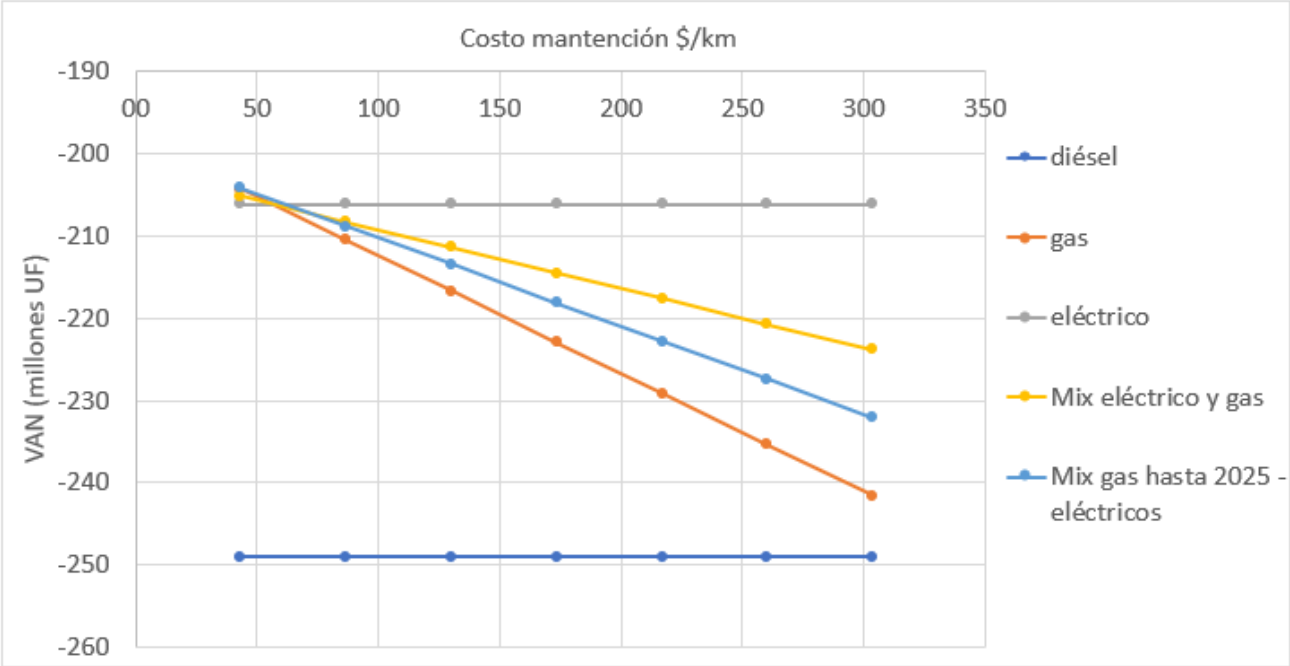

Figura 25. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse en la figura presentada que las rectas correspondientes a diésel y eléctrico poseen pendiente cero ya que una variación en el costo de mantención de los buses de gas natural no afectan a este escenario debido a la inexistencia de estos en el parque de buses. Además, la situación 'sólo diésel' resulta ser una solución infactible a nivel económico y ambiental.

Por el contrario, el resto de las rectas, como es de esperar, poseen una tendencia negativa a medida que aumentan los costos de mantención. Por otro lado, con una reducción extrema de un 80 % en los costos de mantención (43,4 $/km) se logra obtener un escenario positivo donde resulta ser más conveniente utilizar el escenario de mix de buses de gas natural hasta el año 2025 alcanzando un VAN de -204.244.928 UF, donde el costo de mantención máximo que soportaría este escenario es de un 74 % más bajo del valor original (56,42 $/km), lo cual es bajísimo y poco probable. Lo mismo ocurre para los escenarios 'sólo gas' y 'mix buses eléctricos y de gas natural en la misma proporción'.

Para el último caso, se ha variado el precio de la electricidad disminuyéndolo hasta un valor extremo de un 90 % y aumentándolo hasta un 60 % sobre su valor original, los resultados obtenidos se presentan en el siguiente gráfico:

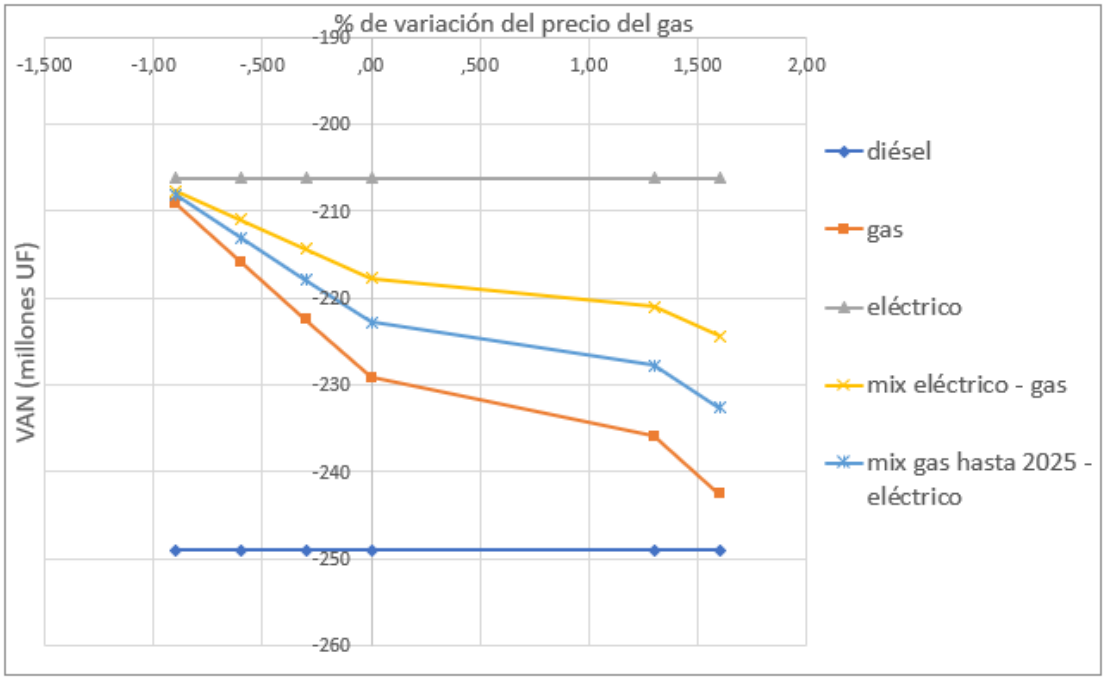

Figura 26. Variación del valor actual neto en función de la variación porcentual del precio del gas natural. Fuente: Elaboración propia.

Tal como en el caso anterior, los escenarios diésel y eléctricos permanecen invariables ante una modificación en el precio del gas natural debido a la inexistencia de estos buses en circulación.

Por otro lado, se observa que no existen curvas por arriba de la recta marcada con color gris que

corresponde al escenario eléctrico. Esto sugiere que incluso ante una reducción extrema de un 90 % de los precios del gas natural, no se puede superar el escenario eléctrico. De hecho, si bien los costos se reducen a -207.627.033 UF para el caso del mix gas hasta 2025 - eléctricos, no alcanza a disminuir mas allá de los -205.496.295 UF del caso 'sólo eléctricos'.

Por lo tanto, el escenario 'sólo eléctrico' siempre termina siendo el más conveniente ya que una reducción en un 80 % en los costos de mantención y una disminución del 90 % del combustible es poco probable. Además a nivel ambiental, este escenario siempre es el mejor a pesar de una gran reducción en los costos de operación o mantención que se pueda alcanzar en los buses de gas natural.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Para finalizar esta investigación, dentro de todos los análisis realizados y distintos escenarios observados, se ha llegado a la conclusión de que el escenario que contempla sólo adquisiciones de buses eléctricos siempre será el más conveniente a nivel económico y ambiental, alcanzando un costo total de -205.496.295 UF y casi 7 millones de toneladas de dióxido de carbono en un periodo de 20 años.

Además, este escenario permite adelantar en 10 años la electro movilidad convirtiendo a Chile en pionero en el uso de esta tecnología en el transporte público latinoamericano y así, en un referente internacional.

Por otro lado, se ha llegado a la conclusión que la conveniencia de utilizar un escenario que contemple buses de gas natural implica que deben reducirse los costos de mantención de estos buses en un 74 % o disminuir el precio del combustible en mas de un 90 %, lo cual no es una meta realista, se necesitarían nuevas tecnologías de mantención, ensamblaje y motores que probablemente aumentarían los costos de inversión de cada bus.

Sin embargo, si la incorporación de buses de gas natural fuera una restricción obligatoria del problema, el escenario más conveniente resulta ser el mix de buses de gas natural y eléctricos en la misma proporción, alcanzando un VAN de -216.821.506,14 UF con aproximadamente 7,3 millones de toneladas de dióxido de carbono en los 20 años de análisis.

En términos económicos y ambientales, una licitación de recambio de buses antes del año 2020 hubiera significado una reducción significativa en los costos sociales y en las emisiones generadas en el periodo de análisis. Los buses EURO III son una tecnología obsoleta que aún operarían hasta el año 2022, además, los buses en circulación con dicha norma sobrepasaron su vida útil, lo cual conlleva a mayores costos de mantención y mayores índices de contaminación tanto para contaminantes locales como para CO2. Lo mismo ocurre con los buses EURO V, si bien, en cuanto a contaminantes locales,

emiten menos que un bus EURO III, igualmente son tecnologías antiguas y que necesitan un recambio. Los buses EURO V circularían hasta el año 2028 influyendo fuertemente en los costos totales. De hecho, en la mayoría de los escenarios, los peaks de contaminación se alcanzaba en los primeros años por esta misma razón.

Por otro lado, este 7 de septiembre de 2020 se anunció la incorporación de 127 buses EURO VI, lo cual, no es una alternativa económica teniendo en cuenta todo lo mencionado en los resultados de esta investigación.

Por lo tanto, la recomendación es realizar el recambio tecnológico lo antes posible y desde ahora sólo incorporar buses propulsados por electricidad, de esta forma se reducen los costos totales, las emisiones y además se adelantaría la electro movilidad en 10 años.

10. Limitantes

A lo largo del desarrollo de esta investigación se han presentado diversas limitantes que obligaron a establecer supuestos y aproximaciones para la elaboración del flujo de costos. A continuación se enunciarán las limitantes y su solución.

- Falta de información acerca de las adquisiciones de buses a lo largo de los años: Si bien se encontró la cantidad de buses adquiridos en el periodo 2005-2018, no estaba diferenciado por tipo de norma, es decir, no había información de que tipo de bus fue adquirido. Lo anterior obliga a tomar supuestos del año de adquisición de buses con norma EURO III, EURO V y EURO VI según información encontrada acerca de la incorporación de esta norma en Chile.

- Falta de información acerca de los contaminantes locales emitidos por el motor de gas natural: Esta limitante obligó a tomar supuestos y utilizar la información proveniente de una noticia elaborada por el Ministerio de Trasportes y Telecomunicaciones (MTT, 2019) que establecía, citando textualmente, 'este bus tiene bajas emisiones contaminantes y, en comparación a un bus a diésel, reduce en un 80 % el material particulado y en un 90 % el óxido de nitrógeno'. Esta información a permitido calcular las emisiones de material particulado en base a los datos disponibles acerca de los buses diésel.

- Falta de información técnica, precio, consumo y cantidad adquirida de los buses de gas natural: La falta de estos datos ha obligado a establecer supuestos en base a la información recopilada. Además, se ha solicitado la información a través de la ley de Transparencia, donde después de varios meses no se obtuvo la información requerida. De esta forma se ha establecido el supuesto de que la cantidad de buses hasta el año 2020 es porcentualmente despreciable en comparación al resto de tecnologías. Por otro lado se ha establecido un costo de adquisición de 275.000 dólares

en base a un estudio llamado 'Natural Gas Buses: Separating Myth from Fact' (Laboratorio Nacional de Energía Renovable), que, citando textualmente plantea: ' Los autobuses de GNC cuestan aproximadamente de 25 a 50 mil dólares más que un autobús convencional de diésel (dependiendo del modelo y cualquier equipo especial que pudiera ordenarse)'. Así se ha establecido el costo de adquisición según la información disponible acerca de los buses diésel.

- Falta de información de costos de mantención de buses de gas natural: No se logró obtener un valor de primera fuente de los costos de mantenimiento de un bus de gas natural, de esta forma se ha calculado según la información y metodología presente en el estudio "National Renewable Energy Laboratory" (NREL,2008), al extrapolar valores de estados Unidos a Chile es posible que ciertas aproximaciones difieran en un pequeño porcentaje, es por esto que uno de los análisis de sensibilidad considera la variación del precio de mantenimiento de los buses de gas natural, con el fin de encontrar algún valor que impacte positivamente en los escenarios que consideran adquisiciones de buses de gas natural.

- Falta de información respecto del precio del combustible al que acceden los operadores del sistema: Los precios del combustible se obtuvieron desde el sitio web Bencina en Línea (Bencina en Línea, 2020), estableciendo el valor mínimo del rango de precios obtenido para cada combustible para el año 2020, donde a partir de ahí, se realiza la proyección. Lo anterior se debe a que los operadores acceden a convenios donde el valor resulta ser menor al que accede una persona natural.

Bibliografía

Ministerio del Medio Ambiente. (2017) *Segundo Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2013.*

Agas21. (2019) *¿Qué es el gas natural comprimido?* Recuperado de: http://www.agas21.com/spa/item/ART00017.html

Cesar Muñoz. (2019) *Alertan sobre la necesidad de renovar los buses antiguos del Transantiago. Muchos no dan para más y son altamente contaminantes* Recuperado de: https://www.fayerwayer.com/2019/02/buses-transantiago/

EPA. (2020) *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente* [Fecha de consulta: Junio 2020] Recuperado de: https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente

La Vanguardia. (2019) *NO2, el peligroso contaminante que afecta a la capacidad de atención de los niños* [Fecha de consulta: Junio 2020] Recuperado de: https://www.lavanguardia.com/natural/20170226/42280025427/no2-dioxido-de-nitrogeno-peligroso.html

La Tercera. (2020) *Buses oruga son los más contaminantes del Transantiago* [Fecha de consulta: Junio 2020] Recuperado de: http://www.revistaei.cl/2019/02/25/los-buses-oruga-los-mas-contaminantes-del-transantiago/

Agas21. (2020) *Así funciona un coche a gas natural comprimido* Recuperado de: http://www.agas21.com/spa/item/ART00025.html/

Directorio de Transporte Publico Metropolitano. (2019) *Distancia recorrida por bus.*

INE. (2020) *Proyección base 2017 para la población de Santiago urbano* [Fecha de consulta: Junio 2020] Recuperado de: https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion

Revistaei. (2019) *Gobierno apunta a lograr antes de 2040 que 100 % de transporte público sea eléctrico* [Fecha de consulta: Agosto 2020] Recuperado de: https://www.revistaei.cl/2019/12/09/gobierno-apunta-a-lograr-antes-de-2040-que-100-de-transporte-publico-sea-electrico/#

Patrick Oemick. (2019) *Evaluación económica y social de la incorporación de buses eléctricos al transporte público urbano de Santiago* Recuperado de: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/171777/Evaluacion-economica-y-socia.-de-la-incorporacion-de-buses-electricos-al-transporte.pdf?sequence=1&isAllowed=y#

Mipleo. (2020) *Técnicos mecánicos Mantención* Recuperado de: https://www.mipleo.cl/ofertas-de-trabajo/oferta-de-trabajo-en-rmetropolitana/tecnicos-mecanicos-mantencion-804021.html?utm_campaign=google_jobs_apply&utm_source=google_jobs_apply&utm_medium=organic#

Oficina Catalana del Cambio Climático. (2011) *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero* Recuperado de: http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531c#

Red Metopolitana de Movilidad. (2016) *Autoridades de Transportes presentan primer bus de Transantiago con tecnología de emisiones EURO VI* Recuperado de: http://www.red.cl/noticias/autoridades-de-transportes-presentan-primer-bus-de-transantiago-con-tecnologia-de-emisiones-euro
jsessionid=ASOOugmvQloeMkYB6TA3iQmd#:~:text=Actualmente%2C%20la%20flota%20de%20Transantiago,un%20costo%20de%20USD%20270.000.#

Bencina en Línea. (2020) *Buscador de precios* Recuperado de: http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=7

Cummins. (2019) *Primer bus a gas natural con motor Cummins* Recuperado de: https://www.cummins.cl/noticias/primer-bus-gas-natural-motor-cummins-2/

Energía Abierta. (2019) *Mapa precio de combustibles* Recuperado de: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/mapa-precio-de-combustibles/

Energía Abierta. (2019) *Balance Nacional de Energía* Recuperado de: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/

Energía Abierta. (2019) *Informe de Importaciones* Recuperado de: http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/252223/informe-de-importaciones/

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2019) *Presentamos primer bus piloto a gas natural del sistema de transportes capitalino* Recuperado de: http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/252223/informe-de-importaciones/

Ministerio de Energía. (2020) *Estrategia Nacional de Electromovilidad* Recuperado de: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf

NREL. (2010) *Autobuses urbanos de gas natural: Separemos el mito de la realidad* Recuperado de: https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30238.pdf/

NREL. (2008) *In-Use Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses at New York City Transit* Recuperado de: https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42534.pdf

Ministerio de Energía. (2017) *ministerio de energía, gobierno de Chile*

CIIFEN. (2017) *Efecto invernadero* Recuperado de: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es

El Mostrador. (2018) *Cambio climático: Los Datos Duros* Recuperado de: Web:https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2018/01/04/cambio-climatico-los-datos-duros/

CO2 – Earth. (2019) *Cambio climático: Los Datos Duros* Recuperado de: https://es.co2.earth/monthly-co2

A. Anexos

Costos e inversión	
Bus Gas Natural	
Consumo Lt/km	0,29
Costo Mantenciones UF/km	0,00756
Costo Total UF	**7.582 UF**
Vida Útil	10-12 años
Bus Diesel EURO VI	
Consumo Lt/km	0,56
Costo Mantenciones UF/km	0,00418
Costo Total UF	**6.134 UF**
Vida Útil	10-12 años
Bus Eléctrico	
Consumo kWh/km	1,52
Costo Mantenciones UF/km	0,00462
Costo Bus UF	7.885 UF
Costo Instalación Cargador UF	386 UF
Total UF	**8.271 UF**
Vida Útil	10-12 años

Figura 27. Costos e inversión de cada bus analizado. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones al año 2020 kg CO2	
Bus Gas Natural	
Consumo Lt/km	0,290
Factor Emisión kgCO2/Lt	1,762
Emisiones kgCO2/km	**0,511**
Bus Diesel EURO VI	
Consumo Lt/km	0,56
Factor Emisión kgCO2/Lt	2,610
Emisiones kgCO2/km	**1,462**
Bus Eléctrico	
Consumo kWh/km	1,52
Factor Emisión kgCO2/kWh	0,332
Emisiones kgCO2/km	**0,505**

Figura 28. Factores de emisión para las 3 tecnologías para el año 2020. Fuente: Elaboración propia.

Factor emisión contaminantes locales		
FE EURO VI	g/km	ton/km
MP	0,0023	2,3E-09
NOx	0,597	0,000000597
FE EURO V	g/km	ton/km
MP	0,0462	4,62E-08
NOx	3,09	0,00000309
FE EURO III	g/km	ton/km
MP	0,207	0,000000207
NOx	9,38	0,00000938
FE Eléctrico	g/km	ton/km
MP	0	0
NOx	0	0
FE Gas	g/km	ton/km
MP	0,00046	4,6E-10
NOx	0,0597	5,97E-08

Figura 29. Factor de emisión para contaminantes locales por tipo de norma. Fuente: Elaboración propia.

BUSES normativa antigua	Consumo	Mantenciones	FE CO2 kgCO2/Lt
Bus EURO III Lt/km	0,67	0,00418	2,610
BUS EURO V Lt/km	0,67	0,00418	2,610

Figura 30. Información técnica para buses EURO III y EURO V. Fuente: Elaboración propia.

Escenarios		
ESCENARIOS	VAN UF	VAN Dólares
Solo diésel	-248.966.290	-9.030.630.256
Solo gas	-229.165.053	-8.312.389.849
Solo eléctrico	-206.173.675	-7.478.435.015
Mix eléctrico y gas	-217.669.364	-7.895.412.432
Mix gas hasta 2025- electricos	-222.806.617	-8.081.753.469

Figura 31. VAN correspondiente a cada escenario analizado. Fuente: Elaboración propia.

Sensibilización UF PRECIOS ELECTRICIDAD							
ESCENARIOS	-40%	-20%	0%	20%	40%	80%	100%
Solo diésel	-246.783.227	-247.874.759	-248.966.290	-250.057.822	-251.149.354	-253.332.418	-254.423.950
Solo gas	-226.981.990	-228.073.522	-229.165.053	-230.256.585	-231.348.117	-233.531.181	-234.622.713
Solo eléctrico	-200.107.839	-203.140.757	-206.173.675	-209.206.593	-212.239.511	-218.305.347	-221.338.265
Mix eléctrico y gas	-213.544.914	-215.607.139	-217.669.364	-219.731.589	-221.793.814	-225.918.264	-227.980.489
Mix gas hasta 2025- electricos	-219.680.599	-221.243.608	-222.806.617	-224.369.626	-225.932.636	-229.058.654	-230.621.663

Figura 32. Resultados obtenidos al sensibilizar el precio de la electricidad. Fuente: Elaboración propia.

Sensibilización UF costos mantención							
ESCENARIOS	-80%	-60%	-40%	-20%	0%	20%	40%
costo mantención	43,4	86,8	130,2	173,6	217,0	260,4	303,8
Solo diésel	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290
Solo gas	-204.321.005	-210.532.017	-216.743.029	-222.954.041	-229.165.053	-235.376.065	-241.587.077
Solo eléctrico	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675
Mix eléctrico y gas	-205.247.340	-208.352.846	-211.458.352	-214.563.858	-217.669.364	-220.774.870	-223.880.376
Mix gas hasta 2025- electricos	-204.244.928	-208.885.350	-213.525.773	-218.166.195	-222.806.617	-227.447.040	-232.087.462

Figura 33. Resultados obtenidos al sensibilizar los costos de mantención. Fuente: Elaboración propia.

Sensibilización UF PRECIOS GAS Costos mantención 216,8						
ESCENARIOS	-90%	-60%	-30%	0%	30%	60%
Solo diésel	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290	-248.966.290
Solo gas	-209.080.392	-215.775.279	-222.470.166	-229.165.053	-235.859.940	-242.554.828
Solo eléctrico	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675	-206.173.675
Mix eléctrico y gas	-207.627.033	-210.974.477	-214.321.920	-217.669.364	-221.016.808	-224.364.251
Mix gas hasta 2025- electricos	-208.113.276	-213.011.057	-217.908.837	-222.806.617	-227.704.398	-232.602.178

Figura 34. Resultados obtenidos al sensibilizar el precio del gas. Fuente: Elaboración propia.

Año	FE SEN (tCO2e/MWh)
2019	0,434
2020	0,332
2021	0,298
2022	0,310
2023	0,305
2024	0,275
2025	0,256
2026	0,255
2027	0,252
2028	0,224
2029	0,217
2030	0,192
2031	0,158
2032	0,147
2033	0,148
2034	0,143
2035	0,132
2036	0,118
2037	0,100
2038	0,098
2039	0,094
2040	0,085
2041	0,024
2042	0,021
2043	0,020
2044	0,019
2045	0,017
2046	0,015
2047	0,015
2048	0,013
2049	0,012
2050	0,012

Tabla 28. Factor de emisión de la electricidad a lo largo de los años. Fuente: Elaboración propia.

Año	Buses RM	Tasa de crecimiento	Transantiago
2018	15628	1,014973125	6655
2019	15862	1,015004413	6754
2020	16100	1,015031056	6979
2021	16342	1,014992045	7083
2022	16587	1,015011756	7189
2023	16836	1,014967926	7296
2024	17088	1,015039794	7405
2025	17345	1,014989911	7516
2026	17605	1,01499574	7628
2027	17869	1,014998041	7742
2028	18137	1,014996968	7858
2029	18409	1,014992667	7975
2030	18685	1,015038801	8094
2031	18966	1,014974164	8215
2032	19250	1,015012987	8338
2033	19539	1,01499565	8463
2034	19832	1,014975797	8589
2035	20129	1,015003229	8717
2036	20431	1,015026186	8847
2037	20738	1,014996625	8979
2038	21049	1,01501259	9113
2039	21365	1,014977767	9249
2040	21685	-	9387

Tabla 29. Proyección del parque de buses en al región metropolitana. Fuente: MTT.

Población urbana Metropolitana	
año	**población Urbana**
2017	7232238
2018	7418769
2019	7622942
2020	7824882
2021	7937816
2022	8003744
2023	8058416
2024	8109367
2025	8157984
2026	8204472
2027	8248732
2028	8290644
2029	8330060
2030	8366926
2031	8401681
2032	8434167
2033	8464212
2034	8491848
2035	8517094
2036	8885316
2037	8967566
2038	9049815
2039	9132064
2040	9214313

Tabla 30. Proyección de la población urbana de la región Metropolitana en base al año 2017. Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

Año		Diesel UF/lt	Tasa	Gas $/lt	Gas UF/lt	Tasa	Electricidad USD/MWh	Electricidad UF/kWh
2019	**450,09**	0,0157	1,051	462,46	0,0161	1,042	54,73	0,00166
2020	473,00	0,0165	1,038	482,00	0,0168	1,006	58,24	0,00177
2021	491,14	0,0171	1,012	484,79	0,0169	1,005	57,64	0,00175
2022	496,85	0,0173	1,031	487,04	0,0170	1,021	53,69	0,00163
2023	512,14	0,0179	1,045	497,15	0,0173	1,025	54,32	0,00165
2024	535,07	0,0187	1,032	509,49	0,0178	1,034	52,01	0,00158
2025	551,97	0,0192	1,038	526,73	0,0184	1,020	51,69	0,00157
2026	573,08	0,0200	1,035	537,26	0,0187	1,008	49,31	0,00150
2027	593,18	0,0207	1,025	541,36	0,0189	1,021	50,26	0,00152
2028	608,23	0,0212	1,023	552,95	0,0193	1,006	51,87	0,00157
2029	622,52	0,0217	1,022	556,10	0,0194	1,006	53,76	0,00163
2030	636,36	0,0222	1,018	559,65	0,0195	1,000	48,76	0,00148
2031	648,02	0,0226	1,018	559,55	0,0195	1,020	46,90	0,00142
2032	659,37	0,0230	1,016	570,61	0,0199	1,008	46,75	0,00142
2033	669,72	0,0233	1,015	575,00	0,0200	1,013	47,70	0,00145
2034	680,01	0,0237	1,015	582,22	0,0203	1,008	48,35	0,00147
2035	690,37	0,0241	1,013	586,73	0,0205	1,012	48,54	0,00147
2036	699,08	0,0244	1,010	593,88	0,0207	1,006	49,77	0,00151
2037	706,15	0,0246	1,012	597,35	0,0208	1,005	50,22	0,00152
2038	714,28	0,0249	1,009	600,31	0,0209	1,003	50,55	0,00153
2039	720,99	0,0251	1,009	601,87	0,0210	1,015	51,06	0,00155
2040	727,48	0,0254	1,009	610,89	0,0213	1,002	51,56	0,00156
2038	714,28	0,0249	1,009	600,31	0,0209	1,003	50,55	0,00153
2039	720,99	0,0251	1,009	601,87	0,0210	1,015	51,06	0,00155
2040	727,48	0,0254	1,009	610,89	0,0213	1,002	51,56	0,00156

Tabla 31. Proyección de los precios del combustible diésel, gas natural y electricidad. Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE).

AÑOS EN OPERACIÓN	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
EURO III	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561	561																				
		1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233	1233																						
			200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	11																				
				854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854	854																				
					271	271	271	271	271	271	271	271	271	271	271	271																				
						1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151	1151																				
							202	202	202	202	202	202	202	202	202	202																				
								1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098																			
TOTAL EURO III	**561**	**1794**	**1994**	**2848**	**3119**	**4270**	**4472**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**5570**	**4337**	**4148**	**1098**																			
EURO V									220	220	220	220	220	220	220	220	220	220																		
										520	520	520	520	520	520	520	520	520	520																	
											7	7	7	7	7	7	7	7	7	7																
AJUSTE															589	589	589	589	589	589	589	589	589	589												
TOTAL EURO V									**220**	**740**	**747**	**747**	**747**	**747**	**1336**	**1336**	**1336**	**1336**	**1116**	**596**	**589**	**589**	**589**	**589**												
EURO VI												183	183	183	183	183	183	183	183	183	183															
													153	153	153	153	153	153	153	153	153	153														
														103	103	103	103	103	103	103	103	103	103													
EURO VI fijos															490	490	490	490	490	490	490	490	490	490												
TOTAL EURO VI FIJOS														**439**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**929**	**746**	**593**	**490**												
TOTAL														**6756**	**6602**	**6413**	**3363**	**2265**	**2045**	**1525**	**1518**	**1335**	**1182**													
ELÉCTRICOS FIJOS															283	283	283	283	283	283	283	283	283	283												
																283	283	283	283	283	283	283	283	283	283											
TOTAL Eléctricos															283	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283											
ADQUIRIDOS fijos																	3154	1204	327	629	118	295	267	1298	400	402	3275	1327	452	755	246	425	399	1432	536	540
ADQUIRIDOS																	3154	3154	3154	3154	3154	3154	3154	3154	3154	3154										
																		1204	1204	1204	1204	1204	1204	1204	1204	1204	1204									
																			327	327	327	327	327	327	327	327	327	327								
																				629	629	629	629	629	629	629	629	629	629							
																					118	118	118	118	118	118	118	118	118	118						
																						295	295	295	295	295	295	295	295	295	295					
																							267	267	267	267	267	267	267	267	267	267				
																								1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298			
																									400	400	400	400	400	400	400	400	400	400		
																										402	402	402	402	402	402	402	402	402	402	
																											3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275
																												1327	1327	1327	1327	1327	1327	1327	1327	1327
																													452	452	452	452	452	452	452	452
																														755	755	755	755	755	755	755
																															246	246	246	246	246	246
																																425	425	425	425	425
																																	399	399	399	399
																																		1432	1432	1432
																																			536	536
																																				540
TOTAL														6756	6885	6979	7083	7189	7296	7405	7516	7628	7742	7858	7975	8094	8215	8338	8463	8589	8717	8847	8979	9113	9249	9387
																6979	7083	7189	7296	7405	7516	7628	7742	7858	7975	8094	8215	8338	8463	8589	8717	8847	8979	9113	9249	9387

Tabla 32. Proceso de adquisición y operación de buses para los años 2020-2040 considerando 10 años de vida útil por bus. Fuente: Elaboración propia.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Número de buses nuevos	**283**	**3.154**	**1.204**	**327**	**629**	**118**	**295**	**267**	**1.298**	**400**	**402**
Buses Diesel		3.154	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402
Buses eléctricos	283										0
Buses CNG											0
Número de buses dados de baja	3.050	1.098	220	520	7	183	153	1.182	283	283	3.154
Total Buses Trasantiago	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**7.858**	**7.975**	**8.094**
% Diesel	92%	92%	92%	92%	92%	92%	93%	93%	94%	96%	100%
% eléctricos	8%	8%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	6%	4%	0%
% CNG	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Total Diésel EURO III valor fijo	4148	1098									
Total Diésel EURO V valor fijo	1336	1336	1336	1116	596	589	589	589	589		
Total Diesel EURO VI valor fijo	929	929	929	929	929	929	746	593	490		
Total eléctricos valor fijo	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283	
Total Diesel EURO VI		3.154	4.358	4.685	5.314	5.432	5.727	5.994	7.292	7.692	8.094
Total eléctricos											
Total CNG											
TOTAL	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**8.937**	**7.975**	**8.094**
Distacia total recorrida km	628.110.000	637.470.000	647.010.000	656.640.000	666.450.000	676.440.000	686.520.000	696.780.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	373.320.000	98.820.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	120.240.000	120.240.000	120.240.000	100.440.000	53.640.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	83.610.000	367.470.000	475.830.000	505.260.000	561.870.000	572.490.000	582.570.000	592.830.000	700.380.000	692.280.000	728.460.000
Distancia recorrida eléctrico km	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	25.470.000	0
Distancia recorrida Gas Natural km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0165	0,0171	0,0173	0,0179	0,0187	0,0192	0,0200	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222
Precio Electricidad UF/kWh	0,001766045	0,001747968	0,001628268	0,001647428	0,001577253	0,001567435	0,001495341	0,001524212	0,001572912	0,001630471	0,001478628
Precio CNG UF/Lt	0,0168	0,0169	0,0170	0,0173	0,0178	0,0184	0,0187	0,0189	0,0193	0,0194	0,0195
Población Provincia de stgo	7.824.882	7.937.816	8.003.744	8.058.416	8.109.367	8.157.984	8.204.472	8.248.732	8.290.644	8.330.060	8.366.926
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00033	0,00030	0,00031	0,00030	0,00027	0,00026	0,00025	0,00025	0,00022	0,00022	0,00019
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	652.825	172.807	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	210.264	210.264	210.264	175.639	93.800	92.699	92.699	92.699	92.699	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	122.204,4	537.094,2	695.473,1	738.488,0	821.229,2	836.751,4	851.484,3	866.480,3	1.023.675,4	1.011.836,4	1.064.717,1
Emisiones CO2 eléctrico ton	25.690,1	23.056,2	23.984,6	23.597,0	21.260,2	19.856,0	19.734,0	19.535,1	17.341,1	8.382,7	0,0
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**1.010.982,9**	**943.220,5**	**929.721,4**	**937.724,4**	**936.289,7**	**949.306,0**	**963.916,9**	**978.714,0**	**1.133.715,1**	**1.020.219,2**	**1.064.717,1**
Emisiones MP EURO III Ton	77	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	3.502	927	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	6	6	6	5	2	2	2	2	2	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	372	372	372	310	166	164	164	164	164	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Emisiones NOX EURO VI Ton	50	219	284	302	335	342	348	354	418	413	435
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus EURO VI	0	19.347.025	7.385.484	2.005.858	3.858.364	723.827	1.809.566	1.637.811	7.962.092	2.453.649	2.465.918
Inversión Bus Eléctrico	2.340.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	4.124.412	1.133.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	1.328.403	1.379.336	1.395.383	1.201.469	670.373	683.434	709.564	734.449	753.085	0	0
Costo Operación EURO VI	772.062	3.523.353	4.615.401	5.051.657	5.869.168	6.169.072	6.517.711	6.865.110	8.316.356	8.413.323	9.049.827
Costo Operación eléctrico	136.743	135.343	126.075	127.558	122.125	121.365	115.782	118.018	121.789	63.123	0
Costo Operación Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO III	1.561.735	413.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	503.008	503.008	503.008	420.178	224.396	221.760	221.760	221.760	221.760	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	349.771	1.537.262	1.990.572	2.113.689	2.350.509	2.394.936	2.437.105	2.480.026	2.929.947	2.896.062	3.047.416
Costo de Mantenimiento Eléctrico	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	117.649	0
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	832.039	776.270	765.161	771.747	770.566	781.279	793.304	805.482	933.048	839.640	876.262
Costo Social MP Total 3 tecnologías	16.119.432	5.289.413	1.320.526	1.160.177	758.660	762.261	771.325	780.315	835.165	329.096	347.828
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	21.158.290	8.304.112	3.616.618	3.399.096	2.801.216	2.842.713	2.892.941	2.943.371	3.325.216	2.372.831	2.507.890
Total Costos UF	**49.461.810,2**	**42.577.438,0**	**21.953.527,7**	**16.486.727,5**	**17.660.675,3**	**14.935.945,6**	**16.504.357,0**	**16.821.641,1**	**25.633.757,4**	**17.485.373,8**	**18.295.140,6**
Costos Totales para VAN	-49.461.810,2	-42.577.438,0	-21.953.527,7	-16.486.727,5	-17.660.675,3	-14.935.945,6	-16.504.357,0	-16.821.641,1	-25.633.757,4	-17.485.373,8	-18.295.140,6

Tabla 33. Escenario sólo adquisiciones diésel, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia.

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Número de buses nuevos	**3.275**	**1.327**	**452**	**755**	**246**	**425**	**399**	**1.432**	**536**	**540**
Buses Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buses eléctricos	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Buses CNG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de buses dados de baja	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402	
Total Buses Trasantiago	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
% Diesel	60 %	45 %	40 %	32 %	31 %	27 %	23 %	9 %	4 %	0 %
% eléctricos	40 %	55 %	60 %	68 %	69 %	73 %	77 %	91 %	96 %	100 %
% CNG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo										
Total Diésel EURO V valor fijo										
Total Diesel EURO VI valor fijo										
Total eléctricos valor fijo	3.275	4.602	5.054	5.809	6.055	6.480	6.879	8.311	8.847	9.387
Total Diesel EURO VI	4.940	3.736	3.409	2.780	2.662	2.367	2.100	802	402	0
Total eléctricos										
Total CNG										
TOTAL	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
Distacia total recorrida km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	444.600.000	336.240.000	306.810.000	250.200.000	239.580.000	213.030.000	189.000.000	72.180.000	36.180.000	0
Distancia recorrida eléctrico km	294.750.000	414.180.000	454.860.000	522.810.000	544.950.000	583.200.000	619.110.000	747.990.000	796.230.000	844.830.000
Distancia recorrida Gas Natural km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0226	0,0230	0,0233	0,0237	0,0241	0,0244	0,0246	0,0249	0,0251	0,0254
Precio Electricidad UF/kWh	0,001422302	0,001417651	0,001446446	0,001466397	0,001471989	0,001509209	0,001522848	0,001533003	0,001548352	0,001563689
Precio CNG UF/Lt	0,0195	0,0199	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207	0,0208	0,0209	0,0210	0,0213
Población Provincia de stgo	8.401.681	8.434.167	8.464.212	8.491.848	8.517.094	8.885.316	8.967.566	9.049.815	9.132.064	9.214.313
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00013	0,00012	0,00010	0,00010	0,00009	0,00008
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	649.827,4	491.448,4	448.433,5	365.692,3	350.170,1	311.364,6	276.242,4	105.498,3	52.880,7	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	70.616,2	92.595,8	102.370,7	114.004,0	109.233,9	104.406,2	94.214,7	111.068,1	114.345,5	108.990,3
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**720.443,6**	**584.044,2**	**550.804,2**	**479.696,4**	**459.404,1**	**415.770,8**	**370.457,1**	**216.566,4**	**167.226,2**	**108.990,3**
Emisiones MP EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	0,0
Emisiones NOX EURO VI Ton	265	201	183	149	143	127	113	43	22	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	27.086.634	10.975.256	3.738.369	6.244.400	2.034.599	3.515.059	3.300.020	11.843.683	4.433.110	4.466.193
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO VI	5.624.612	4.328.210	4.011.386	3.321.489	3.228.969	2.907.351	2.605.511	1.006.510	509.248	0
Costo Operación eléctrico	637.220	892.487	1.000.055	1.165.304	1.219.284	1.337.859	1.433.072	1.742.940	1.873.923	2.007.998
Costo Operación Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	1.859.925	1.406.616	1.283.499	1.046.679	1.002.251	891.183	790.657	301.956	151.354	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	1.361.490	1.913.154	2.101.060	2.414.930	2.517.198	2.693.880	2.859.753	3.455.067	3.677.894	3.902.384
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	592.925	480.668	453.312	394.790	378.090	342.179	304.886	178.234	137.627	89.699
Costo Social MP Total 3 tecnologías	213.171	161.839	148.200	121.250	116.449	108.021	96.723	37.278	18.855	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	1.536.995	1.166.886	1.068.545	874.231	839.612	778.844	697.386	268.778	135.948	0
Total Costos UF	**38.912.973,0**	**21.325.116,7**	**13.804.426,1**	**15.583.073,0**	**11.336.451,6**	**12.574.377,0**	**12.088.007,6**	**18.834.445,5**	**10.937.960,6**	**10.466.274,5**
Costos Totales para VAN	-38.912.973,0	-21.325.116,7	-13.804.426,1	-15.583.073,0	-11.336.451,6	-12.574.377,0	-12.088.007,6	-18.834.445,5	-10.937.960,6	-10.466.274,5

Tabla 34. Continuación escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Número de buses nuevos	**283**	**3.154**	**1.204**	**327**	**629**	**118**	**295**	**267**	**1.298**	**400**	**402**
Buses Diesel											0
Buses eléctricos	283										0
Buses CNG		3.154	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402
Número de buses dados de baja	3.050	1.098	220	520	7	183	153	1.182	283	283	3.154
Total Buses Transantiago	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**7.858**	**7.975**	**8.094**
% Diesel	92%	47%	32%	28%	21%	20%	18%	15%	12%	0%	0%
% eléctricos	8%	8%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	6%	4%	0%
% CNG	0%	45%	61%	64%	72%	72%	75%	77%	82%	96%	100%
Total Diésel EURO III valor fijo	4148	1098									
Total Diésel EURO V valor fijo	1336	1336	1336	1116	596	589	589	589	589		
Total Diesel EURO VI valor fijo	929	929	929	929	929	929	746	593	490		
Total eléctricos valor fijo	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283	
Total Diesel EURO VI											
Total eléctricos											
Total CNG	0	3.154	4.358	4.685	5.314	5.432	5.727	5.994	7.292	7.692	8.094
TOTAL	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**8.937**	**7.975**	**8.094**
Distacia total recorrida km	628.110.000	637.470.000	647.010.000	656.640.000	666.450.000	676.440.000	686.520.000	696.780.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	373.320.000	98.820.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	120.240.000	120.240.000	120.240.000	100.440.000	53.640.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	67.140.000	53.370.000	44.100.000	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	25.470.000	0
Distancia recorrida Gas Natural km	0	283.860.000	392.220.000	421.650.000	478.260.000	488.880.000	515.430.000	539.460.000	656.280.000	692.280.000	728.460.000
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0165	0,0171	0,0173	0,0179	0,0187	0,0192	0,0200	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222
Precio Electricidad UF/kWh	0,001766045	0,001747968	0,001628268	0,001647428	0,001577253	0,001567435	0,001495341	0,001524212	0,001572912	0,001630471	0,001478628
Precio CNG UF/Lt	0,0168	0,0169	0,0170	0,0173	0,0178	0,0184	0,0187	0,0189	0,0193	0,0194	0,0195
Población Provincia de stgo	7.824.882	7.937.816	8.003.744	8.058.416	8.109.367	8.157.984	8.204.472	8.248.732	8.290.644	8.330.060	8.366.926
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00033	0,00030	0,00031	0,00030	0,00027	0,00026	0,00025	0,00025	0,00022	0,00022	0,00019
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	652.825	172.807	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	210.264	210.264	210.264	175.639	93.800	92.699	92.699	92.699	92.699	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	98.131,8	78.005,6	64.456,6	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	25.690,1	23.056,2	23.984,6	23.597,0	21.260,2	19.856,0	19.734,0	19.535,1	17.341,1	8.382,7	0,0
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	145.005,6	200.359,7	215.393,6	244.311,9	249.737,0	263.299,7	275.575,0	335.250,8	353.640,9	372.122,9
Emisiones CO2 Total toneladas	**1.010.982,9**	**673.336,4**	**556.812,3**	**536.834,3**	**481.576,8**	**484.496,0**	**473.864,1**	**465.814,3**	**509.747,1**	**362.023,6**	**372.122,9**
Emisiones MP EURO III Ton	77,28	20,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO III Ton	3.501,74	926,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP EURO V Ton	5,56	5,56	5,56	4,64	2,48	2,45	2,45	2,45	2,45	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO V Ton	371,54	371,54	371,54	310,36	165,75	163,80	163,80	163,80	163,80	0,00	0,00
Emisiones MP EURO VI Ton	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,15	0,12	0,10	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO VI Ton	49,92	49,92	49,92	49,92	49,92	49,92	40,08	31,86	26,33	0,00	0,00
Emisiones MP Eléctrico Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP Gas Natural Ton	0,00	0,13	0,18	0,19	0,22	0,22	0,24	0,25	0,30	0,32	0,34
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0,00	16,95	23,42	25,17	28,55	29,19	30,77	32,21	39,18	41,33	43,49
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	2.340.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Gas Natural	0	23.912.053	9.128.127	2.479.151	4.768.764	894.617	2.236.543	2.024.261	9.840.788	3.032.600	3.047.763
Costo Operación EURO III	4.124.412	1.133.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	1.328.403	1.379.336	1.395.383	1.201.469	670.373	683.434	709.564	734.449	753.085	0	0
Costo Operación EURO VI	772.062	801.664	810.991	835.944	873.371	900.970	751.153	618.037	523.646	0	0
Costo Operación eléctrico	136.743	135.343	126.075	127.558	122.125	121.365	115.782	118.018	121.789	63.123	0
Costo Operación Gas Natural	0	1.391.239	1.931.250	2.119.247	2.463.432	2.603.376	2.799.627	2.952.495	3.668.765	3.892.077	4.121.606
Costo de Mantenimiento EURO III	1.561.735	413.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	503.008	503.008	503.008	420.178	224.396	221.760	221.760	221.760	221.760	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	280.871	223.266	184.487	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	117.649	0
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	2.147.379	2.967.115	3.189.750	3.618.001	3.698.340	3.899.189	4.080.974	4.964.708	5.237.046	5.510.745
Costo Social CO2 UF/tonCO2	832.039	554.156	458.257	441.815	396.338	398.740	389.990	383.365	419.522	297.945	306.257
Costo Social MP Total 3 tecnologías	16.119.432	5.186.543	1.177.206	1.005.051	581.595	580.179	578.260	577.159	586.760	65.819	69.566
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	21.158.290	7.469.692	2.454.093	2.140.805	1.364.965	1.365.768	1.326.913	1.295.490	1.310.301	237.283	250.789
Total Costos UF	**49.461.810,2**	**45.612.501,0**	**21.536.574,0**	**14.546.037,5**	**15.668.429,2**	**12.053.618,7**	**13.544.950,6**	**13.464.574,5**	**22.830.909,6**	**12.943.542,4**	**13.306.726,0**
Costos Totales para VAN	-49.461.810,2	-45.612.501,0	-21.536.574,0	-14.546.037,5	-15.668.429,2	-12.053.618,7	-13.544.950,6	-13.464.574,5	-22.830.909,6	-12.943.542,4	-13.306.726,0

Tabla 35. Escenario sólo adquisiciones de buses a gas natural, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia.

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Número de buses nuevos	**3.275**	**1.327**	**452**	**755**	**246**	**425**	**399**	**1.432**	**536**	**540**
Buses Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buses eléctricos	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Buses CNG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de buses dados de baja	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402	
Total Buses Transantiago	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
% Diesel	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
% eléctricos	40 %	55 %	60 %	68 %	69 %	73 %	77 %	91 %	96 %	100 %
% CNG	60 %	45 %	40 %	32 %	31 %	27 %	23 %	9 %	4 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo										
Total Diésel EURO V valor fijo										
Total Diesel EURO VI valor fijo										
Total eléctricos valor fijo	3.275	4.602	5.054	5.809	6.055	6.480	6.879	8.311	8.847	9.387
Total Diesel EURO VI										
Total eléctricos										
Total CNG	4.940	3.736	3.409	2.780	2.662	2.367	2.100	802	402	0
TOTAL	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
Distacia total recorrida km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	294.750.000	414.180.000	454.860.000	522.810.000	544.950.000	583.200.000	619.110.000	747.990.000	796.230.000	844.830.000
Distancia recorrida Gas Natural km	444.600.000	336.240.000	306.810.000	250.200.000	239.580.000	213.030.000	189.000.000	72.180.000	36.180.000	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0226	0,0230	0,0233	0,0237	0,0241	0,0244	0,0246	0,0249	0,0251	0,0254
Precio Electricidad UF/kWh	0,001422302	0,001417651	0,001446446	0,001466397	0,001471989	0,001509209	0,001522848	0,001533003	0,001548352	0,001563689
Precio CNG UF/Lt	0,0195	0,0199	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207	0,0208	0,0209	0,0210	0,0213
Población Provincia de stgo	8.401.681	8.434.167	8.464.212	8.491.848	8.517.094	8.885.316	8.967.566	9.049.815	9.132.064	9.214.313
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00013	0,00012	0,00010	0,00010	0,00009	0,00008
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	70.616,2	92.595,8	102.370,7	114.004,0	109.233,9	104.406,2	94.214,7	111.068,1	114.345,5	108.990,3
Emisiones CO2 gas natural ton	227.117,2	171.763,2	156.729,3	127.810,9	122.385,8	108.823,2	96.547,8	36.872,1	18.482,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**297.733,5**	**264.359,0**	**259.100,0**	**241.815,0**	**231.619,8**	**213.229,4**	**190.762,5**	**147.940,2**	**132.827,5**	**108.990,3**
Emisiones MP EURO III Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO III Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP EURO V Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO V Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP EURO VI Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX EURO VI Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP Eléctrico Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones MP Gas Natural Ton	0,20	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,03	0,02	0,00
Emisiones NOx Gas Natural Ton	26,54	20,07	18,32	14,94	14,30	12,72	11,28	4,31	2,16	0,00
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	27.086.634	10.975.256	3.738.369	6.244.400	2.034.599	3.515.059	3.300.020	11.843.683	4.433.110	4.466.193
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación eléctrico	637.220	892.487	1.000.055	1.165.304	1.219.284	1.337.859	1.433.072	1.742.940	1.873.923	2.007.998
Costo Operación Gas Natural	2.515.093	1.939.686	1.783.537	1.472.720	1.421.130	1.279.025	1.141.380	438.060	220.149	0
Costo de Mantenimiento EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	1.361.490	1.913.154	2.101.060	2.414.930	2.517.198	2.693.880	2.859.753	3.455.067	3.677.894	3.902.384
Costo de Mantenimiento Gas Natural	3.363.365	2.543.630	2.320.994	1.892.744	1.812.405	1.611.556	1.429.771	546.036	273.699	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	245.035	217.567	213.239	199.014	190.623	175.488	156.998	121.755	109.317	89.699
Costo Social MP Total 3 tecnologías	42.634	32.368	29.640	24.250	23.290	21.604	19.345	7.456	3.771	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	153.700	116.689	106.855	87.423	83.961	77.884	69.739	26.878	13.595	0
Total Costos UF	**35.405.170,6**	**18.630.836,9**	**11.293.748,4**	**13.500.785,0**	**9.302.489,6**	**10.712.355,7**	**10.410.077,0**	**18.181.874,0**	**10.605.458,6**	**10.466.274,5**
Costos Totales para VAN	-35.405.170,6	-18.630.836,9	-11.293.748,4	-13.500.785,0	-9.302.489,6	-10.712.355,7	-10.410.077,0	-18.181.874,0	-10.605.458,6	-10.466.274,5

Tabla 36. Continuación escenario sólo diésel. Fuente: Elaboración propia.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Número de buses nuevos	**283**	**3.154**	**1.204**	**327**	**629**	**118**	**295**	**267**	**1.298**	**400**	**402**
Buses Diesel											0
Buses eléctricos	283	3.154	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402
Buses CNG											0
Número de buses dados de baja	3.050	1.098	220	520	7	183	153	1.182	283	283	3.154
Total Buses Transantiago	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**7.858**	**7.975**	**8.094**
% Diesel	92 %	47 %	32 %	28 %	21 %	20 %	18 %	15 %	12 %	0 %	0 %
% eléctricos	8 %	53 %	68 %	72 %	79 %	80 %	82 %	85 %	88 %	100 %	100 %
% CNG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo	4148	1098									
Total Diésel EURO V valor fijo	1336	1336	1336	1116	596	589	589	589	589		
Total Diesel EURO VI valor fijo	929	929	929	929	929	929	746	593	490		
Total eléctricos valor fijo	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283	402
Total Diesel EURO VI											
Total eléctricos		3.154	4.358	4.685	5.314	5.432	5.727	5.994	7.292	7.692	7.692
Total CNG											
TOTAL	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**8.937**	**7.975**	**8.094**
Distacia total recorrida km	628.110.000	637.470.000	647.010.000	656.640.000	666.450.000	676.440.000	686.520.000	696.780.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	373.320.000	98.820.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	120.240.000	120.240.000	120.240.000	100.440.000	53.640.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	67.140.000	53.370.000	44.100.000	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	50.940.000	334.800.000	443.160.000	472.590.000	529.200.000	539.820.000	566.370.000	590.400.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Gas Natural km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0165	0,0171	0,0173	0,0179	0,0187	0,0192	0,0200	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222
Precio Electricidad UF/kWh	0,001766045	0,001747968	0,001628268	0,001647428	0,001577253	0,001567435	0,001495341	0,001524212	0,001572912	0,001630471	0,001478628
Precio CNG UF/Lt	0,0168	0,0169	0,0170	0,0173	0,0178	0,0184	0,0187	0,0189	0,0193	0,0194	0,0195
Población Provincia de stgo	7.824.882	7.937.816	8.003.744	8.058.416	8.109.367	8.157.984	8.204.472	8.248.732	8.290.644	8.330.060	8.366.926
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00033	0,00030	0,00031	0,00030	0,00027	0,00026	0,00025	0,00025	0,00022	0,00022	0,00019
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	652.825	172.807	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	210.264	210.264	210.264	175.639	93.800	92.699	92.699	92.699	92.699	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	98.131,8	78.005,6	64.456,6	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	25.690,1	151.535,2	208.657,3	218.918,0	220.865,6	210.418,0	219.410,5	226.414,1	240.753,5	236.226,4	212.843,4
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**1.010.982,9**	**656.809,8**	**541.125,4**	**516.761,8**	**436.870,3**	**425.320,9**	**410.240,9**	**397.118,2**	**397.908,6**	**236.226,4**	**212.843,4**
Emisiones MP EURO III Ton	77	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	3.502	927	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	6	6	6	5	2	2	2	2	2	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	372	372	372	310	166	164	164	164	164	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	50	50	50	50	50	50	40	32	26	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	2.340.616	26.085.876	9.957.957	2.704.528	5.202.288	975.946	2.439.865	2.208.284	10.735.405	3.308.291	3.324.833
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	4.124.412	1.133.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	1.328.403	1.379.336	1.395.383	1.201.469	670.373	683.434	709.564	734.449	753.085	0	0
Costo Operación EURO VI	772.062	801.664	810.991	835.944	873.371	900.970	751.153	618.037	523.646	0	0
Costo Operación eléctrico	136.743	889.534	1.096.807	1.183.408	1.268.717	1.286.122	1.287.312	1.367.840	1.690.840	1.778.811	1.637.224
Costo Operación Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO III	1.561.735	413.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	503.008	503.008	503.008	420.178	224.396	221.760	221.760	221.760	221.760	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	280.871	223.266	184.487	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	235.299	1.546.487	2.047.016	2.182.957	2.444.447	2.493.502	2.616.140	2.727.138	3.266.745	3.315.385	3.364.856
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	832.039	540.554	445.346	425.295	359.544	350.039	337.628	326.828	327.479	194.414	175.170
Costo Social MP Total 3 tecnologías	16.119.432	5.160.826	1.141.377	966.270	537.328	534.658	529.994	526.371	524.659	0	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	21.158.290	7.376.979	2.324.924	2.000.995	1.205.382	1.201.663	1.152.909	1.112.392	1.086.421	0	0
Total Costos UF	**49.461.810,2**	**46.181.052,1**	**20.072.579,1**	**12.270.814,8**	**13.135.616,8**	**8.997.864,6**	**10.327.196,7**	**10.066.366,1**	**19.314.527,7**	**8.596.901,5**	**8.502.082,9**
Costos Totales para VAN	-49.461.810,2	-46.181.052,1	-20.072.579,1	-12.270.814,8	-13.135.616,8	-8.997.864,6	-10.327.196,7	-10.066.366,1	-19.314.527,7	-8.596.901,5	-8.502.082,9

Tabla 37. Escenario sólo adquisiciones de buses eléctricos , sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia.

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Número de buses nuevos	**3.275**	**1.327**	**452**	**755**	**246**	**425**	**399**	**1.432**	**536**	**540**
Buses Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buses eléctricos	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Buses CNG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de buses dados de baja	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402	
Total Buses Transantiago	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
% Diesel	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
% eléctricos	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
% CNG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo										
Total Diésel EURO V valor fijo										
Total Diesel EURO VI valor fijo										
Total eléctricos valor fijo	3.275	4.602	5.054	5.809	6.055	6.480	6.879	8.311	8.847	9.387
Total Diesel EURO VI										
Total eléctricos	4.940	3.736	3.409	2.780	2.662	2.367	2.100	802	402	0
Total CNG										
TOTAL	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
Distacia total recorrida km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Gas Natural km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0226	0,0230	0,0233	0,0237	0,0241	0,0244	0,0246	0,0249	0,0251	0,0254
Precio Electricidad UF/kWh	0,001422302	0,001417651	0,001446446	0,001466397	0,001471989	0,001509209	0,001522848	0,001533003	0,001548352	0,001563689
Precio CNG UF/Lt	0,0195	0,0199	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207	0,0208	0,0209	0,0210	0,0213
Población Provincia de stgo	8.401.681	8.434.167	8.464.212	8.491.848	8.517.094	8.885.316	8.967.566	9.049.815	9.132.064	9.214.313
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00013	0,00012	0,00010	0,00010	0,00009	0,00008
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	177.133,5	167.767,0	171.421,3	168.562,7	157.257,2	142.543,4	122.976,3	121.786,0	119.541,2	108.990,3
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**177.133,5**	**167.767,0**	**171.421,3**	**168.562,7**	**157.257,2**	**142.543,4**	**122.976,3**	**121.786,0**	**119.541,2**	**108.990,3**
Emisiones MP EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	27.086.634	10.975.256	3.738.369	6.244.400	2.034.599	3.515.059	3.300.020	11.843.683	4.433.110	4.466.193
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación eléctrico	1.598.400	1.617.027	1.674.606	1.722.980	1.755.325	1.826.550	1.870.555	1.911.131	1.959.073	2.007.998
Costo Operación Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	3.415.158	3.466.292	3.518.257	3.570.638	3.623.851	3.677.894	3.732.770	3.788.477	3.845.015	3.902.384
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	145.781	138.072	141.080	138.727	129.423	117.313	101.210	100.230	98.382	89.699
Costo Social MP Total 3 tecnologías	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Costos UF	**32.245.973,1**	**16.196.647,5**	**9.072.312,4**	**11.676.745,3**	**7.543.197,7**	**9.136.816,8**	**9.004.555,0**	**17.643.520,4**	**10.335.580,0**	**10.466.274,5**
Costos Totales para VAN	-32.245.973,1	-16.196.647,5	-9.072.312,4	-11.676.745,3	-7.543.197,7	-9.136.816,8	-9.004.555,0	-17.643.520,4	-10.335.580,0	-10.466.274,5

Tabla 38. Continuación escenario sólo eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Número de buses nuevos	**283**	**3.154**	**1.204**	**327**	**629**	**118**	**295**	**267**	**1.298**	**400**	**402**
Buses Diesel											0
Buses eléctricos	283	1.577	602	164	315	59	148	134	649	200	201
Buses CNG		1.577	602	164	315	59	148	134	649	200	201
Número de buses dados de baja	3.050	1.098	220	520	7	183	153	1.182	283	283	3.154
Total Buses Transantiago	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**7.858**	**7.975**	**8.094**
% Diesel	92 %	47 %	32 %	28 %	21 %	20 %	18 %	15 %	12 %	0 %	0 %
% eléctricos	8 %	30 %	38 %	40 %	44 %	44 %	45 %	46 %	47 %	52 %	50 %
% CNG	0 %	22 %	30 %	32 %	36 %	36 %	38 %	39 %	41 %	48 %	50 %
Total Diésel EURO III valor fijo	4148	1098									
Total Diésel EURO V valor fijo	1336	1336	1336	1116	596	589	589	589	589		
Total Diesel EURO VI valor fijo	929	929	929	929	929	929	746	593	490		
Total eléctricos valor fijo	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283	
Total Diesel EURO VI											
Total eléctricos		1.577	2.179	2.343	2.657	2.716	2.864	2.997	3.646	3.846	4.047
Total CNG		1.577	2.179	2.343	2.657	2.716	2.864	2.997	3.646	3.846	4.047
TOTAL	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**8.937**	**7.975**	**8.094**
Distancia total recorrida km	628.110.000	637.470.000	647.010.000	656.640.000	666.450.000	676.440.000	686.520.000	696.780.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	373.320.000	98.820.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	120.240.000	120.240.000	120.240.000	100.440.000	53.640.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	67.140.000	53.370.000	44.100.000	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	50.940.000	192.870.000	247.050.000	261.765.000	290.070.000	295.380.000	308.655.000	320.670.000	379.080.000	371.610.000	364.230.000
Distancia recorrida Gas Natural km	0	141.930.000	196.110.000	210.825.000	239.130.000	244.440.000	257.715.000	269.730.000	328.140.000	346.140.000	364.230.000
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0165	0,0171	0,0173	0,0179	0,0187	0,0192	0,0200	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222
Precio Electricidad UF/kWh	0,001766045	0,001747968	0,001628268	0,001647428	0,001577253	0,001567435	0,001495341	0,001524212	0,001572912	0,001630471	0,001478628
Precio CNG UF/Lt	0,0168	0,0169	0,0170	0,0173	0,0178	0,0184	0,0187	0,0189	0,0193	0,0194	0,0195
Población Provincia de stgo	7.824.882	7.937.816	8.003.744	8.058.416	8.109.367	8.157.984	8.204.472	8.248.732	8.290.644	8.330.060	8.366.926
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00033	0,00030	0,00031	0,00030	0,00027	0,00026	0,00025	0,00025	0,00022	0,00022	0,00019
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	652.825	172.807	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	210.264	210.264	210.264	175.639	93.800	92.699	92.699	92.699	92.699	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	98.131,8	78.005,6	64.456,6	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	25.690,1	87.295,7	116.321,0	121.257,5	121.062,9	115.137,0	119.572,3	122.974,6	129.047,3	122.304,6	106.421,7
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	72.502,8	100.179,9	107.696,8	122.156,0	124.868,5	131.649,8	137.787,5	167.625,4	176.820,4	186.061,4
Emisiones CO2 Total toneladas	**1.010.982,9**	**665.073,1**	**548.968,9**	**526.798,1**	**459.223,5**	**454.908,5**	**442.052,5**	**431.466,3**	**453.827,9**	**299.125,0**	**292.483,1**
Emisiones MP EURO III Ton	77	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	3.502	927	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	6	6	6	5	2	2	2	2	2	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	372	372	372	310	166	164	164	164	164	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	50	50	50	50	50	50	40	32	26	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	8	12	13	14	15	15	16	20	21	22
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	2.340.616	13.042.938	4.978.978	1.352.264	2.601.144	487.973	1.219.932	1.104.142	5.367.703	1.654.146	1.662.416
Inversión Bus Gas Natural	0	11.956.027	4.564.063	1.239.575	2.384.382	447.309	1.118.271	1.012.130	4.920.394	1.516.300	1.523.882
Costo Operación EURO III	4.124.412	1.133.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	1.328.403	1.379.336	1.395.383	1.201.469	670.373	683.434	709.564	734.449	753.085	0	0
Costo Operación EURO VI	772.062	801.664	810.991	835.944	873.371	900.970	751.153	618.037	523.646	0	0
Costo Operación eléctrico	136.743	512.439	611.441	655.483	695.421	703.743	701.547	742.929	906.315	920.967	818.612
Costo Operación Gas Natural	0	695.620	965.625	1.059.623	1.231.716	1.301.688	1.399.813	1.476.248	1.834.382	1.946.038	2.060.803
Costo de Mantenimiento EURO III	1.561.735	413.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	503.008	503.008	503.008	420.178	224.396	221.760	221.760	221.760	221.760	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	280.871	223.266	184.487	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	235.299	890.893	1.141.157	1.209.128	1.339.873	1.364.400	1.425.719	1.481.218	1.751.022	1.716.517	1.682.428
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	1.073.690	1.483.557	1.594.875	1.809.000	1.849.170	1.949.594	2.040.487	2.482.354	2.618.523	2.755.372
Costo Social CO2 UF/tonCO2	832.039	547.355	451.801	433.555	377.941	374.390	363.809	355.097	373.500	246.180	240.714
Costo Social MP Total 3 tecnologías	16.119.432	5.173.685	1.159.291	985.660	559.462	557.419	554.127	551.765	555.710	32.910	34.783
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	21.158.290	7.423.335	2.389.508	2.070.900	1.285.174	1.283.715	1.239.911	1.203.941	1.198.361	118.642	125.394
Total Costos UF	**49.461.810,2**	**45.896.776,5**	**20.804.576,6**	**13.408.426,2**	**14.402.023,0**	**10.525.741,6**	**11.936.073,6**	**11.765.470,3**	**21.072.718,6**	**10.770.221,9**	**10.904.404,5**
Costos Totales para VAN	-49.461.810,2	-45.896.776,5	-20.804.576,6	-13.408.426,2	-14.402.023,0	-10.525.741,6	-11.936.073,6	-11.765.470,3	-21.072.718,6	-10.770.221,9	-10.904.404,5

Tabla 39. Escenario mix de buses eléctricos y gas natural en la misma proporción, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia.

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Número de buses nuevos	**3.275**	**1.327**	**452**	**755**	**246**	**425**	**399**	**1.432**	**536**	**540**
Buses Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buses eléctricos	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Buses CNG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de buses dados de baja	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402	
Total Buses Transantiago	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
% Diesel	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
% eléctricos	70 %	78 %	80 %	84 %	85 %	87 %	88 %	96 %	98 %	100 %
% CNG	30 %	22 %	20 %	16 %	15 %	13 %	12 %	4 %	2 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo										
Total Diésel EURO V valor fijo										
Total Diesel EURO VI valor fijo										
Total eléctricos valor fijo	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Total Diesel EURO VI										
Total eléctricos	2.470	5.143	6.307	6.444	7.140	7.239	7.530	7.280	8.512	8.847
Total CNG	2.470	1.868	1.705	1.390	1.331	1.184	1.050	401	201	0
TOTAL	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
Distacia total recorrida km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	517.050.000	582.300.000	608.265.000	647.910.000	664.740.000	689.715.000	713.610.000	784.080.000	814.320.000	844.830.000
Distancia recorrida Gas Natural km	222.300.000	168.120.000	153.405.000	125.100.000	119.790.000	106.515.000	94.500.000	36.090.000	18.090.000	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0226	0,0230	0,0233	0,0237	0,0241	0,0244	0,0246	0,0249	0,0251	0,0254
Precio Electricidad UF/kWh	0,001422302	0,001417651	0,001446446	0,001466397	0,001471989	0,001509209	0,001522848	0,001533003	0,001548352	0,001563689
Precio CNG UF/Lt	0,0195	0,0199	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207	0,0208	0,0209	0,0210	0,0213
Población Provincia de stgo	8.401.681	8.434.167	8.464.212	8.491.848	8.517.094	8.885.316	8.967.566	9.049.815	9.132.064	9.214.313
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00013	0,00012	0,00010	0,00010	0,00009	0,00008
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	123.874,9	130.181,4	136.896,0	141.283,4	133.245,5	123.474,8	108.595,5	116.427,1	116.943,4	108.990,3
Emisiones CO2 gas natural ton	113.558,6	85.881,6	78.364,6	63.905,5	61.192,9	54.411,6	48.273,9	18.436,0	9.241,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**237.433,5**	**216.063,0**	**215.260,6**	**205.188,8**	**194.438,5**	**177.886,4**	**156.869,4**	**134.863,1**	**126.184,4**	**108.990,3**
Emisiones MP EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	13	10	9	7	7	6	6	2	1	0
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	27.086.634	10.975.256	3.738.369	6.244.400	2.034.599	3.515.059	3.300.020	11.843.683	4.433.110	4.466.193
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación eléctrico	1.117.810	1.254.757	1.337.331	1.444.142	1.487.305	1.582.205	1.651.813	1.827.036	1.916.498	2.007.998
Costo Operación Gas Natural	1.257.546	969.843	891.768	736.360	710.565	639.512	570.690	219.030	110.074	0
Costo de Mantenimiento EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	2.388.324	2.689.723	2.809.659	2.992.784	3.070.524	3.185.887	3.296.261	3.621.772	3.761.455	3.902.384
Costo de Mantenimiento Gas Natural	1.681.683	1.271.815	1.160.497	946.372	906.202	805.778	714.885	273.018	136.849	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	195.408	177.820	177.159	168.870	160.023	146.400	129.104	110.992	103.850	89.699
Costo Social MP Total 3 tecnologías	21.317	16.184	14.820	12.125	11.645	10.802	9.672	3.728	1.886	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	76.850	58.344	53.427	43.712	41.981	38.942	34.869	13.439	6.797	0
Total Costos UF	**33.825.571,9**	**17.413.742,2**	**10.183.030,4**	**12.588.765,1**	**8.422.843,7**	**9.924.586,2**	**9.707.316,0**	**17.912.697,2**	**10.470.519,3**	**10.466.274,5**
Costos Totales para VAN	-33.825.571,9	-17.413.742,2	-10.183.030,4	-12.588.765,1	-8.422.843,7	-9.924.586,2	-9.707.316,0	-17.912.697,2	-10.470.519,3	-10.466.274,5

Tabla 40. Continuación escenario mix eléctricos y gas natural en la misma proporción. Fuente: Elaboración propia.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Número de buses nuevos	**283**	**3.154**	**1.204**	**327**	**629**	**118**	**295**	**267**	**1.298**	**400**	**402**
Buses Diesel											0
Buses eléctricos	283						295	267	1.298	400	402
Buses CNG		3.154	1.204	327	629	118					
Número de buses dados de baja	3.050	1.098	220	520	7	183	153	1.182	283	283	3.154
Total Buses Transantiago	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**7.858**	**7.975**	**8.094**
% Diesel	92%	47%	32%	28%	21%	20%	18%	15%	12%	0%	0%
% eléctricos	8%	8%	8%	8%	8%	8%	11%	15%	27%	32%	33%
% CNG	0%	45%	61%	64%	72%	72%	71%	70%	61%	68%	67%
Total Diésel EURO III valor fijo	4148	1098									
Total Diésel EURO V valor fijo	1336	1336	1336	1116	596	589	589	589	589		
Total Diesel EURO VI valor fijo	929	929	929	929	929	929	746	593	490		
Total eléctricos valor fijo	566	566	566	566	566	566	566	566	566	283	
Total Diesel EURO VI											
Total eléctricos							295	562	1.860	2.260	2.662
Total CNG		3.154	4.358	4.685	5.314	5.432	5.432	5.432	5.432	5.432	5.432
TOTAL	**6.979**	**7.083**	**7.189**	**7.296**	**7.405**	**7.516**	**7.628**	**7.742**	**8.937**	**7.975**	**8.094**
Distacia total recorrida km	628.110.000	637.470.000	647.010.000	656.640.000	666.450.000	676.440.000	686.520.000	696.780.000	707.220.000	717.750.000	728.460.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	373.320.000	98.820.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	120.240.000	120.240.000	120.240.000	100.440.000	53.640.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	53.010.000	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	83.610.000	67.140.000	53.370.000	44.100.000	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	50.940.000	77.490.000	101.520.000	218.340.000	228.870.000	239.580.000
Distancia recorrida Gas Natural km	0	283.860.000	392.220.000	421.650.000	478.260.000	488.880.000	488.880.000	488.880.000	488.880.000	488.880.000	488.880.000
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0165	0,0171	0,0173	0,0179	0,0187	0,0192	0,0200	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222
Precio Electricidad UF/kWh	0,001766045	0,001747968	0,001628268	0,001647428	0,001577253	0,001567435	0,001495341	0,001524212	0,001572912	0,001630471	0,001478628
Precio CNG UF/Lt	0,0168	0,0169	0,0170	0,0173	0,0178	0,0184	0,0187	0,0189	0,0193	0,0194	0,0195
Población Provincia de stgo	7.824.882	7.937.816	8.003.744	8.058.416	8.109.367	8.157.984	8.204.472	8.248.732	8.290.644	8.330.060	8.366.926
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00033	0,00030	0,00031	0,00030	0,00027	0,00026	0,00025	0,00025	0,00022	0,00022	0,00019
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	652.825	172.807	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	210.264	210.264	210.264	175.639	93.800	92.699	92.699	92.699	92.699	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	122.204,4	98.131,8	78.005,6	64.456,6	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	25.690,1	23.056,2	23.984,6	23.597,0	21.260,2	19.856,0	30.019,5	38.932,2	74.327,8	75.325,9	70.001,1
Emisiones CO2 gas natural ton	0,0	145.005,6	200.359,7	215.393,6	244.311,9	249.737,0	249.737,0	249.737,0	249.737,0	249.737,0	249.737,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**1.010.982,9**	**673.336,4**	**556.812,3**	**536.834,3**	**481.576,8**	**484.496,0**	**470.586,9**	**459.373,4**	**481.220,0**	**325.062,9**	**319.738,1**
Emisiones MP EURO III Ton	77	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	3.502	927	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	6	6	6	5	2	2	2	2	2	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	372	372	372	310	166	164	164	164	164	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	50	50	50	50	50	50	40	32	26	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	0	17	23	25	29	29	29	29	29	29	29
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	2.340.616	0	0	0	0	0	2.439.865	2.208.284	10.735.405	3.308.291	3.324.833
Inversión Bus Gas Natural	0	23.912.053	9.128.127	2.479.151	4.768.764	894.617	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	4.124.412	1.133.616	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	1.328.403	1.379.336	1.395.383	1.201.469	670.373	683.434	709.564	734.449	753.085	0	0
Costo Operación EURO VI	772.062	801.664	810.991	835.944	873.371	900.970	751.153	618.037	523.646	0	0
Costo Operación eléctrico	136.743	135.343	126.075	127.558	122.125	121.365	176.128	235.202	522.013	567.212	538.460
Costo Operación Gas Natural	0	1.391.239	1.931.250	2.119.247	2.463.432	2.603.376	2.655.417	2.675.668	2.732.958	2.748.539	2.766.069
Costo de Mantenimiento EURO III	1.561.735	413.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	503.008	503.008	503.008	420.178	224.396	221.760	221.760	221.760	221.760	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	349.771	280.871	223.266	184.487	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	235.299	357.937	468.935	1.008.542	1.057.182	1.106.653
Costo de Mantenimiento Gas Natural	0	2.147.379	2.967.115	3.189.750	3.618.001	3.698.340	3.698.340	3.698.340	3.698.340	3.698.340	3.698.340
Costo Social CO2 UF/tonCO2	832.039	554.156	458.257	441.815	396.338	398.740	387.293	378.064	396.044	267.527	263.144
Costo Social MP Total 3 tecnologías	16.119.432	5.186.543	1.177.206	1.005.051	581.595	580.179	575.773	572.398	570.920	46.481	46.686
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	21.158.290	7.469.692	2.454.093	2.140.805	1.364.965	1.365.768	1.317.950	1.278.323	1.253.195	167.567	168.308
Total Costos UF	**49.461.810,2**	**45.612.501,0**	**21.536.574,0**	**14.546.037,5**	**15.668.429,2**	**12.053.618,7**	**13.572.051,7**	**13.312.726,6**	**22.600.395,3**	**11.861.137,9**	**11.912.493,4**
Costos Totales para VAN	-49.461.810,2	-45.612.501,0	-21.536.574,0	-14.546.037,5	-15.668.429,2	-12.053.618,7	-13.572.051,7	-13.312.726,6	-22.600.395,3	-11.861.137,9	-11.912.493,4

Tabla 41. Escenario mix de buses de gas natural hasta el año 2025 y eléctricos de 2025 a 2040, sección hasta 2030. Fuente: Elaboración propia

	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Número de buses nuevos	**3.275**	**1.327**	**452**	**755**	**246**	**425**	**399**	**1.432**	**536**	**540**
Buses Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buses eléctricos	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Buses CNG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de buses dados de baja	1.204	327	629	118	295	267	1.298	400	402	
Total Buses Transantiago	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
% Diesel	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
% eléctricos	72 %	87 %	91 %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
% CNG	28 %	13 %	9 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Total Diésel EURO III valor fijo										
Total Diésel EURO V valor fijo										
Total Diesel EURO VI valor fijo										
Total eléctricos valor fijo	3.275	1.327	452	755	246	425	399	1.432	536	540
Total Diesel EURO VI										
Total eléctricos	2.662	5.937	7.264	7.716	8.471	8.422	8.580	7.681	8.713	8.847
Total CNG	2.278	1.074	747	118	0	0	0	0	0	0
TOTAL	**8.215**	**8.338**	**8.463**	**8.589**	**8.717**	**8.847**	**8.979**	**9.113**	**9.249**	**9.387**
Distacia total recorrida km	739.350.000	750.420.000	761.670.000	773.010.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Diesel EURO III km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO V km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida Diesel EURO VI km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distancia recorrida eléctrico km	534.330.000	653.760.000	694.440.000	762.390.000	784.530.000	796.230.000	808.110.000	820.170.000	832.410.000	844.830.000
Distancia recorrida Gas Natural km	205.020.000	96.660.000	67.230.000	10.620.000	0	0	0	0	0	0
Consumo EURO III lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO V lt/km	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Consumo EURO VI lt/km	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Consumo eléctrico kWh/km	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Consumo Gas Natural lt/km	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Precio Diesel UF/Lt	0,0226	0,0230	0,0233	0,0237	0,0241	0,0244	0,0246	0,0249	0,0251	0,0254
Precio Electricidad UF/kWh	0,001422302	0,001417651	0,001446446	0,001466397	0,001471989	0,001509209	0,001522848	0,001533003	0,001548352	0,001563689
Precio CNG UF/Lt	0,0195	0,0199	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207	0,0208	0,0209	0,0210	0,0213
Población Provincia de stgo	8.401.681	8.434.167	8.464.212	8.491.848	8.517.094	8.885.316	8.967.566	9.049.815	9.132.064	9.214.313
Factor de Emisión Diesel tonCO2/lt	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261	0,00261
Factor de Emisión eléctrico tonCO2/kWh	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00013	0,00012	0,00010	0,00010	0,00009	0,00008
Factor emisión gas tonCO2/lt	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615	0,0017615
Emisiones CO2 EURO III ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO V ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones CO2 EURO VI ton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 eléctrico ton	128.014,8	146.157,3	156.290,5	166.246,9	157.257,2	142.543,4	122.976,3	121.786,0	119.541,2	108.990,3
Emisiones CO2 gas natural ton	104.731,4	49.377,3	34.343,4	5.425,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emisiones CO2 Total toneladas	**232.746,2**	**195.534,6**	**190.633,9**	**171.672,0**	**157.257,2**	**142.543,4**	**122.976,3**	**121.786,0**	**119.541,2**	**108.990,3**
Emisiones MP EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO III Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO V Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX EURO VI Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOX Eléctrico Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones MP Gas Natural Ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisiones NOx Gas Natural Ton	12	6	4	1	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Bus Eléctrico	27.086.634	10.975.256	3.738.369	6.244.400	2.034.599	3.515.059	3.300.020	11.843.683	4.433.110	4.466.193
Inversión Bus Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Operación eléctrico	1.155.167	1.408.741	1.526.795	1.699.309	1.755.325	1.826.550	1.870.555	1.911.131	1.959.073	2.007.998
Costo Operación Gas Natural	1.159.794	557.608	390.819	62.511	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo de Mantenimiento Eléctrico	2.468.143	3.019.806	3.207.713	3.521.583	3.623.851	3.677.894	3.732.770	3.788.477	3.845.015	3.902.384
Costo de Mantenimiento Gas Natural	1.550.961	731.226	508.590	80.339	0	0	0	0	0	0
Costo Social CO2 UF/tonCO2	191.550	160.925	156.892	141.286	129.423	117.313	101.210	100.230	98.382	89.699
Costo Social MP Total 3 tecnologías	19.660	9.305	6.495	1.029	0	0	0	0	0	0
Costo Social Nox Total 3 tecnologías	70.876	33.545	23.415	3.711	0	0	0	0	0	0
Total Costos UF	**33.702.785,2**	**16.896.411,8**	**9.559.086,4**	**11.754.168,6**	**7.543.197,7**	**9.136.816,8**	**9.004.555,0**	**17.643.520,4**	**10.335.580,0**	**10.466.274,5**
Costos Totales para VAN	-33.702.785,2	-16.896.411,8	-9.559.086,4	-11.754.168,6	-7.543.197,7	-9.136.816,8	-9.004.555,0	-17.643.520,4	-10.335.580,0	-10.466.274,5

Tabla 42. Continuación escenario mix de buses de gas natural hasta el año 2025 y eléctricos de 2025 a 2040. Fuente: Elaboración propia