



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

*RECOMENDACIONES PARA LA INTRODUCCIÓN
PROGRESIVA DE LA TECNOLOGÍA DE PROPULSIÓN
ELÉCTRICA EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE
SANTIAGO DE CHILE*

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

JAVIER IGNACIO MUJICA CARVAJAL

PROFESOR GUÍA:

LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO

ÓSCAR SAAVEDRA ALLENDES

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
POR: JAVIER MUJICA CARVAJAL
FECHA: 21/12/2013**

La contaminación atmosférica de Santiago atenta contra la salud de la población y deteriora la calidad de vida de sus habitantes. El transporte urbano es una fuente de contaminación importante. Reemplazar parte de los buses a propulsión convencional por buses a baterías y trolebuses eléctricos reduciría la contaminación. La movilidad eléctrica, bajo ciertas condiciones de operación es la mejor alternativa económica y ambiental. El costo de los buses eléctricos es mayor que los convencionales, pero es compensado al tener una mayor vida útil, y presentar menores costos de operación y mantención. El Centro Mario Molina Chile (CMMCh) en conjunto con Chilectra desarrollaron un primer escenario de penetración de movilidad eléctrica para el transporte público incluyendo todos aquellos circuitos de buses en los cuales es factible incorporar estas tecnologías.

El objetivo del estudio consistió en determinar en qué circuitos de *Transantiago* existe factibilidad de incorporación de buses y trolebuses eléctricos, comparar los costos entre un escenario base de recambio de flota a buses Euro V con los costos de la propuesta a un horizonte de 20 años, determinar la reducción de contaminantes y generar recomendaciones a nivel técnico, contractual y político que faciliten la innovación tecnológica.

Por medio de un modelo de costos desarrollado por la Universidad de Duke, EEUU, se utilizó la aplicación TSANT del programa AIRVIRO (sistema de información climático) y realizando entrevistas a expertos se concluyó que existe factibilidad técnica para incorporar tecnología eléctrica cercana a un 35% de la flota de *Transantiago*, teniendo un ahorro en costos de entre un 5,3% y 12,1% tomando una evaluación a 20 años, y reduciendo alrededor de un 30% los niveles de contaminantes a un horizonte al 2020. Se llegó a la conclusión de que es factible la introducción de buses eléctricos y que este proceso se vería facilitado con una renovación de la orgánica institucional que permita coordinar a los diversos actores, reestructurar los contratos de concesión de las flotas de modo que permitan transmitir los beneficios económicos y ambientales de operar con movilidad eléctrica y generar mecanismos que gestionen la incertidumbre de la duración de la vida útil de las baterías de los buses eléctricos.

Actualmente el Directorio de Transporte Público Metropolitano se asesora con el CMMCh para formular las bases de la próxima licitación de buses del *Transantiago* de modo que permita la introducción de entre 60 y 100 buses eléctricos para algunos servicios del transporte público al año 2018.

DEDICATORIA

A todo cuanto nos precede, este trabajo va alineado a todo lo que debe ir construyéndose para la existencia de la vida a largo plazo, en todo orden de dimensiones, sustentabilidad, las siguientes generaciones, las diferentes especies, la evolución de la vida, la sanación de la sociedad, del planeta, su ecosistema y equilibrio dinámico. Y con ello, va dirigido a todos los espacios de creación y alimentación de una humanidad que se compenetra con su naturaleza terrenal, se hace tierra y viento, un ser humano que se siente tan natural como sus genes quieren ser, todo se unifica.

Albert Einstein decía “Sólo dos cosas son infinitas, el universo y la estupidez humana... y no estoy seguro de lo primero” hemos sido el primer animal en desarrollar la inteligencia, pero recién comenzamos a aprender a utilizarla.



AGRADECIMIENTOS

De principio a fin, el camino hecho ha estado acompañado de muchas personas. La primera que recuerdo es a María Angélica Gatica y su mensaje que nos trajo al llegar de su práctica en Singapur, acerca de lo fundamental que es invertir el tiempo de nuestra vida en un trabajo que realmente nos apasione. Siguiendo un orden cronológico, fueron claves los comentarios, cuestionamientos y contactos de los miembros de la comisión para orientar la búsqueda de un tema a tratar. Me tomó tiempo dar con el tema, agradezco a Ana María Pereira, que tuvo toda la disposición de contactarme con el Ministerio del Medio Ambiente, a Guillermo Jiménez que me dio la posibilidad de estudiar sobre los mecanismos de financiamiento de micro-redes rurales, a Alfredo Olivares que me conversó sobre los temas que se tratan en el Centro de Energía Renovable del Gobierno, a Álvaro Henríquez por abrirme la posibilidad de desarrollar un tema con ciclovías en Antofagasta, A Gonzalo León del Área de Sustentabilidad de Fundación Chile, por su entusiasmo y acogida en la reunión en que se barajaron diferentes temas de mi interés.

Todas estas vueltas culminaron gracias a Pedro Paiva (compañero beauchefiano de mi papá), quien ubicaba a Gianni López, que dirige el CMMCh junto a Pedro Oyola, empresa de la cual estoy feliz de haber conocido, tanto por su misión, como por el equipo humano que lo compone, porque además de brindarme todo el apoyo en términos de espacio, recursos e información; ha sido un regalo la acogida que me dieron, compartiendo más allá del horario de oficina y conociendo las grandes personas que son. Gracias Sergio Soler, Yeanice Vázquez, Marcela Castillo, Cristina Valverde, Gianni López, Pedro Oyola, Felipe Reyes, Rodrigo Donoso, Juan Pablo Moraga y Gabriela Lizama.

Mi familia, mi ancla siempre ahí apoyando con todo, en especial a mi madre por hacer que llegar al hogar sea un espacio acogedor y revitalizante, preocupándose de abastecernos de comida, mantener todo en orden y hasta lavar mi ropa. A mi padre, que influyó en que le tomara mayor importancia a este ritual de cierre que concluye mis estudios en Beauchef, a sus Flores de Bach, a todas sus críticas que me han apuntalado y desafiado a ser una mejor persona constantemente. A mi hermana por amarme como soy, olvidar lo malo y valorar lo bueno. Cuando hay tanta gente que te ama tanto, la vida cobra un color que inspira e invita a salir a entregar lo mejor de uno mismo.

Finalmente llegando a la profundidad del ser. Quiero agradecer a la Biodanza, a quien me la presentó, Carolina Paz Quezada; a quien la creó, Rolando Toro. Por hacer de mi vida un motivo para celebrar la existencia y servir desde esa cosmovisión.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DE LA MEMORIA	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.1.1 CAMBIO CLIMÁTICO, UN PROBLEMA GLOBAL.....	1
1.1.2 CIUDADES.....	3
1.1.3 ESTADO DE CALIDAD DEL AIRE EN LA REGIÓN METROPOLITANA	3
1.1.4 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN SANTIAGO Y PROBLEMÁTICAS ACTUALES.	5
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN.....	9
1.2.1 BUS PILOTO	12
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14

1.4	ALCANCES	15
1.5	RESULTADOS OBTENIDOS.....	16
2.	METODOLOGÍA.....	17
2.1	MARCO CONCEPTUAL	18
2.1.1	Energía.....	18
2.1.2	Baterías de Litio Fierro.....	19
2.1.3	Emisiones	19
3.	CONTAMINACIÓN DE LAS CIUDADES Y EL PROCESO HISTORICO DE DESCONTAMINACIÓN DE SANTIAGO	21
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS DE TRANSPORTE	27
5.1	NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TRANSPORTE.....	29
5.2	PROGRAMA DE C40 CITIES CLINTON CLIMATE INITIATIVE	31
5.	POSIBLE ESCENARIO DE MOBILIDAD ELÉCTRICA PARA SANTIAGO DE CHILE.....	40
5.1	TECNOLOGÍAS	40
5.2	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR RECORRIDOS APTOS PARA LA MOBILIDAD ELÉCTRICA	41
5.3	BEST BUS MODEL	42
5.4	FUENTE DE LOS DATOS.....	44
5.5	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	46
5.5.1	COSTOS DE CAPITAL.....	47
5.5.2	COSTOS DE OPERACIÓN.....	48
5.5.3	DATOS DE OPERACIÓN.....	48

5.6 RESULTADOS	50
5.6.1 FLOTA TIPO	54
5.6.2 FLOTA DEL ESCENARIO COMPLETO	56
5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SÉNSIBILIDAD	57
6. ANÁLISIS SISTÉMICO PARA LA GESTIÓN DE INCERTIDUMBRES Y RECOMNDACIONES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.....	62
6.1 AJUSTES NECESARIOS, SALVEDADES E INCERTIDUMBRES	63
6.1.1 DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGÍA.....	63
6.1.2 FACTIBILIDAD TÉCNICA.....	64
6.1.3 TASAS	66
6.2 TÉRMINOS CONTRACTUALES	67
6.3 FACTIBILIDAD POLÍTICA.....	69
6.4 RESUMEN E INTERVENCIONES CLAVES A REALIZAR.....	72
7. CONCLUSIONES.....	74
7.1 EMISIONES.....	74
7.2 AHORRO EN COSTOS E INGRESOS ADICIONALES.....	74
7.3 INTERVENCIONES CLAVE	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXOS.....	79
1. DISTRIBUCIÓN DE OPERADORES DE BUSES DEL TRANSANTIAGO (AÑO 2012)	79
2. ESTRUCTURA DE CÁLCULO DEL MODELO “BEST BUS”	80
3. “E-BUS” ESTRUCTURA DE CÁLCULO DE LA ADAPTACIÓN DEL MODELO “BEST BUS”.....	81

4. TEST DE CICLO DE RECARGA TECNOLOGÍA <i>ELECTROMOTION</i> (BATERÍAS LITIO FOSFATO DE FIERRO)	82
5. CUENCA REGIÓN METROPOLITANA.....	83
6. DIMENSIONES DE MATERIAL PARTICULADO Y EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN CHILENA.	84
7. MONITOREO DE CONTAMINANTES NORMADOS POR ESTACIONES AIRVIRO (EDB SANTIAGO REAL TIME).....	85
8. MODELOS DE CADA TECNOLOGÍA	91
9. ESTRUCTURA DE POBLAMIENTO DE DATOS DE OPERACIÓN DE TRANSANTIAGO EN TSANT Y SU INTEGRACIÓN CON AIRVIRO.....	94
10. DIAGRAMA RELACIONES ENTRE VARIABLES DEL NEGOCIO EN EL MARCO DEL CONTRATO DE CONCESIÓN	95
11. BUS RAPID TRANSIT (BRT)	96
12. Flujo de Caja de Alternativas	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fuentes de MP10 en la Región Metropolitana	4
Tabla 2: Distribución Tecnológica Flota Transantiago	5
Tabla 3: Normas Vigentes 2013	24
Tabla 4: Síntesis Aspectos Clave Entre Tecnologías	38
Tabla 5: Adaptación del modelo “Best Bus Model”	44
Tabla 6: Servicios de Trolebús	50
Tabla 7: Plan Maestro de Corredores 2020	52
Tabla 8: Buses Eléctricos	52
Tabla 9: Ahorro por Bus a un Horizonte de 20 años.....	56
Tabla 10: Análisis de Sensibilidad	58
Tabla 11: Reducción de CO ₂ e.....	59
Tabla 12: Variación de Tasas	67
Tabla 13: Vida Útil Buses por Tecnología	68
Tabla 14: Ahorro de Costos Totales	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Temperatura, Niveles y Emisiones de CO ₂ en los Últimos 1000 Años	2
Gráfico 2: Comparativa Bus Euro III con BYD K9	13
Gráfico 5: Evolución de Contaminantes Normados (1997-2012)	25
Gráfico 6: Evolución de MP _{2,5} 1989-2010	26
Gráfico 7: Eficiencia Entre Tecnologías Proyección 2035 (MIT)	29
Gráfico 8: Reducción de Emisiones	31
Gráfico 9: Reducción de Emisiones Buses Híbridos.....	33
Gráfico 10: Eficiencia Energética [Energía/Distancia]	34
Gráfico 11: Eficiencia Energética por Pasajero [Energía/Distancia-Pasajero]	35
Gráfico 12: Ciclo de Costo Total Bogotá (10 años)	35
Gráfico 13: Ciclo de Costo Total Sao Paulo (10 años).....	36
Gráfico 14: Ciclo de Costo Total Rio de Janeiro (10 años)	37
Gráfico 15: Precios de Buses.....	47
Gráfico 16: Eficiencia Energética [energía/distancia].....	49
Gráfico 17: Composición de Flota 2020	54
Gráfico 18: Costo Ciclo de Vida Total	55
Gráfico 19: Costo Ciclo de Vida Total sin Considerar Catenaria	56
Gráfico 20: Costo Total Sistema de Transporte	57
Gráfico 21: Sensibilidad para la Duración de la Batería	59
Gráfico 22: Reducción de NO _x	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Actores Públicos	7
Figura 2: Normas de Emisiones 2000-2030	11
Figura 3: Bus Eléctrico Piloto BYD K9	12
Figura 4: Curva de Abatimiento	28
Figura 5: Metodología	42
Figura 6: Red de Trolebuses.....	51
Figura 7: Red Buses Eléctricos.....	53
Figura 8: Reducción de Material Particulado.....	60
Figura 9: Bus Diésel Volvo B7R.....	91

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El elaborar una serie de recomendaciones para facilitar el proceso de innovación tecnológica requiere contextualizar sobre la necesidad de contribuir al desarrollo de tecnologías limpias como además otorgar una comprensión sistémica de los actores involucrados y sus principales intereses.

1.1.1 CAMBIO CLIMÁTICO, UN PROBLEMA GLOBAL

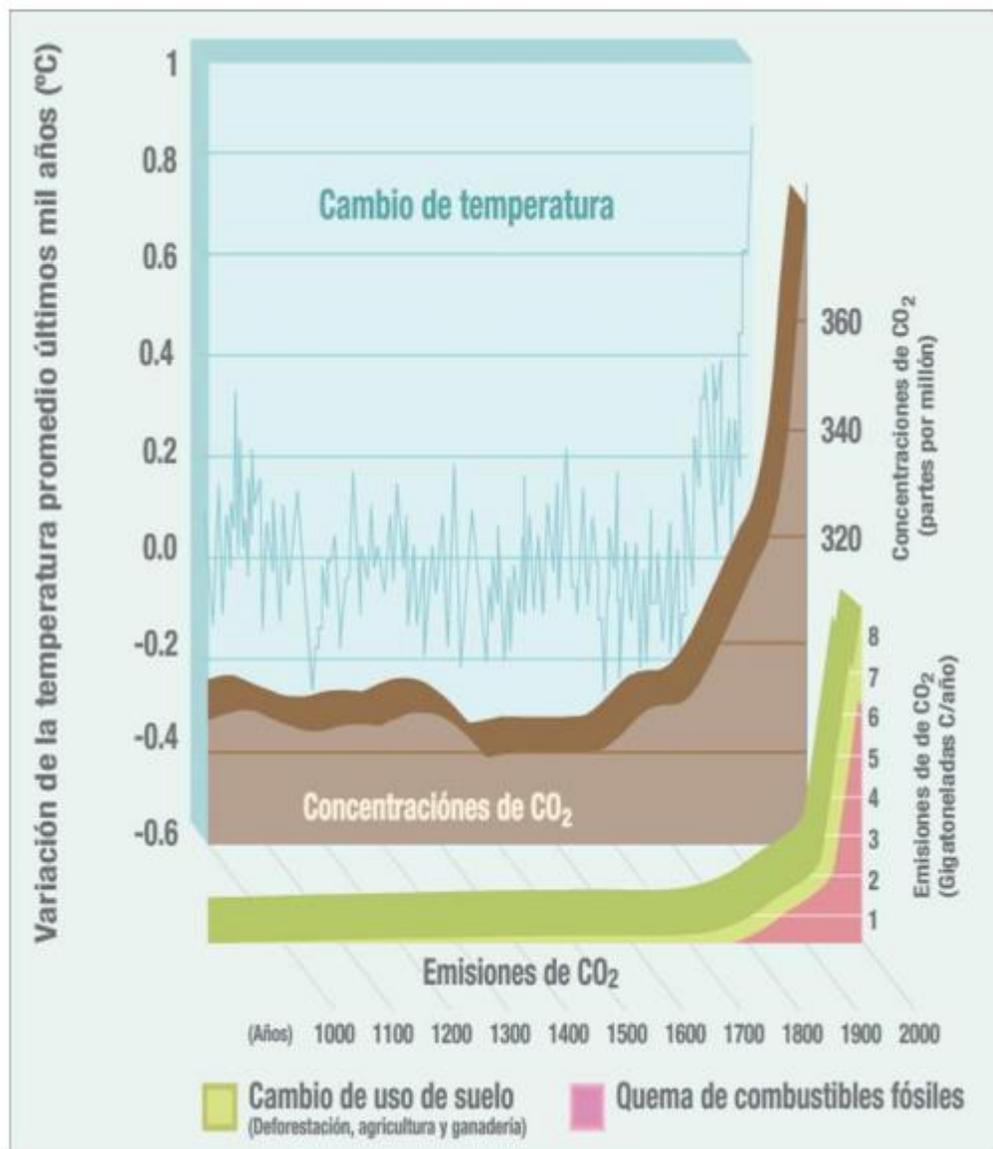
[1] Antes de definir cambio climático es importante definir qué es el clima. El promedio de “estado del tiempo” durante un periodo largo para un lugar determinado es lo que conocemos como clima, y algunas variables que lo describen son la temperatura, la humedad, la lluvia, la cobertura de nubes y las trayectorias del viento.

El clima terrestre siempre ha estado cambiando, la estabilidad de los últimos 10.000 años permitió el desarrollo de la civilización. Sin embargo en el último siglo el sistema climático ha experimentado cambios considerables. En el pasado han existido grandes transformaciones que tomaron decenas de miles de años en ocurrir. Recientemente la temperatura de la superficie de la tierra, la distribución de las precipitaciones, han cambiado aceleradamente, al grado que se observan cambios en periodos de décadas; éste este fenómeno se denomina “cambio climático”

Un tercio de la energía del sol es reflejada hacia el espacio, los dos tercios de la energía restante es absorbida por la tierra y los océanos. La tierra por ende se calienta pero la energía no se acumula sino que se vuelve a emitir en forma de radiación infrarroja logrando así un equilibrio energético. Hay ciertos gases en la atmósfera que impiden que la radiación infrarroja escape de la atmósfera produciendo que el equilibrio térmico se produzca a mayor temperatura. Los principales gases efecto invernadero son (GEI) el vapor de agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂). También existe el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O)

Durante cientos de miles de años la presencia de estos gases en la atmósfera se ha mantenido estable. No obstante, desde la revolución industrial el hombre comenzó a utilizar combustibles fósiles y las concentraciones de CO₂ y CH₄ han aumentado a niveles que no habían existido en medio millón de años. Vale decir, la actividad humana ha modificado significativamente la composición química de la atmósfera.

Gráfico 1: Temperatura, Niveles y Emisiones de CO₂ en los Últimos 1000 Años



Fuente: [1]

En septiembre de 2013 se publicó el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC por sus siglas en inglés) en este se muestra que “La amplia gama de pruebas que recoge el informe del IPCC confirma que los fenómenos meteorológicos extremos ya ocurren con mayor frecuencia y que las temperaturas de la Tierra subirán de acuerdo con los diversos escenarios entre 1,5 y 4 [°C] hasta finales de este siglo. Los expertos cifran entre un 90 % y un 95 % el porcentaje de probabilidad de que el principal responsable del calentamiento sea el ser humano.” [2]

1.1.2 CIUDADES

Además de la problemática asociada a la estabilidad global climática, las ciudades se ven enfrentadas a más desafíos. No sólo deben controlarse los niveles de GEI, además se debe poner foco en el material particulado que consiste básicamente en cúmulos de SO₂, NO_x y Amoníacos, de un diámetro tal que siendo lo suficientemente pequeños puede entrar al sistema respiratorio y afectar directamente la salud de la población.

Las ciudades que presenta una geografía en que se ve obstaculizado el viento, y tienen menor ventilación son más propensas a acumular este tipo de contaminantes. Las principales fuentes de estas partículas son la industria, el transporte, emisiones residenciales y otras como desechos orgánicos y agricultura.

1.1.3 ESTADO DE CALIDAD DEL AIRE EN LA REGIÓN METROPOLITANA

Actualmente Santiago es declarada zona saturada por material particulado (MP₁₀) y material particulado fino (MP_{2,5}). Esto quiere decir, que los niveles máximos estipulados por la norma primaria de calidad ambiental¹ están sobrepasados.

¹ “Aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”. Artículo 2°, letra n, ley 19.300. en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”. Artículo 2°, letra n, ley 19.300.

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA) 2009 señala que las principales fuentes de MP₁₀ son las siguientes:

Tabla 1: Fuentes de MP10 en la Región Metropolitana

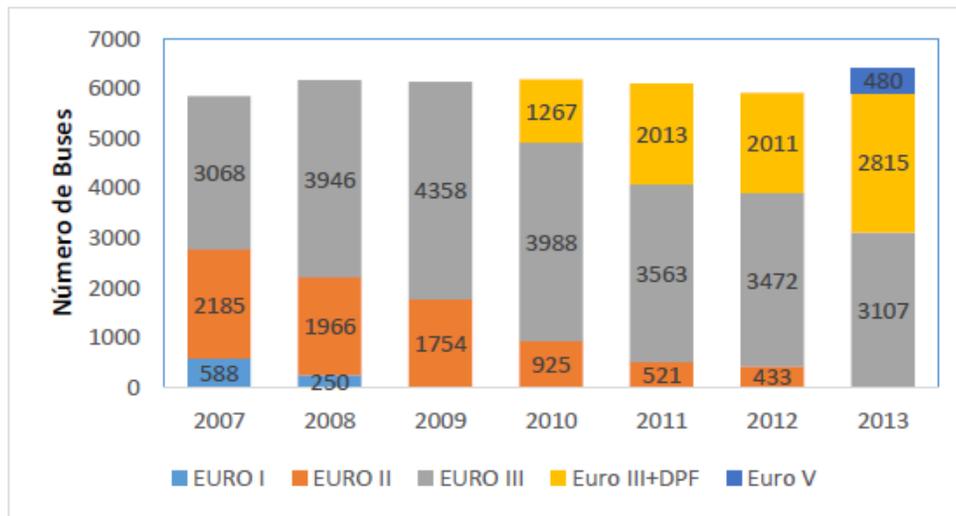
Fuente	Participación
Buses	8 %
Camiones	14 %
Vehículos livianos y comerciales	18 %
Industria	25 %
Residenciales	11 %
Otras fuentes*	24 %
TOTAL	100%

[Fuente: El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana 2009]

No se especifican las fuentes de MP_{2,5} esto se debe a que es más complejo determinar su origen, una porción viene directamente de las fuentes y otra porción se genera en la atmósfera por reacciones químicas que dependen de la radiación, temperatura, humedad, relieve, etc.

Diversas son las medidas que se han implementado para atacar las diversas fuentes. En el sector de transporte el transporte público se ha ido incorporando paulatinamente desde el año 2010 los filtros de partículas (DPF) los cuales tienen una eficiencia cercana al 90% mitigando el material particulado que emiten los buses. Para el 2013 se alcanzó un total de 44% de la flota de *Transantiago*.

Tabla 2: Distribución Tecnológica Flota Transantiago



[Fuente: Propuesta de regulaciones para la reducción de mp2,5, sus precursores y contaminantes que afectan el cambio climático, para las distintas fuentes estacionarias de la región metropolitana, CMMCh, 2013]

1.1.4 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN SANTIAGO Y PROBLEMÁTICAS ACTUALES.

En Santiago el sistema de transporte público de la ciudad de Santiago desde 2007 integra física y tarifariamente a la totalidad de los buses de transporte público urbano de la ciudad, Transantiago, operados por 7 empresas concesionarias, y al Metro de Santiago, a través de un único medio de acceso electrónico (tarjeta bip!) [3]. El Directorio de Transporte Público Metropolitano analizar de forma integral el sistema de transporte público capitalino y vela por la adecuada coordinación de los diferentes modos que participan en el transporte público de la ciudad de Santiago.

De forma paralela están los buses interurbanos, taxis y taxis colectivos que incluyen recorridos a localidades más retiradas dentro del área metropolitana y están administrados por diversas empresas que cumplen con las normativas necesarias para operar como servicio de transporte público de pasajeros. Todos estos servicios de transporte no están integrados al medio de pago electrónico y poseen sus propias tarifas que varían según cada empresa operadora.

La SECTRA (Secretaría de Planificación de Transporte, organismo técnico especializado, responsable del proceso de planificación del sistema de transporte urbano de las ciudades del país²) utiliza para el caso de Santiago las herramientas: ESTRAUS, MUSSA, DIRT y ARTP que permiten analizar el sistema de transporte. Para el análisis de los impactos ambientales se han desarrollado los modelos MODEM y MODEC³.

Es importante señalar que al realizar el proceso de implementación del Transantiago “existieron fallas de origen importantes en el diseño de la política pública que desencadenaron la mala implementación del sistema de transporte” [4] Se pensó que era imprescindible la aparición de empresas privadas que aprovecharan sus economías de escala y que fueran capaces de innovar tecnológicamente, que compitan en las licitaciones y no en las calles, que formalices las relaciones laborales con los conductores.

Sin embargo, introducir este modelo involucró a muchos actores. Como se buscaba una integración del sistema de transporte se creó además el Directorio de Transporte de Santiago (DTMS, actual Directorio de Transporte Público Metropolitano, DTP) el cual resultó insuficiente para realizar una reforma institucional verdaderamente profunda en el sector de transporte urbano dada la “dispersión de funciones que debieran residir en una sola instancia, la superposición de funciones entre diferentes entidades, o la inexistencia de relaciones orgánicas entre entidades que comparten funciones claramente conectadas y que requieren una común planificación parecen ser una realidad insoslayable. Si a esto se suma un modelo de gestión que tiende a una virtual compartimentación entre varias de esas entidades, en que en muchos casos sus autoridades establecen objetivos y metas casi con completa autonomía del resto, pese a la común funcionalidad, se tiene un panorama de una capacidad de intervención pública dispersa y menos eficaz de lo que debiera ser, atendidos los diversos recursos en juego.” [4]

A continuación se muestra un mapa de actores involucrados elaborado por el mismo autor citado anteriormente:

² Extraído de http://www.sectra.gob.cl/Que_es_Sectra/que_es_sectra.html el 24 de enero de 2014

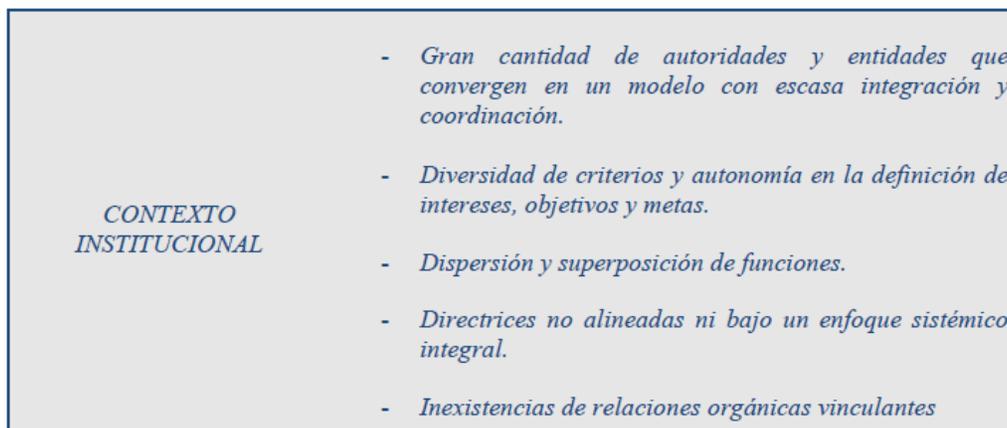
³ Extraído de http://www.sectra.gob.cl/Metodologias_y_Herramientas_de_Transporte/introduccion.html el 24 de enero de 2014

Figura 1: Mapa de Actores Públicos



Fuente: [4]

Finalmente, en el estudio se señala a modo de síntesis el siguiente contexto institucional:



Aterrizando este escenario al caso puntual del presente estudio, en primera instancia se debe tener presente que el contexto institucional no ha sufrido mayores cambios, al preguntar al Gerente de Finanzas Corporativas del DTP, Diego Puga sobre la introducción de nuevas tecnologías señaló que el DTP estaba enfocado en resolver problemas más prioritarios como el cumplimiento de las frecuencias y capacidad necesaria para cubrir la demanda de la ciudad, y la introducción tecnológica sería posible mientras las empresas operarias de buses tomaran la iniciativa de incorporar a sus flotas la tecnología. Lo cual resulta difícil dada la paulatina baja de las utilidades de las empresas de concesión, desde este sector no se está en la posición de tomar ningún tipo de riesgos y por consiguiente sus decisiones serán más conservadoras.

No obstante en Chile se ha realizado promesas a nivel internacional. En la Conferencia de las Partes del 2009 (COP15), con participación de más de 120 países se asumió el compromiso ambiental de reducir las emisiones de CO₂ un 20% para el 2020. Las medidas tomadas hasta la fecha han reducido las emisiones pero la tasa de disminución no es suficiente para alcanzar la meta propuesta.

En síntesis, los temas detrás de este caso particular de cambio tecnológico incluyen: La necesidad de la capital de reducir los niveles de MP, el compromiso de reducción de GEI del gobierno, los costos asumidos de la deficiente implementación del Transantiago, la complejidad del contexto institucional, y la aparente factibilidad técnica y económica.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN

Para afrontar el desafío de la contaminación atmosférica se debe iniciar una serie de medidas de mitigación de los contaminantes, entre las cuales el CMMCh en conjunto con Chilectra S.A. propone una nueva visión para transporte público por medio de una paulatina incorporación de tecnología eléctrica para las flotas de buses del Transantiago, buses a baterías y trolebuses eléctricos. El foco de estudio se centra en la máxima penetración de movilidad eléctrica para el Transantiago, restringida principalmente por la autonomía de los buses eléctricos y el trazado de la catenaria para la operación de trolebuses. Sumando ambas tecnologías se alcanzaría una porción de entre un 25% y un 35% de la flota existente. Para todo el resto se abre otra discusión en la cual toman parte otras tecnologías.

En cuanto a los costos del servicio de transporte es importante señalar que las empresas operadoras de buses han incurrido en altos costos de operación en términos de combustible y mantenimiento de sus flotas. Los últimos años sus rentabilidades han ido bajando y cada vez ha sido mayor el subsidio que deben recibir de parte del fisco. El análisis económico respaldará que los resultados de eficiencia económica de los buses eléctricos aplican también para Chile.

Los operarios de buses del transporte público de Santiago se organizan en 7 unidades de negocio y en su conjunto forman el *Transantiago* (Alsacia, SuBus, Vule, Express, Metropolitana, RedBus y STP), cada uno de ellos se adscribe a un contrato de concesión con el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. Estos tienen una duración determinada, y a partir del año 2016 comienza un paulatino recambio de flotas como se puede ver en la tabla 1.2.1

Tabla 1.2.1

Duración de Contratos de Concesión de Operadores de buses de Transantiago												
Empresa	Unidad	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Alsacia	1											
SuBus	2											
Vule	3											
Express	4											
Metropolitana	5											
Red Bus	6											
STP	7											

[Fuente: Elaboración Propia con datos del CMMCh]

Buscando una visión sistémica de lo que ocurre, los actores que participan o están involucrados con el proceso son:

- Organismos Públicos:
 - Ministerio de Transporte,
 - Directorio de Transporte Metropolitano,
 - Ministerio del Medio Ambiente,
 - Ministerio de Obras Públicas.
- Metro Santiago.
- Actores Comerciales: Proveedores de buses eléctricos, Indumotora BYD, productores de trolebuses eléctricos en Brasil.
- Empresas operadoras de buses.
- Usuarios Finales
- Habitantes de la Ciudad

La forma en que se estructura la orgánica constitucional en el transporte público hace que se dificulte el proceso de innovación aunque se estén las condiciones técnicas, proveedores de buses y el nivel tecnológico.

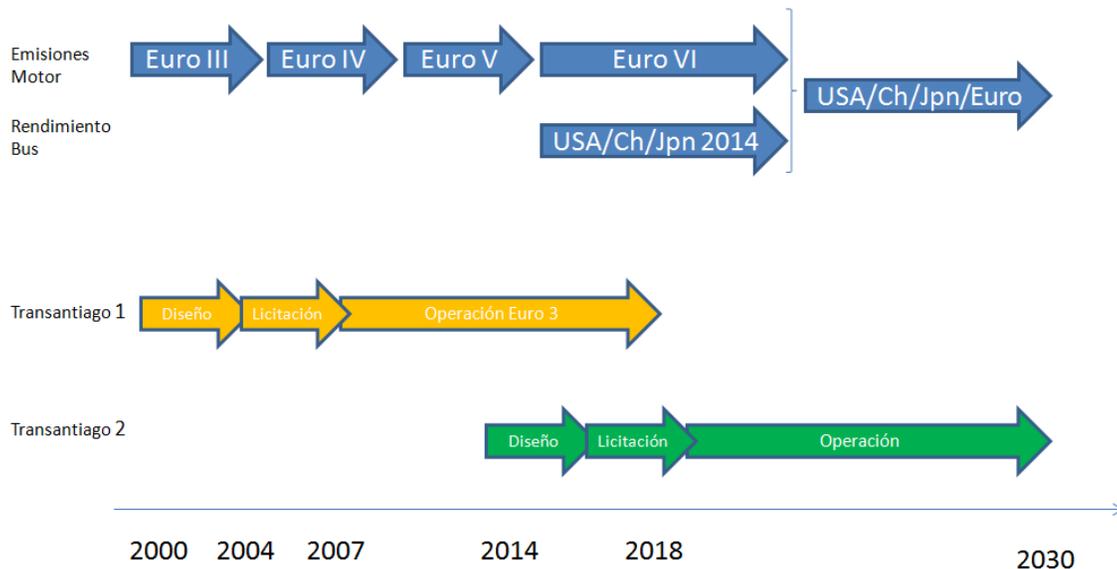
Cada actor se ocupa de sus asuntos, por ejemplo Transantiago enfrenta problemas más urgentes que los relacionados con los niveles de emisiones, están enfocados en conseguir reducir los niveles de evasión, los estándares de capacidad y frecuencia de sus servicios. Se trata de una problemática general, en materia medio ambiental anteriormente el Ministerio de Salud se encargaba de velar por el monitoreo de los niveles de emisiones en la ciudad, pero no se encontraba dentro de sus prioridades ya que enfrentaban

problemáticas de una prioridad más alta y tuvo una gestión efectiva una vez que fue delegado al Ministerio de Medio Ambiente.

Lo más probable que ocurra de no incorporar medidas a nivel político, contractual y de gestión de diversas incertidumbres, es que ante el próximo recambio de flota de buses se mantenga la estructura de operar con una flota 100% basada en diésel. Se incorporará un estándar de emisión euro V ciertamente mejor que el actual, pero en relación a lo que ocurre a nivel internacional el país se mantendrá atrasado en términos del contexto global. A nivel mundial, la nueva tendencia es que normativamente se está poniendo énfasis en el rendimiento de los motores, desde el 2014 en EEUU, China y Japón comienza a correr las nuevas normas de rendimiento para buses y camiones. Este proceso continuará desarrollando mientras madura el Transantiago. El siguiente esquema muestra lo descrito:

Figura 2: Normas de Emisiones 2000-2030

Tecnología de buses y Transantiago



[Fuente: Presentación “Estudio Oportunidades para el Desarrollo de la Movilidad Eléctrica en la Ciudad de Santiago: Propuesta para el Transporte Público”, Gianni López, 2013]

El motivo por el cual se elige la tecnología eléctrica es porque los motores eléctricos son más eficientes que cualquier otra propulsión de combustión interna, además de no emitir ningún tipo de contaminante más que el generado al producir la electricidad utilizada. Lo cual es un escenario mejor dado que la contaminación en lugar de ser esparcida por toda la red de recorridos por toda la ciudad, se concentra de forma retirada y se tienen menos emisiones por bus.

1.2.1 BUS PILOTO

Una primera experiencia piloto se está teniendo con el bus 100% eléctrico BYD K9 (ver fig. 2) desde el 24 de agosto de 2013 el cual realiza un recorrido entre Ciudad Empresarial, Huechuraba y Escuela Militar, Las Condes. Este bus es silencioso y tiene cero emisiones de gases contaminantes.

Figura 3: Bus Eléctrico Piloto BYD K9

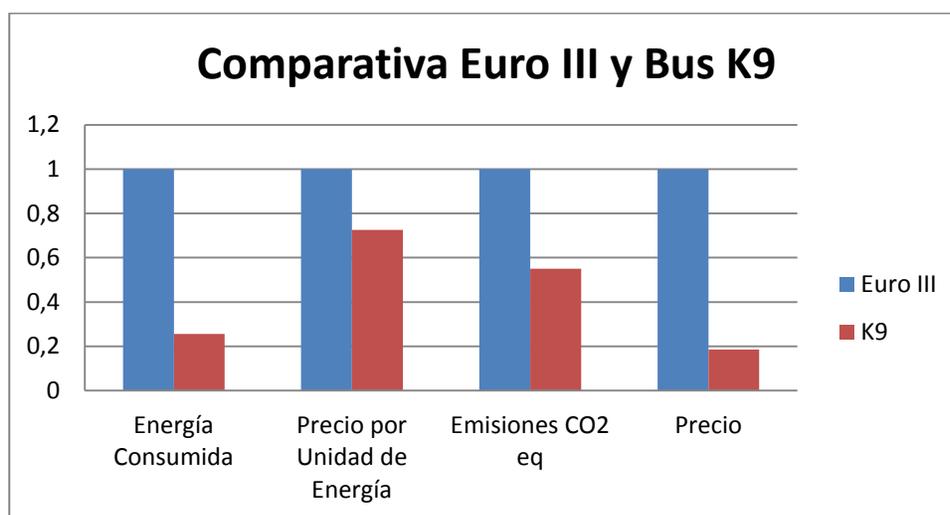


[Fuente: http://huelladecarbono.minenergia.cl/descargas_FE_SIC.html citada el 14/10/13]

Tiene una capacidad de carga eléctrica de 324 [kWh] lo que equivale a una autonomía de 250 [Km] tomando en cuenta un rendimiento en ciudad de 1,296 [kWh/km], esto es que para recorrer 1 km, se requieren 1,296 kWh⁴

Para formarse una idea de las ventajas de utilizar esta tecnología se realizó una comparativa entre la operación de una carga completa del K9, en contraste con un bus convencional del Transantiago Euro III:

Gráfico 2: Comparativa Bus Euro III con BYD K9



[Fuente: Elaboración propia, los datos de emisiones de la generación se calcularon en base a el índice de emisiones de SIC y las del bus convencional utilizando la herramienta TSANT (aplicación desarrollada por el Centro Mario Molina y la empresa sueca APERTUM) que permite cuantificar las emisiones de un tramo de un recorrido particular del Transantiago, en este caso el servicio 425]

Como se puede apreciar la energía requerida es mucho menor, dada la mayor eficiencia del motor eléctrico. El precio de la energía es menor también ya que el precio por unidad de energía es mayor que el del diésel. Las emisiones de un bus corriente son el doble que las que emite la generación eléctrica, que además pueden ir disminuyendo a medida que se incorporan más fuentes de generación de bajo carbono a la matriz energética nacional.

⁴ Fuente: http://huelladecarbono.minenergia.cl/descargas_FE_SIC.html citada el 14/10/13

Otro aspecto a favor es que las fuentes de emisión de la generación de electricidad son fijas y no se disgregan homogéneamente como los contaminantes de los buses convencionales. Finalmente el precio de la energía consumida representa apenas el 20% del que tiene hacerlo con un bus diésel.

Si bien, el testeado de este bus es algo positivo, es lamentable que se esté haciendo para un recorrido particular y no se esté midiendo en un recorrido real del Transantiago en los cuales existen muchas más paradas en el recorrido lo cual exige mayor energía al operar. Esto se dio de este modo porque la autoridad de transporte exigía una determinada altura, puerta trasera, entre otras características técnicas que para el fabricante eran muy costosas de hacer ya que operan sólo como distribuidores en Chile.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es la formulación de recomendaciones para la incorporación parcial de movilidad eléctrica en el transporte público de Santiago y así lograr una reducción de las emisiones de los contaminantes en el sector transporte en la capital.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entregar una revisión histórica de los niveles de los diferentes contaminantes y la situación actual de Santiago de Chile.
- Demostrar la conveniencia técnica y económica de introducir la tecnología eléctrica en los recorridos de buses en los que existe la factibilidad técnica y operacional de hacerlo.
- Generar un modelo de costos que entregue resultados para diferentes tipos de tecnologías eléctricas. En particular, se adaptará el modelo “Best Bus Model” desarrollado el 2005 por la Universidad de Duke, EEUU, a uno que permita estimar los costos de la tecnología eléctrica.

- Tomando el trabajo de CMMCh de un primer escenario de penetración de buses eléctricos y trolebuses para los servicios del *Transantiago* en los cuales son viables, caracterizar e identificar las principales interrogantes e incertidumbres de índole técnica, financiera, contractual y política generando un diagnóstico sistémico de los desafíos a ser enfrentados al introducir esta nueva tecnología.
- Estimar los costos totales de la propuesta y contrastarlos con el caso base de un recambio a buses Euro V.
- Estimar la disminución de contaminantes en relación al caso base.
- Determinar intervenciones claves que atiendan las problemáticas del diagnóstico sistémico descrito, para lograr la máxima introducción posible de buses y trolebuses eléctricos. Si bien las intervenciones surgen desde esta necesidad particular, dichas recomendaciones facilitarían los procesos de innovación y mejora continua en otros ámbitos en que el aparato público deba articularse con otras instituciones.

1.4 ALCANCES

El estudio se ciñó al contexto de Santiago, abarcando emisiones de parte de los buses de *Transantiago*, por lo que no representa relevancia para otros buses como los interurbanos, ni colectivos, ni taxis. Dentro del total de servicios⁵ existentes, se analizó para aquellos en que existe la factibilidad técnica:

- Por la naturaleza de su infraestructura, los trolebuses deben situarse en aquellas avenidas donde exista, o el MOP (Ministerio de Obras Públicas) ha planificado construir corredores exclusivos para buses del *Transantiago* para las fechas de la implementación.
- Considerando el bus eléctrico BYD K9 tienen una autonomía de 250 [km], se incluyó aquellos recorridos de longitud inferior a esta distancia diaria y algunos otros donde es posible la recarga rápida durante la operación.

⁵ Servicios: Los servicios de *Transantiago* son los diferentes recorridos que tienen los buses del transporte públicos, estos realizan su trayecto por un circuito que puede ser transitado varias veces al día.

El foco de la propuesta fue determinar la máxima penetración de movilidad eléctrica para los buses del *Transantiago*. No se abarcó la discusión sobre las tecnologías a emplear en los servicios en que no se pueda incorporar tecnología eléctrica.

Al comparar las emisiones de los buses eléctricos con la del caso base, se tomó el factor de emisión del SIC disponible del año 2012 ya que por cada [MWh] consumido se están emitiendo contaminantes, dependiendo la estructura de la matriz energética chilena.

Además, en cuanto al modelo de costos es importante señalar que se requirió utilizar una serie de datos de costos, tasas, frecuencias de cambio de ciertos insumos, mantenciones, sueldos, ente otros descritos posteriormente, que hacen que el estudio de costos deba ser tomado en cuenta al comparar los casos sobre igual base de supuestos, y no centrarse en la cantidad monetaria total. En otras palabras, los resultados del modelo poseen un mayor impacto comparativo que cuantificativo.

1.5 RESULTADOS OBTENIDOS

Se levantó y organizó la información de modo que se respaldó la conveniencia económica, operacional y ambiental de la incorporación parcial de la movilidad eléctrica. Además de haber realizado un análisis sistémico que permitió proponer intervenciones claves a realizar, identificando el contexto político, la gestión de incertidumbres técnicas y el análisis del marco regulatorio contractual, para poder concretar la incorporación de tecnologías eléctricas convenientes para la capital. Esto está reflejado en los siguientes entregables:

- Se Recopilaron todos los ahorros en costos, como también de ingresos extras dado un escenario en que se utilizan las tecnologías eléctricas.
- Se mostró que para determinados recorridos lo más económico, eficiente y menos contaminante es la movilidad eléctrica.
- Se identificó las incertidumbres más importantes a tener en consideración para un futuro proceso de implementación.
- Se generó un compendio de intervenciones claves contractuales, políticas y de planificación para la coordinación sistémica de actores vinculados con la adopción de esta tecnología.

2. METODOLOGÍA

El estudio consta de dos objetivos principales. El primero busca demostrar la factibilidad técnica y la mejora en términos económicos y ambientales y el segundo abarca un análisis sistémico considerando los actores involucrados en el proceso de incorporación de la nueva tecnología.

La metodología para la demostración de factibilidad técnica y económica consistió en:

- Realizar una revisión del estado del arte en cuanto a tecnologías alternativas de propulsión de transporte público. Además de señalar los diversos factores que han llevado a distintas capitales del planeta en la búsqueda de nuevas alternativas.
- Señalar las ventajas de la movilidad eléctrica sobre las otras tecnologías alternativas al diésel, como también sus limitantes.
- Realizar un modelo de costos comparativo desarrollado en Excel para el caso de Santiago y estimar el costo de una línea base, basada en una flota tipo de buses con tecnología diésel Euro V; buses eléctricos, que operan por medio de baterías; trolebuses, que operan dentro de una red de catenarias; y buses híbridos en paralelo e híbridos en serie.
- Utilizar los resultados de la reducción de emisiones del CMMCh obtenidos mediante TSANT, una aplicación del sistema de información climático AIRVIRO descrita en profundidad en el capítulo 5.

El análisis sistémico de los actores involucrados se basa en la revisión de documentación respecto de los contratos de concesión de las empresas operarias de buses con el ministerio de transporte y otros documentos que den una comprensión de la estructura orgánica con que opera el Transantiago. Además de la realización de entrevistas a expertos y representantes de los diferentes organismos que deben coordinarse. A partir de las entrevistas se extraerá información referente a:

- Intereses y foco con que opera cada actor.
- Principales obstáculos que se identifican.
- Gestión de incertidumbres.
- Incentivos y modificaciones puntuales en el marco contractual regulatorio de las concesiones de Transantiago.
- Poderes fácticos preponderantes.

A partir de la documentación disponible y la información recogida de las entrevistas se forma un relato que facilita la identificación de las principales dinámicas y lograr un análisis sistémico.

Finalmente, a partir del análisis se describen las medidas e intervenciones claves a efectuar para el cumplimiento del objetivo de implementación parcial de tecnología eléctrica en el transporte público.

Cabe destacar que la información recopilada en las entrevistas también es utilizada en los capítulos anteriores al incorporar elementos claves que refuerzan el desarrollo hecho antes.

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Energía

[5] Eficiencia de los motores eléctricos: Capacidad que tiene el motor de transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Puede expresarse de la siguiente forma:

$$EF = \frac{E_{eléctrica}}{E_{mecánica}}$$

[5] Eficiencia de los motores de combustión interna: Capacidad que tienen los motores de combustión interna de transformar el poder calorífico propio del combustible con que operan en energía mecánica. Se puede expresar como:

$$EF = \frac{E_{combustible}}{E_{mecánica}}$$

2.1.2 Baterías de Litio Fierro

[6] Las batería de litio fierro poseen eficiencia energética de 95% mientras que las baterías corrientes de plomo ácido sólo un 80%. Son utilizadas en transporte ya que pueden operar en un rango de temperatura entre -20 y 70 [°C] además de ser más segura al no generar explosión ni ser flamables ante una sobre carga o una colisión.

[6] **Capacidad Eléctrica:** Energía eléctrica que puede ser almacenada por la batería, se mide en [kWh]

[6] **Ciclo de Carga:** Ciclo que comprende la utilización completa de la carga eléctrica de una batería y su posterior recarga completa.

2.1.3 Emisiones

[7] **Material particulado:** Contaminante compuesto por partículas primarias, emitidas directamente de las fuentes, y por partículas secundarias, formadas a partir de gases en la atmósfera. Estos gases precursores son el SO₂ (generado principalmente por la industria), NO_x (emanado mayoritariamente por buses y otros vehículos) y amoníaco (cuyas fuentes están constituidas, entre otras, por desechos orgánicos y la agricultura)

[8] **Material particulado respirable fino MP_{2,5}:** Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrones.

[8] **Material particulado respirable MP₁₀:** Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrones.

[8] **Diámetro aerodinámico:** Indicador del tamaño de las partículas y corresponde al tamaño de una partícula esférica de densidad unitaria, que tiene la misma velocidad de sedimentación que la partícula de interés.

[8] **Concentración:** El valor promedio del material particulado medido en el aire expresado en microgramos de material particulado por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

[8] **Concentración de 24 horas:** Corresponde al promedio de los valores efectivamente medidos de concentración en la estación monitora en 24 horas consecutivas.

[8] **Concentración mensual:** Corresponde al promedio de los valores efectivamente medidos de concentración de 24 horas en la estación monitora, en un mes calendario.

[8] **Concentración anual:** Corresponde al promedio de los valores efectivamente medidos de concentración mensual en la estación monitora, en un año calendario.

[8] **Concentración trianual:** Corresponde al promedio de los valores efectivos medidos de concentración anual en la estación monitora, en 3 años consecutivos.

3. CONTAMINACIÓN DE LAS CIUDADES Y EL PROCESO HISTORICO DE DESCONTAMINACIÓN DE SANTIAGO

“Actualmente, la población urbana global es nueve veces mayor a la de 100 años atrás - lo que tiene enormes implicaciones. Las ciudades grandes tienen un apetito voraz por energía, consumen dos tercios de la oferta energética mundial y producen más del 70% de las emisiones globales de CO₂” [12]

Los GEI afectan de forma indirecta y en mediano plazo la vida de la especie humana, ya que es por medio del desajuste climático, que se producen diversos desastres naturales que terminan dañando al hombre. Otros contaminantes pueden afectar de forma directa la vida de la población de una ciudad.

Según un estudio realizado el 2006 por y Dockery en EEUU, desde 1997 existe gran cantidad de investigaciones que evidencian que respirar aire contaminado con material particulado es perjudicial para la salud humana, señalan que la evidencia de los efectos en la salud a largo plazo ha sido reforzada por varios reanálisis y análisis extendidos de Harvard en seis ciudades y por varios otros resultados de investigaciones independientes. [13]

Así como ocurre cuando no cambiamos el aceite del auto al punto que se puede fundir, cada ciudad se ha hecho más consciente de que la problemática ambiental implica externalidades negativas que de no ser atendidas a tiempo perjudicarán el fluir de la sociedad sin posibilidad de retorno. Esto ha conllevado a que se hayan ido fijando normas ambientales, las cuales se plantean como metas a alcanzar para favorecer la calidad de vida de sus habitantes, y como señala el informe Stern, también su economía.

[14] La Región Metropolitana posee una superficie de 15.544,5 [km²], de esta área 85,7% corresponde a terreno montañoso, un 11,0% está destinada a la agricultura y un 3,3% espacio urbanizado ubicado a una altura media de 520 [m.s.n.m.]. La mayor parte del área urbanizada se encuentra desplegada en la cuenca de Santiago limitada al oriente con la Cordillera de los Andes, con cerros que superan los 3.200 [m.s.n.m.] (Cerro Ramón), al oeste con la Cordillera de la Costa que alcanza alturas por sobre los 2.000 [m.s.n.m.] (Cerros Roble Alto) (ver Anexo 5)

Los cerros que rodean la planicie central significan un obstáculo para la remoción de contaminantes atmosféricos desde la cuenca. En el periodo de otoño-invierno la variación de las concentraciones se determina por el desarrollo de la capa de mezcla y la estabilidad del aire. La presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico marca, durante gran parte del año, la aparición del fenómeno de inversión térmica. Esto favorece la generación de una gran capa de aire muy estable cerca de la superficie, de una altura de 500 [mt] en invierno, que inhibe el traspaso vertical del aire en la cuenca generando el confinamiento del aire y la sucesiva acumulación de contaminantes.

[15] “Si bien la preocupación por la contaminación del aire tiene antecedentes que se remontan a inicios del siglo XX, las primeras normas de emisión y calidad se dictan en 1961 y 1978, respectivamente” la primera es el decreto 144 del Ministerio de Saludo de 1961 y Resolución 1215 del Ministerio de Salud de 1978.” En adelante se han hecho nuevos estudios y procesos de revisión de normativa que han dado resultado a que hoy Chile cuente con normas primarias de calidad ambiental⁶ que determinan los niveles permisibles de MP₁₀ respirable, MP_{2,5}, dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb)

Durante el proceso de abordar la problemática de la contaminación atmosférica, dada la experiencia internacional, se tenía claridad respecto a los niveles permisibles pero no fue hasta la década de los 90’ en que se tuvo un registro robusto de los niveles de emisiones constatando que para los años 1992, 1993, 1994 y 1995 las normal primarias de calidad del aire fueron sobrepasadas en la Red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos y Meteorológicos (Red MACAM), y la Red Semiautomática de Vigilancia e la Calidad del Aire (REDSEM). Lo cual repercutió en que la Región Metropolitana fue declarada zona saturada por ozono, material particulado respirable, partículas totales en suspensión y monóxido de carbono y zona latente por dióxido de nitrógeno, mediante el Decreto Supremo N° 131/1996 del 12 de junio de 1996 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

⁶ “Aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”. Artículo 2°, letra n, ley 19.300. en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”. Artículo 2°, letra n, ley 19.300.

La forma de abordar la problemática se estructura a partir de planes de prevención y descontaminación. Cuando las mediciones indican que se está alcanzando un porcentaje importante para determinados contaminantes (entre un 80 y un 100%) se declara zona latente, y luego se aplica un plan de prevención de contaminación. Si los niveles son sobrepasados se declara zona saturada y posteriormente se aplica un plan de prevención y descontaminación.

Como en el caso de Santiago se tenían mediciones que sobrepasaron las normas, el año 1998 mediante el Decreto Supremo N° 16/1998 surge el primer Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA), cuyo objetivo es el cumplimiento de las normas primarias de calidad del aire. Se actualiza en el Decreto Supremo N° 58/2003 y su última actualización fue mediante el Decreto Supremo N° 66/2009 elaborando metas de calidad del aire y medidas, orientadas al control de emisiones de las principales fuentes contaminantes.

Es importante señalar que las normas de calidad del aire se miden según la concentración medida para diferentes escalas de tiempo, esto es porque la salud de un individuo puede responder bien ante una determinada concentración durante una hora, pero podría ser perjudicial la exposición durante un año entero.

Las normas primarias de calidad del aire vigentes son las siguientes:

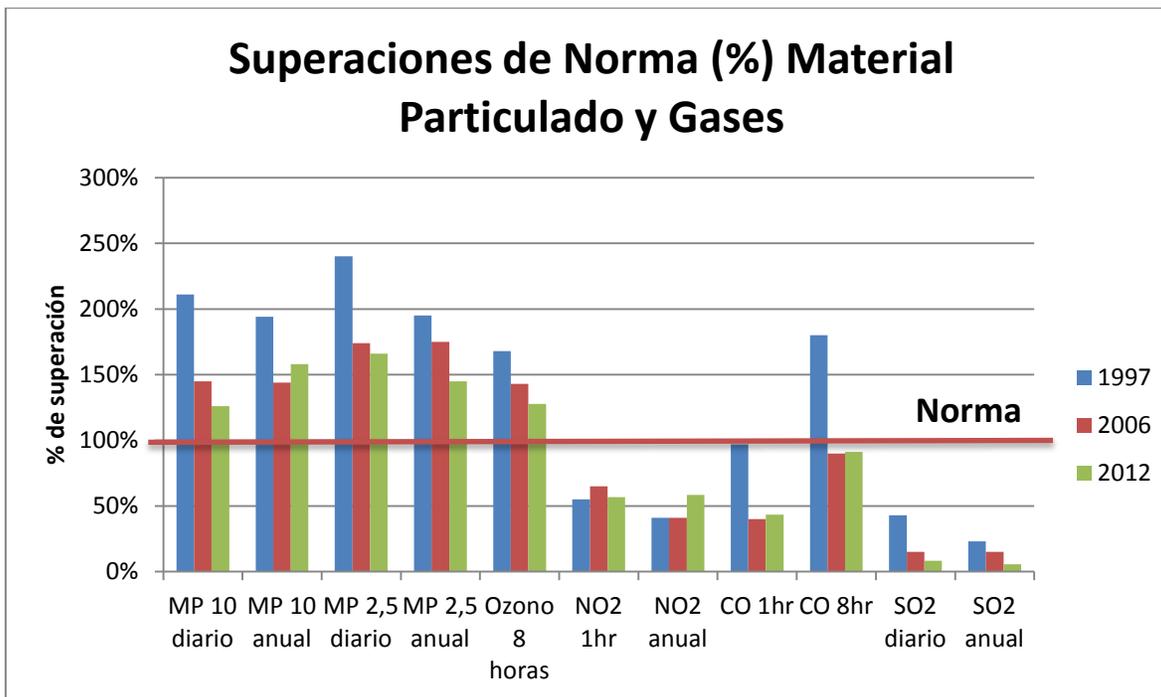
Tabla 3: Normas Vigentes 2013

Contaminante	Decreto	Periodo	Concentración		
			ppmv	ppbv	µg/m ³
MP10	59	Concentración de 24 horas	-	-	150
		Promedio Anual	-	-	50
MP2,5	12	Percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año	-	-	50
		Promedio tri-anual de las concentraciones anuales	-	-	20
SO ₂	113	Promedio Anual	-	31	80
		Concentración de 24 horas	-	96	250
NO ₂	114	Concentración de 24 horas	-	53	100
		Percentil 99 de los promedios horas de los máximos diarios	-	213	400
O ₃	112	Percentil 99 de los promedios de 8 horas de los máximos diarios	-	61	120
CO	115	Percentil 99 de los promedios de 8 horas de los máximos diarios	9	-	10
		Percentil 99 de los promedios horas de los máximos diarios	26	-	30

[Fuente: <http://macam.mma.gob.cl/index.php/documento> al 25 de Junio de 2013]

Durante todo este proceso se han tenido avances en la mayoría de los contaminantes:

Gráfico 3: Evolución de Contaminantes Normados (1997-2012)



[Fuente: Elaboración propia, con datos de CONAMA (2008), datos validados por la Seremi de Salud RM. Y Datos de la base de datos de Airviro⁷.]

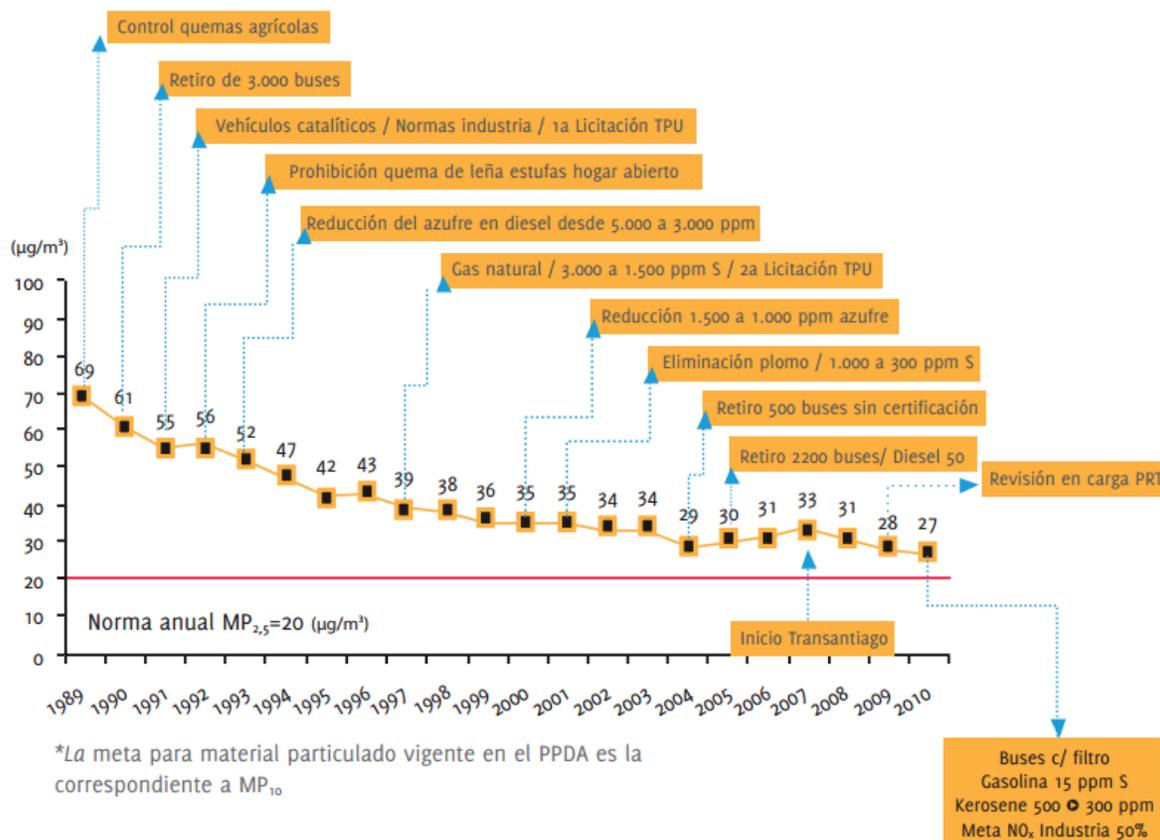
En el anexo 7 se muestra la evolución completa de cada uno de los contaminantes. Como se aprecia, ha existido disminución de las emisiones, no obstante, aún deben continuar las mitigaciones en términos de material particulado y de los precursores de material particulado y ozono (NO₂, SO₂, NH₃). Se habla de precursores porque el material particulado se origina de dos fuentes principales, la generación directa, ya sea por los procesos de combustión interna o por levantamiento de polvo superficial; y generación secundaria que es la que se produce en la atmósfera mediante reacciones químicas en que estos precursores mencionados derivan en material particulado.

⁷ Sistema de gestión de calidad del medio ambiente desarrollado por el CMMCh y la empresa sueca APERTUM

Otra forma de observar la evolución es destacar que en 1997 se registraron 37 días de preemergencia y cuatro días de emergencia ambiental. El 2011 sólo se registraron 4 días de preemergencia.

Siendo el $MP_{2,5}$ el más nocivo para la salud dado que entre más fino es mayor la penetración en el organismo, las partículas de un tamaño de $10\ \mu m$ pueden ser captadas en las fosas nasales, sin embargo entre más pequeñas son pueden traspasar los alveolos e ingresar directamente al torrente sanguíneo [13]. En el anexo 6 se describe la dimensión de las partículas comparativamente y se muestra la cantidad de población chilena expuesta a este contaminante.

Gráfico 4: Evolución de $MP_{2,5}$ 1989-2010



[Fuente: Ministerio del Medio Ambiente [15] año 2011]

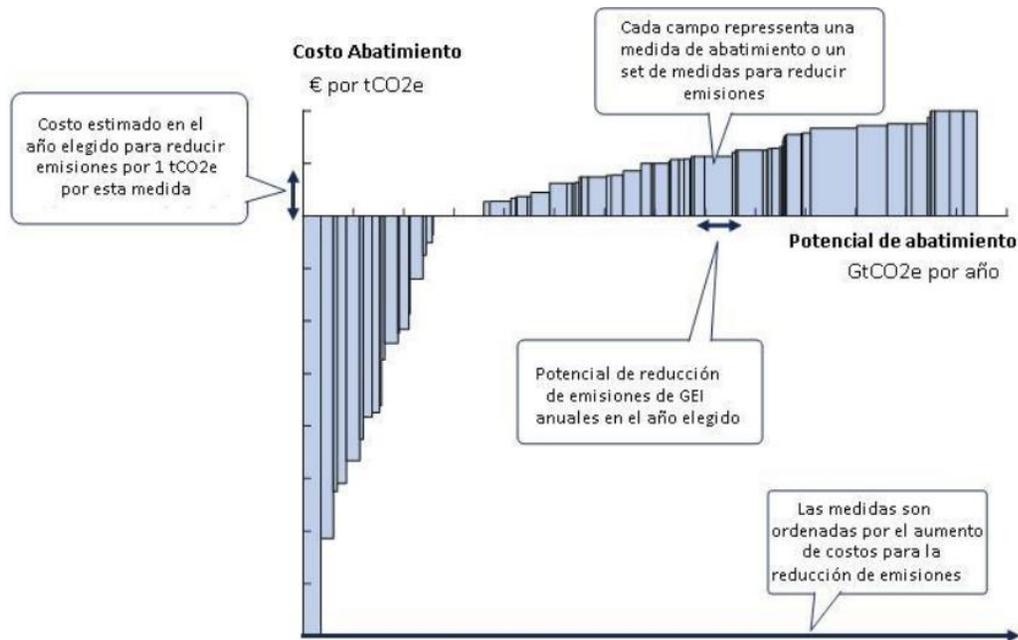
Ante estos hechos relacionados con los contaminantes locales, Santiago fue declarado zona saturada. Lo cual ha obligado a las autoridades a realizar nuevos esfuerzos ambientales en pos de alcanzar los límites que la norma indica. Y por consiguientes, a ser receptivos a iniciativas que aporten en materia ambiental.

Además, por el lado de los GEI que afectan a la atmósfera de forma global, volviendo a hacer referencia a la cumbre de Copenhague el 2009, el diario La Tercera publicó en julio del 2013 una columna [16] sosteniendo que la entonces ministra Ana Lya Uriarte anunció que para el año 2020 Chile reduciría en un 20% sus emisiones de CO₂. Esto, según el programa MAPS-Chile equivale a disminuir un total entre 25 y 35 millones de CO₂, cifras similares al total del doble de emisiones de las centrales de carbón, gas y diésel registradas el 2011.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS DE TRANSPORTE

El enfrentar las diversas fuentes de contaminación que se expusieron anteriormente posee una variada gama de medidas que logran mitigar fracción de las emisiones. La metodología que se utiliza para elegir de manera más eficiente el orden en que se deben aplicar las medidas de mitigación es mediante curvas de abatimiento. Esta metodología ha jugado un rol importante en las políticas de cambio climático de los gobiernos de países y regiones, Reino Unido, Holanda, Irlanda, Suiza, Polonia y California. Además de indicar el costo marginal del abatimiento de emisiones y su nivel de mitigación por medida, permite calcular el costo total de las medidas de mitigación y el promedio de costo de abatimiento [17].

Figura 4: Curva de Abatimiento



[Fuente: Global GHG Abatement Cost v2.0]

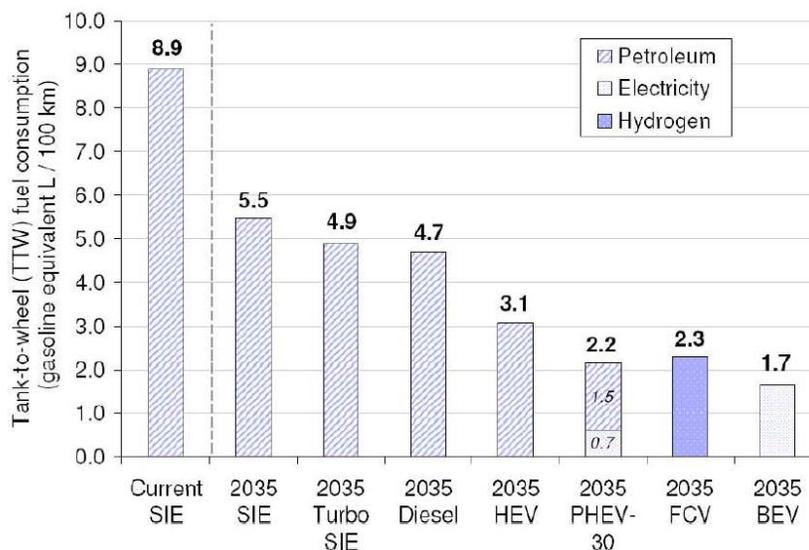
En una curva de abatimiento, todas las medidas que se encuentran bajo el eje de las abscisas representan un ahorro de costos y es por esto que son todas las primeras medidas que deben considerarse. Actualmente no existen curvas de abatimiento desarrolladas para Santiago de Chile y esto ocurre ya que es complejo desarrollar en primera instancia un inventario de emisiones para la región, perfeccionar los sistemas de medición, y para ciertas medidas además, se requieren pruebas piloto de diferentes medidas para poder cuantificar el impacto. Aunque no se disponga de la curva de mitigaciones, es un aporte determinar los ahorros de aplicar ciertas medidas y el presente estudio lo hará para el caso de la introducción de tecnología eléctrica al transporte público.

A nivel del transporte público de la ciudad se han identificado diferentes medidas asociadas a las normas de emisiones de los motores, incorporación de filtros de partículas (DPF) y zonas de baja emisión. Y lo que se avecina para los próximos años son medidas que incluyan un cambio en la tecnología de los motores.

5.1 NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TRANSPORTE

[5]El **reporte MIT: Proyección 2035**, realizado en Massachusetts Institute of Technology (MIT) durante 2005 – 2008 analiza las tecnologías de vehículos livianos y sus combustibles durante los próximos 25 años. A continuación se muestra el consumo energético equivalente en gasolina, considerando el trayecto entre el tanque del vehículo y su utilización para producir el movimiento (Tank-to-wheel)

Gráfico 5: Eficiencia Entre Tecnologías Proyección 2035 (MIT)



[Fuente: MIT: Proyección 2035]

SIE corresponde a un vehículo de combustión interna; HEV, vehículo híbrido; PHEV-30, híbrido enchufable con 30 millas de autonomía; FCV, vehículo con motor de hidrógeno; y BEV, vehículo eléctrico a baterías.

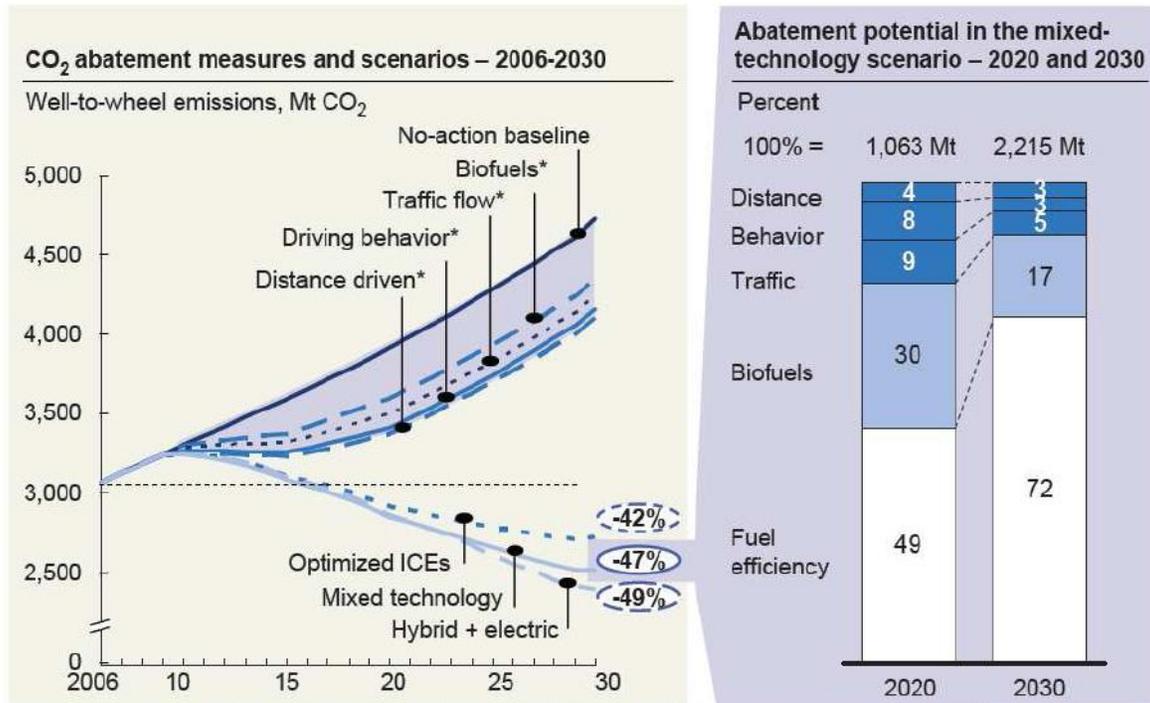
Los vehículos más eficientes son los eléctricos, esto se debe a que la energía captada por combustión interna es menor que la de un motor eléctrico y además se aprovecha la fuerza del frenado para recargar las baterías ahorrando también costos de mantenimiento en recambio de pastillas de frenado.

El estudio hace un análisis en cuanto a las posibilidades de desarrollo de nuevas tecnologías tomando criterios plausibles de cuán rápido pueden ser desarrolladas, manufacturadas y vendidas. Y es por este motivo que se concluye que no existen tecnologías individuales o combustibles únicos que resuelvan el problema sino que debe ser un esfuerzo integral y coordinado para desarrollar y comercializar vehículos más eficientes.

[18] **En el informe McKinsey&Company: proyección 2030**, publicado en marzo del 2009, por McKinsey & Company's Automotive Practice y Climate Spetial Initiative señala que existen diversas medidas que mitigarían gran parte del CO₂ emitido por transporte:

- Mejor rendimiento de motores.
- Uso de biocombustibles.
- Cambio en infraestructura de las calles y tráfico.
- Mayor uso de transporte público
- Desarrollo de conducción ecológica (eco-driving) que consiste en una serie de recomendaciones de manejo que incrementa el rendimiento de los vehículos.

Gráfico 6: Reducción de Emisiones



[*La reducción de emisiones por biodiesel, tráfico, hábitos de conducción y distancia incluyen la introducción de diversas tecnologías. El gráfico de la derecha considera un promedio de 150 [g/km] para los vehículos nuevos al año 2030. Fuente: McKinsey&Company: proyección 2030]

El mayor impacto viene dado por optimizar el rendimiento de los motores (ICE) y la introducción de tecnologías. No obstante, expertos en transporte señalan que para ciudades de alto nivel de tráfico, la variable más preponderante pasa por descongestionar las calles ya que gran parte de la mitigación alcanzada se ve anulada por los prolongados viajes a baja velocidad que ocurren en embotellamientos.

5.2 PROGRAMA DE C40 CITIES CLINTON CLIMATE INITIATIVE

Si bien el estudio se enfoca en tecnología eléctrica, se incluirá en la comparativa a los buses híbridos ya que dentro de las tecnologías que poseen una autonomía competitiva respecto a los buses diésel, son los que presentan mayor eficiencia energética y han tenido una importante penetración en el transporte público internacional.

El Programa de Prueba de Buses Híbridos y Eléctricos, desempeñada e implementada por C40 Cities Climate Leadership Group en alianza con Clinton Climate Initiative y

con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo, muestra que en Latinoamérica las tecnologías híbridas y eléctricas pueden desempeñarse igual o mejor que la tecnología de los buses diésel y con un periodo de retorno para la inversión, razonable. [12]

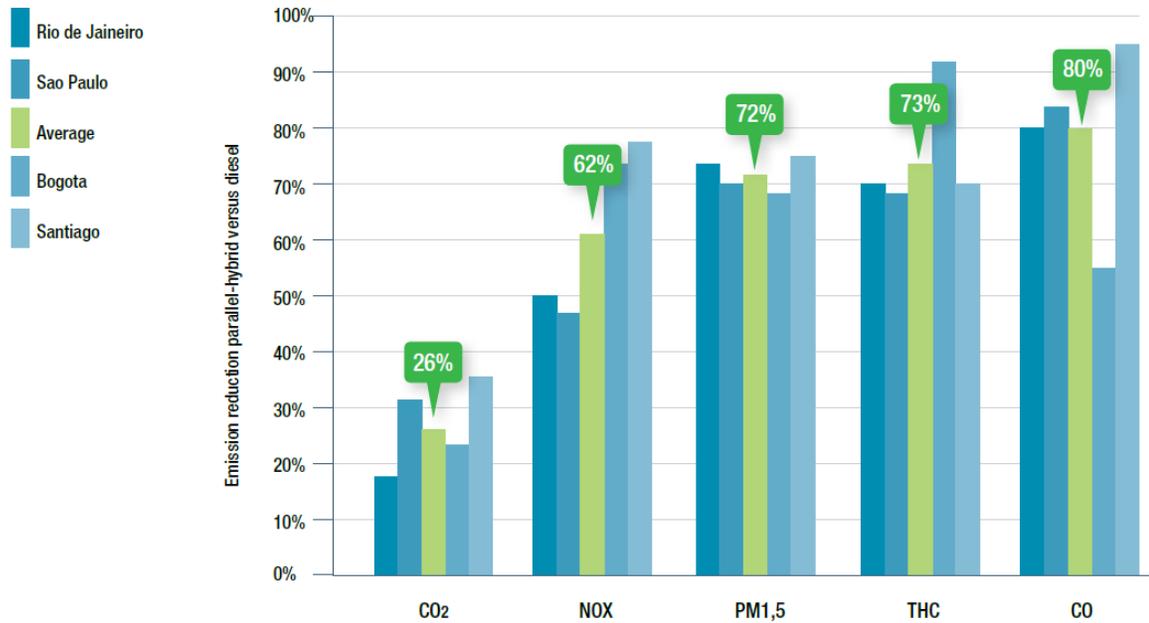
Se realizaron pruebas con buses híbridos y eléctricos en las ciudades de Bogotá, Río de Janeiro, Sao Paulo y Santiago, se consideraron condiciones de manejo y ciclos de conducción específicos. Siendo varias ciudades involucradas, los resultados de las mediciones del Programa son más completos que los de un caso de estudio aislado, luego permiten hacer generalizaciones y ser aplicados a otras ciudades.

La reducción para los distintos contaminantes fue medida para los buses híbridos en serie y paralelo⁸, no fueron considerados los buses eléctricos ya que no emiten contaminación directamente. Para el caso chileno, dada la composición de la matriz energética del Sistema Interconectado Central, en términos de CO₂e⁹ la reducción es de alrededor de un 50%.

⁸ Los motores híbridos en serie accionan la propulsión por medio de un motor eléctrico que es alimentado eléctricamente por un motor diésel. Mientras que los híbridos en paralelo pueden ser propulsados por el sistema a diésel o eléctrico directamente.

⁹ CO₂e: Dada una cantidad de un determinado contaminante efecto invernadero, es la equivalencia en cantidad de CO₂ que tendría el mismo potencial de calentamiento global.

Gráfico 7: Reducción de Emisiones Buses Híbridos

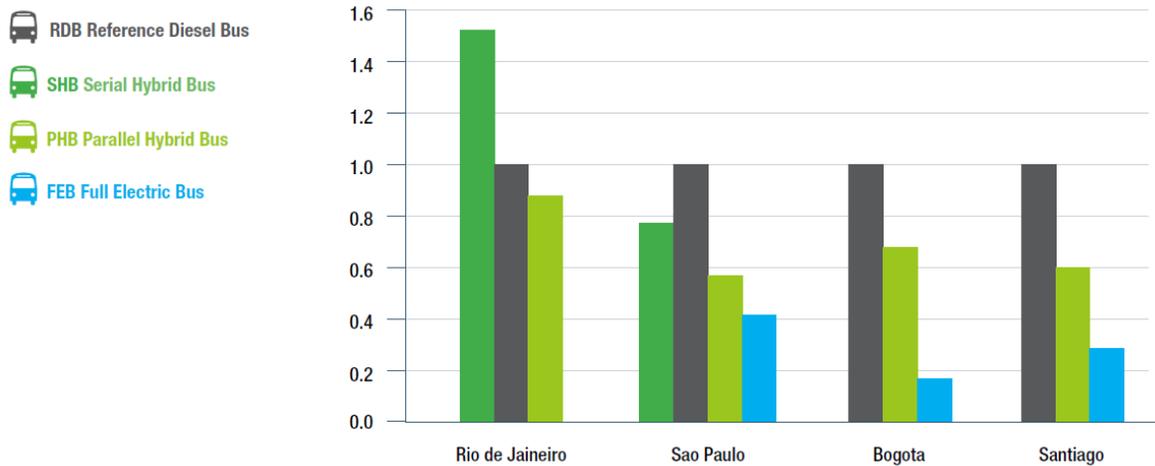


Fuente: [12]

En todas las ciudades se aprecia una considerable reducción de los diferentes contaminantes. La variación entre cada ciudad responde a la diferencia en las condiciones de altura y variables climáticas, como también a diferentes formas de operación y ciclos de conducción.

Respecto a la eficiencia energética de las distintas tecnologías, en general los vehículos eléctricos destacaron por su alto rendimiento, seguidos por los híbridos en paralelo. A continuación se muestra una comparativa en unidades normalizadas de energía necesaria para recorrer una distancia determinada:

Gráfico 8: Eficiencia Energética [Energía/Distancia]



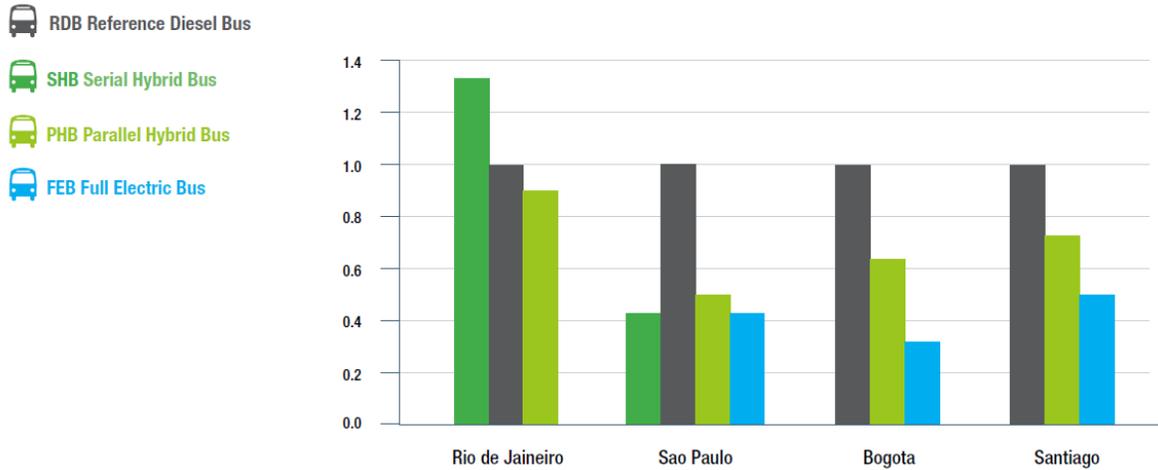
Fuente: [12]

Los altos resultados de los buses híbridos en serie de Rio de Janeiro pueden responder al proceso de aprendizaje activado por el programa, el cual puede producir mejores resultados en el futuro, los fabricantes lograron una mejor calibración para mejorar la eficiencia a partir de esta experiencia.

La pronunciada diferencia entre la prueba eléctrica de Sao Paulo con el resto se debe a que se utilizó un bus trolebús eléctrico los cuales tienen una capacidad diferente dado que son más livianos que los buses eléctricos a baterías que pueden cargar menos pasajeros ya que la reglamentación de carga por eje restringe la cantidad de gente que pueden transportar. Debido a esta restricción los buses híbridos tienen una capacidad de pasajeros del 10% al 20% menor que los buses diésel, y los buses eléctricos acomodan 40% a 50% menos de pasajeros para cumplir las regulaciones de carga. Este es un problema que los fabricantes de tecnologías de bajo consumo de carbono están solucionando.

En el gráfico siguiente se considera eficiencia energética por pasajero transportado:

Gráfico 9: Eficiencia Energética por Pasajero [Energía/Distancia-Pasajero]



Fuente: [12]

Considerando la energía requerida para transportar cada pasajero el trolebús resulta tener una eficiencia competitiva respecto a la tecnología de buses eléctricos a baterías. La prueba realizada en Bogotá, Colombia demostró que tomando un horizonte de evaluación de 10 años resulta más económico operar con buses eléctricos:

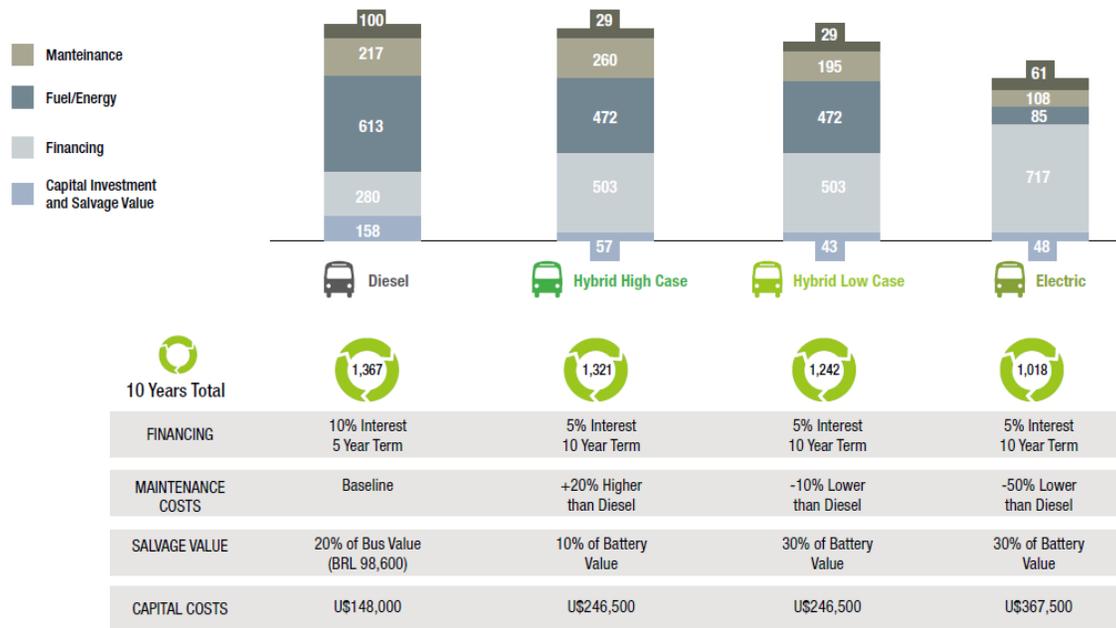
Gráfico 10: Ciclo de Costo Total Bogotá (10 años)



Fuente: [12]

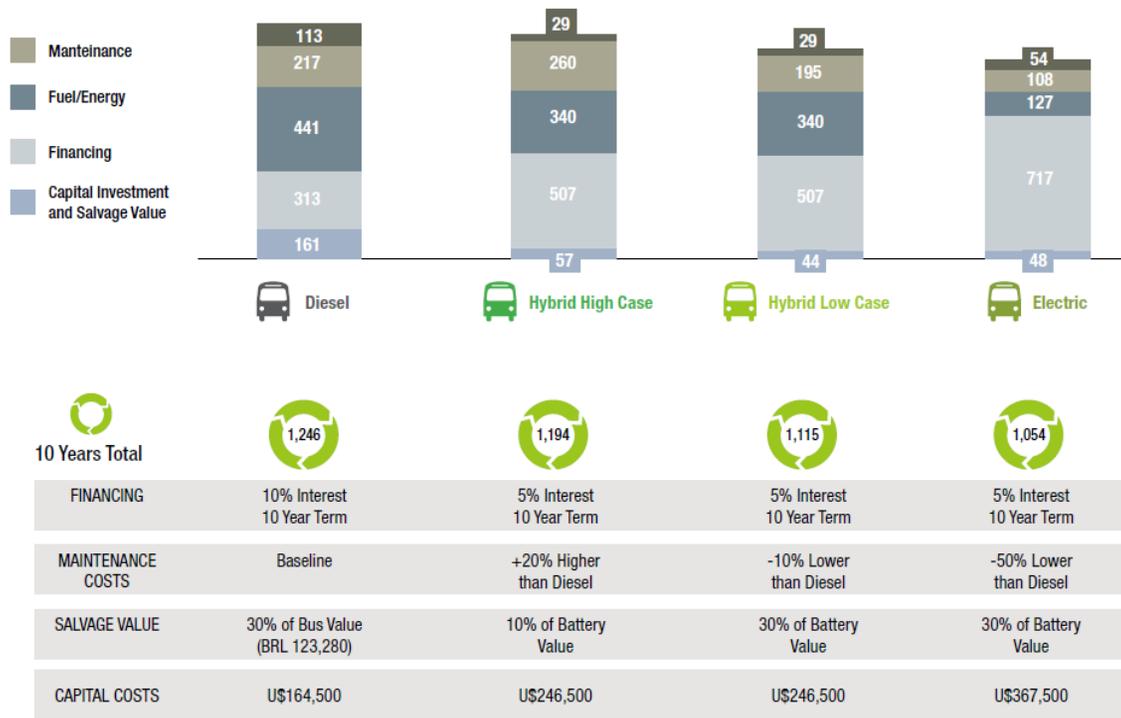
Resultan resultados similares para el resto de las ciudades:

Gráfico 11: Ciclo de Costo Total Sao Paulo (10 años)



Fuente: [12]

Gráfico 12: Ciclo de Costo Total Rio de Janeiro (10 años)



Fuente: [12]

Al consultar a los desarrolladores por la ausencia del análisis de ciclo de vida completo para Santiago en la publicación de la Fundación Clinton, se explicó que la parte económica la realizó una firma estadounidense que recibió tarde los resultados de las mediciones de Santiago, ya que fue la última ciudad en ser medida, inicialmente la cuarta ciudad iba a ser Curitiba, Brasil. No obstante se presionó para ser parte del estudio pero dados los plazos, la tardía incorporación implicó la omisión de los resultados del ciclo de vida para Santiago.

Tomando los resultados en las diferentes ciudades y promediándolos y normalizándolos respecto al caso diésel se puede formar la siguiente tabla comparativa:

Tabla 4: Síntesis Aspectos Clave Entre Tecnologías

Comparativa Tecnológica				
Tecnologías	Diésel	Trolebús	Eléctrico	Híbrido
Financiamiento y Capital [\$USD]	100%	175%	147%	112%
Mantenimiento [\$USD]	100%	90%	65%	120%
Combustible/Energía [\$USD]	100%	14%	26%	77%
Capacidad [pasajeros]	100%	100%	60%	80%
Vida útil [años]	100%	250%	170%	125%
Autonomía [km]	100%	100%	60%	100%
Evaluación Costos 10 Años [\$USD]	100%	74%	85%	98%

[Fuente: Elaboración propia con información del informe de la Fundación Clinton [12], proveedor de buses Volvo y 3cV]

En términos de capital inicial y financiamiento, lo más caro son los trolebuses, seguidos de los buses eléctricos y los híbridos. No obstante en términos de operación, los trolebuses poseen un costo de un 14% de energía comparado con el caso diésel, y en mantención un 90%. Por su parte, el bus eléctrico tiene un costo del 26% de la energía y sólo 65% en mantención. Dado el peso extra que implica llevar baterías, en el caso de los buses eléctricos, la capacidad de estos se ve restringida a un 60% respecto de los buses diésel y los híbridos a un 80% ya que también poseen un peso adicional al contar con 2 motores y un banco de baterías.

La vida útil de las 3 tecnologías es mayor. Destaca la de los trolebuses que poseen una durabilidad de más del doble de los buses convencionales, seguida de los buses a baterías que deben con un 70% más de duración, y luego los híbridos que ofrecen sólo un 25% más. Esta gran diferencia ocurre debido al desgaste por la combustión interna que deteriora los motores de forma mucho más agresiva que el principio electromagnético con que operan los motores eléctricos. La autonomía de los buses eléctricos ronda un 60% de lo que puede recorrer un bus diésel, y este elemento es crítico al momento de diseñar una red de buses eléctricos dentro del transporte público.

En el cálculo de costos se trabajó con el modelo K9 de BYD, es importante señalar el ritmo de evolución de la tecnología, este modelo corresponde a la segunda generación, la primera versión poseía la misma capacidad de carga pero su autonomía era sólo de 150 [km], pesaba 22 [ton] y tenía un rendimiento de 2,16 [kWh/km]. El bus considerado posee una autonomía de 250 [km] pesando 19[ton] y un rendimiento de 1,62 [kWh/km].

Además existen diversas marcas emergentes que compiten, EBUSCO lanzó un modelo este año de un rendimiento de 0,9 [kWh/km]

Considerando todos estos elementos, al evaluar los costos a 10 años resulta más conveniente utilizar trolebuses (sin considerar el costo de infraestructura de la catenaria), seguido de buses eléctricos y en tercer lugar los buses híbridos.

La tecnología eléctrica ha mejorado y continúa haciéndolo, actualmente se ha llegado al punto en que resulta conveniente económicamente un recambio a esta tecnología. Para que pueda llevarse a cabo el proceso de recambio tecnológico se identifican las siguientes limitantes:

- La baja autonomía de los buses eléctricos a baterías hace que sean introducidos para una cantidad limitada de recorridos o que se necesite una reestructuración de los servicios que permita operar con los kilómetros que los buses pueden recorrer sin ser recargados. Actualmente existen desarrollos de recarga rápida, pero no están disponibles comercialmente.
- Incorporación de la infraestructura de catenarias para aquellos recorridos donde resulte factible operar con trolebuses.
- El alto precio de los buses, dado que cambia la estructura de inversión que manejan los operarios de buses.
- Escepticismo de parte de las empresas de buses respecto a la conveniencia económica del uso de esta tecnología.

5. POSIBLE ESCENARIO DE MOBILIDAD ELÉCTRICA PARA SANTIAGO DE CHILE

El CMMCh en conjunto con Chilectra desarrollaron un primer escenario de penetración de movilidad eléctrica en la Capital en el marco de la promoción del transporte público eléctrico en el futuro Plan de Descontaminación para MP_{2,5}.

La propuesta de movilidad eléctrica para el transporte público de Santiago plantea dos tecnologías eléctricas, los trolebuses eléctricos y buses eléctricos a baterías. Se utilizaron dos herramientas, una para obtener las emisiones y otra para estimar los costos del ciclo de vida total del proyecto:

- El Sistema de Información Ambiental de Transantiago, TSANT desarrollado por CMMCh, que contiene la información operacional y técnica de los distintos servicios de Transantiago, se describe el impacto en términos de emisiones de contaminantes locales y de GEI; y
- Adaptación de un modelo de costos, “Best Bus Model” desarrollado por la Universidad de Duke, EEUU que permite obtener el costo total del ciclo de vida de una flota de buses para diferentes tecnologías.

Es importante destacar, que si bien SECTRA maneja modelos para el análisis de impacto ambiental como MODEM y MODEC, resulta más idóneo la utilización de TSANT porque dispone de toda la información de recorridos y frecuencias de los buses del *transantiago* con una actualización periódica entregando una mejor estimación de las emisiones de los buses del transporte público, mientras que MODEM o MODEC abarcan el sistema de transporte completo desde un enfoque bottom-up que estima desde datos específicos de las fuentes móviles y a partir de un modelo matemático realiza sus proyecciones de emisiones.

5.1 TECNOLOGÍAS

Las tecnologías a ser comparadas serán representadas por un modelo particular de vehículo cada una. En adelante, al hacer referencia a cada tecnología se estará haciendo referencia a estos modelos en particular:

- **Bus Diésel Euro V (Caso Base):** Bus Diésel Volvo B7R. Se utilizó como caso base este bus ya que de no existir una visión a largo plazo que incentive el

recambio tecnológico, lo más probable es al ir terminando los plazos de concesión se mantenga la inercia al renovar los contratos, cumplir con la exigencia mínima de emisiones, lo cual significa la compra de buses de Norma Euro V.

- **Trolebús:** Busscar Urbanus Pluss LF Trolebús. Esta tecnología ha funcionado con buenos resultados en Brasil, consiste en buses de ruedas neumáticas que se alimentan por medio de una conexión por contacto con una red de catenarias a lo largo del recorrido que le suministra energía eléctrica
- **Bus Eléctrico:** BYD K9. Son buses que operan con energía eléctrica y tienen una capacidad de carga de 324 [kWh] equivalente a una autonomía de 277 [km] en carretera, 251 [km] general y 200 [km] en ciudad. Requiere ser cargado durante 5 horas para completar su carga.
- **Híbrido en Paralelo:** Volvo 7900 Híbrido Parallel. Los buses híbridos en paralelo en su eje de tracción cuentan con un motor de combustión interna y uno eléctrico, de esta forma, dependiendo de los ciclos de conducción se accionan para dar la propulsión al vehículo.
- **Híbrido en Serie:** Citea SLF-120/hybrid. Los buses híbridos en serie utilizan el motor a diésel únicamente para cargar las baterías y es el motor eléctrico el único que propulsa el bus.

En el anexo 8 se pueden apreciar fotos de cada modelo.

5.2 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR RECORRIDOS APTOS PARA LA MOBILIDAD ELÉCTRICA

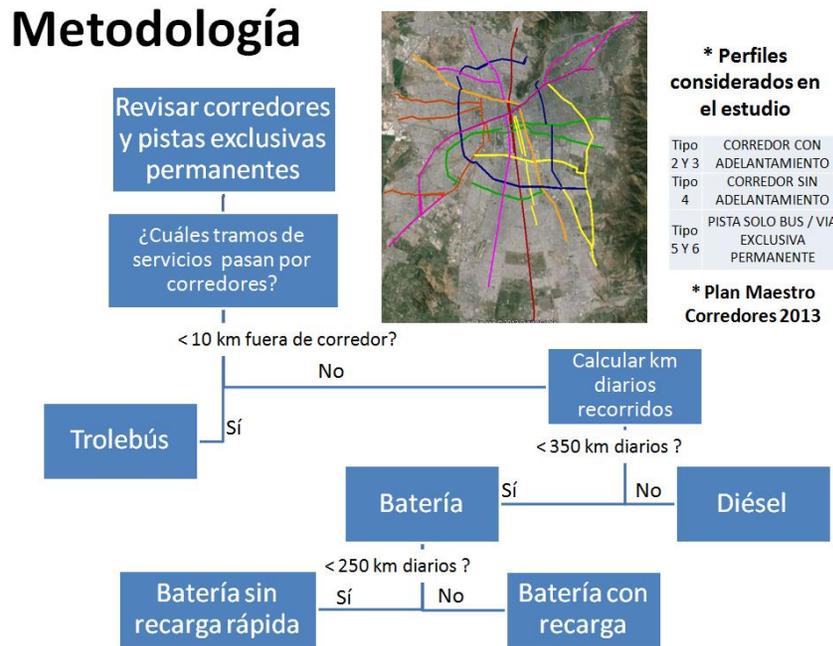
Se tratará de una flota con 3 tipos de tecnología, la forma para determinar la porción de cada una en la flota total de Transantiago es la siguiente:

- Trolebuses en todos los servicios con circuitos que recorran las avenidas que para el 2020 cuenten con corredores exclusivos de buses y que en sus recorridos no se recorran más de 10 [km] fuera de los corredores.
- De los servicios restantes, los que recorran una distancia mayor a 350 [km] al día serán buses diésel Euro V.

- Y aquellos recorridos de menos distancia serán efectuados por buses eléctricos, 619 buses, de los cuales los que recorran más de 250 [km] requerirán una estación de recarga rápida diaria para completar su servicio.

En el diagrama siguiente se expresa lo anteriormente descrito:

Figura 5: Metodología



[Fuente: CMMCh, elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

Respecto a la estimación de costos, el modelo entrega una comparativa de una flota tipo de buses para las diferentes tecnologías. Luego, considerando el ahorro de costos de cada bus para cada tecnología, y teniendo el número de buses totales de cada tipo se puede estimar el ahorro en costos.

5.3 BEST BUS MODEL

“Best Bus Model” es un instrumento desarrollado de por la Universidad de Duke, EEUU, que permite evaluar la totalidad de los costos y emisiones asociadas a una flota de buses sobre el total de su vida útil usando diferentes tecnologías de propulsión.

El modelo está diseñado de manera que el usuario puede ingresar virtualmente todos los datos de costos, sueldos y tasas y se generan resultados con los costos de operación, además del nivel de emisiones asociados.

Se tomó el modelo y se adaptó para las tecnologías antes descritas y se le hicieron las siguientes modificaciones:

- Se quitaron los outputs relacionados con emisiones: ya que la tecnología eléctrica tiene cero emisiones directas. Y las emisiones por parte del caso base (buses diésel euro V) se calcularán por medio de otra herramienta luego descrita.
- Se adecuó para que considerara sólo buses tipo B2 (12 metros): Transantiago operó con buses articulados para ahorrar costos en salarios de conductores, pero el rendimiento de los motores en los chasis articulados bajó hasta 1,1 [km/lt] (un bus Euro V tipo B2 tiene un rendimiento de 2,4 [km/lt]) resultando en un incremento de costos en lugar de un ahorro.
- De los gráficos que disponía el modelo, se conservó sólo el asociado con el costo total de operación en el tiempo ya que es el que persigue la adaptación del modelo.

En el anexo 2 y 3 se puede ver como se modificó la estructura de cálculo del modelo. A continuación se muestra una tabla comparativa que indica todas las modificaciones que se realizaron para la adaptación:

Tabla 5: Adaptación del modelo “Best Bus Model”

	Adaptación de "Best Bus Model"	
	"Best Bus Model"	Adaptación
Cuantifica	Costos - Emisiones	Costos
Buses	Base Diésel - Biodiesel - Biodiesel con Filtro - Gas Natural - Clean Diésel - Híbridos en Paralelo - Híbridos en Serie	Base Diésel - Híbridos en Paralelo - Híbridos en Serie - Eléctricos - Trolebuses
Longitud Buses	35 o 40 [Pies]	40 [Pies] (buses B2)
Tipo de Buses	Rígido o Articulado	Rígido
Vida Útil	No se pueden asignar diferentes vidas útiles a cada tipo de bus	Se pueden asignar diferentes vidas útiles a cada tipo de bus
Compra de Buses	Considera una compra	Considera las compras necesarias en el tiempo de acuerdo al horizonte
Catenaria	No incluye este costo de infraestructura	Incluye estructura de costos de catenaria proporcional al costo de la energía
Baja del Precio de Baterías	Ni incluye decremento del precio de baterías	Incluye tasa de decremento de baterías
Flujo de Costos de Energía	No incluye estructura de costos para energía eléctrica	Incluye estructura de costos para energía eléctrica
Horizonte	Fijo para la duración de los buses	Ajustable
# Tipos de Diésel	2	1
Valores Predefinidos	Sí	No
# Pestañas	26	8

[Fuente: Elaboración Propia]

5.4 FUENTE DE LOS DATOS

Los datos utilizados para alimentar los inputs del modelo fueron extraídos de las siguientes fuentes de información:

- BC: Banco Central, utilizado para calcular diferentes tasas anuales, calculadas en base al periodo noviembre 2012 – noviembre 2013. En particular se utilizó,

el índice general de remuneraciones (IGR), índice de precio del consumidor (IPC).

- DTPM: Directorio de Transporte Público Metropolitano año 2013 [Información proporcionada al CMMCh]
- BYD: Estudios desarrollados por la firma BYD año 2012. Empresa productora de autos eléctricos en China que en sus inicios se dedicaba al desarrollo, innovación y fabricación de baterías de alto rendimiento.
- FC: Reporte Fundación Clinton Climate Initiative: “Las Tecnologías de Bajo Carbono pueden Transformar Las Flotas de Buses en Latinoamérica”
- DOE/EIA: Departamento de Energía y la Agencia de Información de Energía de EEUU, pronósticos de precio de petróleo realizados en diciembre de 2009.
- FAB: Fabricantes de buses Volvo, BYD, Busscar y VDL Bus & Coach.
- BRA: Información de la experiencia con trolebuses eléctricos en Brasil.
- MAT: Entrevista a Matthew Barth, Director del Centro de Investigación Tecnológica Ambiental. 25 de noviembre 2013.
- AIR: Resultados del análisis de TSANT en AIRVIRO.

Los datos referentes a las emisiones de los servicios intervenidos fueron levantados por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos del CMMCh y se generaron a partir de la aplicación TSANT¹⁰, que es una extensión del sistema de Gestión de Calidad del Medioambiente, AIRVIRO.

AIRVIRO permite describir la complejidad de la realidad ambiental, facilitando la toma de decisiones respecto de cómo mejorar la calidad del aire por medio de inventarios de emisiones, monitoreo de calidad del aire y modelos de dispersión de contaminantes.

La extensión TSANT importa a AIRVIRO la información de operación de los diferentes servicios de Transantiago incluyendo los diversos ciclos de conducción para fechas específicas y permite medir el nivel de emisiones para diferentes contaminantes. En el anexo 9 se diagrama la arquitectura de alimentación de datos de TSANT y su integración en AIRVIRO [19]

¹⁰ TSANT: Aplicación desarrollada por el CMMCh y la empresa sueca APERTUM

La fuente de los datos que alimentan a TSANT proviene del DTPM, datos de operación de los buses alimentadores, troncales, sistema GPS de Transantiago y la información disponible de recorridos.

5.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Siendo el sistema de buses diésel Euro V, trolebuses y eléctricos diferentes en cuanto a infraestructura y operación, para poder contrastar las tecnologías se deben tener claras las diferencias de cada sistema:

- Los trolebuses requieren del trazado de una catenaria, la cual alimenta con energía eléctrica el motor propulsor de los vehículos.
- Los buses eléctricos poseen baterías que representan alrededor de la mitad del costo del bus, se recargan en 5 horas y requieren ser renovadas cada 2000 a 7000 recargas diarias¹¹. Según los fabricantes esto supondría una vida útil cercana a los 20 años pero esta tecnología de baterías litio fierro lleva funcionando cerca de 2 años en buses en las ciudades de Shanghai y Shenzhen. Los expertos señalan que no es prudente asumir la vida útil que declaran los fabricantes.
- La autonomía del bus eléctrico descrita por el fabricante es válida para recorridos de una pendiente media menor a un 5%. En servicios de pendiente mayor la autonomía disminuye dependiendo del recorrido. No obstante la experiencia en Bogotá hecha por el programa que impulso la Fundación Clinton, demostró un buen funcionamiento en pendientes más pronunciadas. Vale decir, que es factible utilizar la tecnología en pendientes mayores considerando una disminución de la autonomía descrita de fábrica.

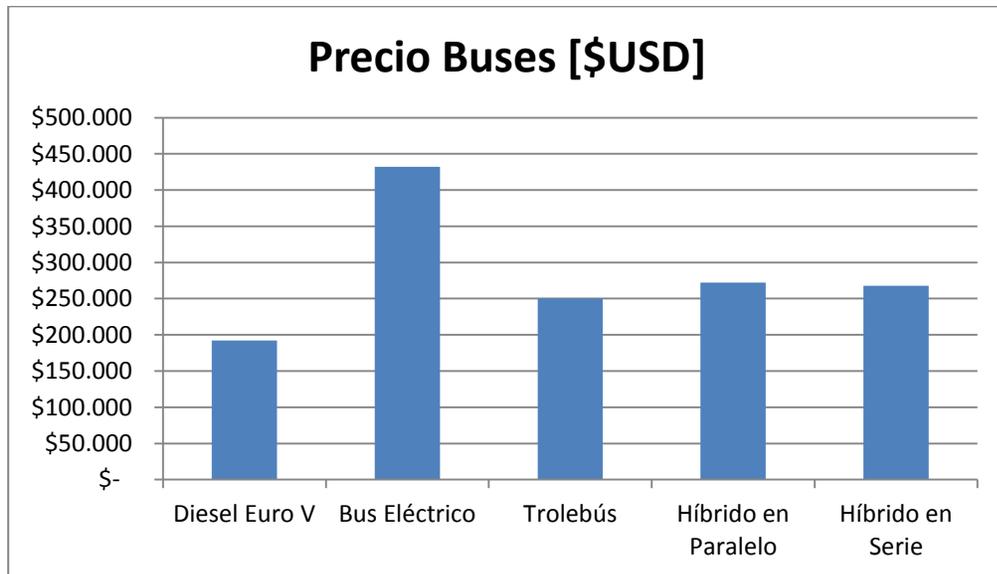
Luego el modelo a estructurar requiere que se comparen las diferentes tecnologías dentro de una flota de buses tipo para un horizonte de tiempo ajustable que fue fijado a 20 años. Se ingresan los siguientes datos obtenidos a partir de las fuentes descritas:

¹¹ En la ficha técnica del vehículo a utilizar (BYD K9) se describe una capacidad de recarga de entre 2000 a 7000 ciclos hasta bajar a un 80% de la capacidad original.

5.5.1 COSTOS DE CAPITAL

- Compra de Buses (FAB):
 - Bus Diésel Volvo B7R: 192.000 [\$USD]
 - Busscar Urbanus Pluss LF Trolebús: 250.000 [\$USD]
 - BYD K9: 432.000 [\$USD]
 - Volvo 7900 Híbrido Paralelo: 272.000[\$USD]
 - Citea SLF-120/hybrid: 268.000 [\$USD]

Gráfico 13: Precios de Buses



[Fuente: Elaboración propia con datos de los fabricantes (FAB)]

- Costo de baterías (BYD): 216.000 [\$USD]
- Estaciones de Carga (MAT): 500 [\$USD]
- Catenaria (BRA): Según la experiencia brasilera el costo de la infraestructura de la catenaria incluyendo el cableado y las subestaciones, el costo por km es de alrededor de 800.000 [\$USD/km]

5.5.2 COSTOS DE OPERACIÓN

- Costos de mantención por unidad de longitud recorrida por bus (FAB):
 - Bus Diesel Volvo B7R: 0,257 [\$USD/km]
 - Busscar Urbanus Pluss LF Trolebús: 0,030 [\$USD/km]
 - BYD K9: 0,032[\$USD/km]
 - Volvo 7900 Híbrido Parallel: 0,089[\$USD/km]
 - Citea SLF-120/hybrid: 0,091 [\$USD/km]
- Salarios de Personal (DTPM).
 - Choferes: 6,0 [\$USD/hr]
 - Mecánicos: 8,0 [\$USD/hr]
 - Choferes Híbridos¹²: 7,2 [\$USD/hr]
- Propulsión, costo de diésel y energía:
 - Energía: tomando el valor tarifario de Chilectra de agosto 2013 para la zona BT-4, Área 1^a: 0,096 [\$USD¹³/kWh]
 - Diésel (CNE¹⁴): Considerando el promedio mensual del último mes en del diésel se tomó como precio: 4,69 [\$USD/lt]

5.5.3 DATOS DE OPERACIÓN

- Velocidad media en servicio (AIR): 21 [km/hr]
- Kilometraje anual por bus (AIR): 84.000 [km]

¹² Los fabricantes de buses híbridos señalan que para la duración de los buses y alcanzar su rendimiento máximo se requiere capacitar a los choferes y el salario es de alrededor de un 20% superior a un chofer de bus corriente.

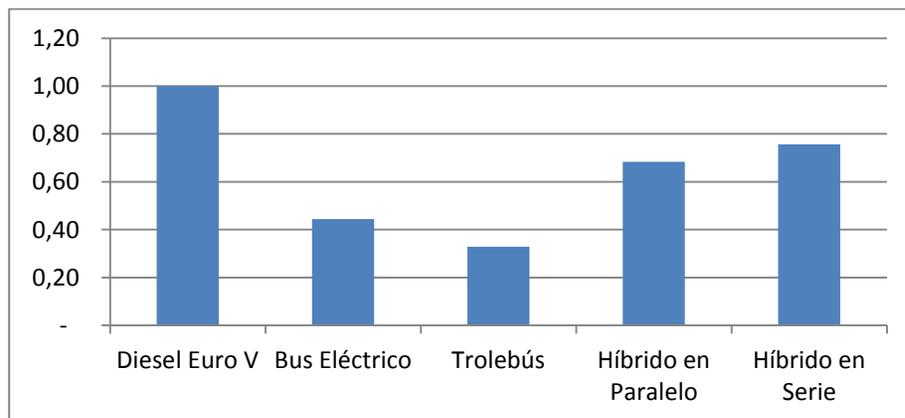
¹³ Los precios cuya fuente se entrega en pesos chilenos se expresaron en dólares utilizando el tipo de cambio 1[\$USD] = 517,65 [\$CLP] (19 de agosto de 2013, 17:56hrs)

¹⁴ Comisión Nacional de Energía: SISTEMA DE INFORMACIÓN EN LÍNEA DE PRECIOS DE COMBUSTIBLES, <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=7> consultado el 12 de octubre de 2013.

- Potencia de las estaciones de recarga (BYD): 64 [kW]
- Rendimiento (FAB):
 - Caso Base: 0,41 [lt/km]
 - Trolebús: 1,20 [kWh/km]
 - Bus Eléctrico: 1,62 [kWh/km]
 - Bus Híbrido en Paralelo: 0,28 [lt/km]
 - Bus Híbrido en Serie: 0,31 [lt/km]

Al comparar los rendimientos en unidades energéticas equivalentes para mover el vehículo una distancia determinada, y normalizadas para el rendimiento del caso base, se puede ver en el gráfico 18 que la mayor eficiencia está en los trolebuses, seguidos de los buses eléctricos, paralelos en paralelo y finalmente paralelos en serie.

Gráfico 14: Eficiencia Energética [energía/distancia]



[Fuente: Elaboración propia con datos de los fabricantes (FAB)]

5.5.4 Datos de Tasas:

- Inflación salarial nominal (BC, IGR): 5,57%
- Inflación de materiales (BC, IPC): 2,37%
- Inflación de Diésel (DOE/EIA): 2%

- Inflación de Energía (supuesto): 1%
- Tasa de Crédito (supuesto): 7%
- Tasa de descuento (supuesto): 6%

5.6 RESULTADOS

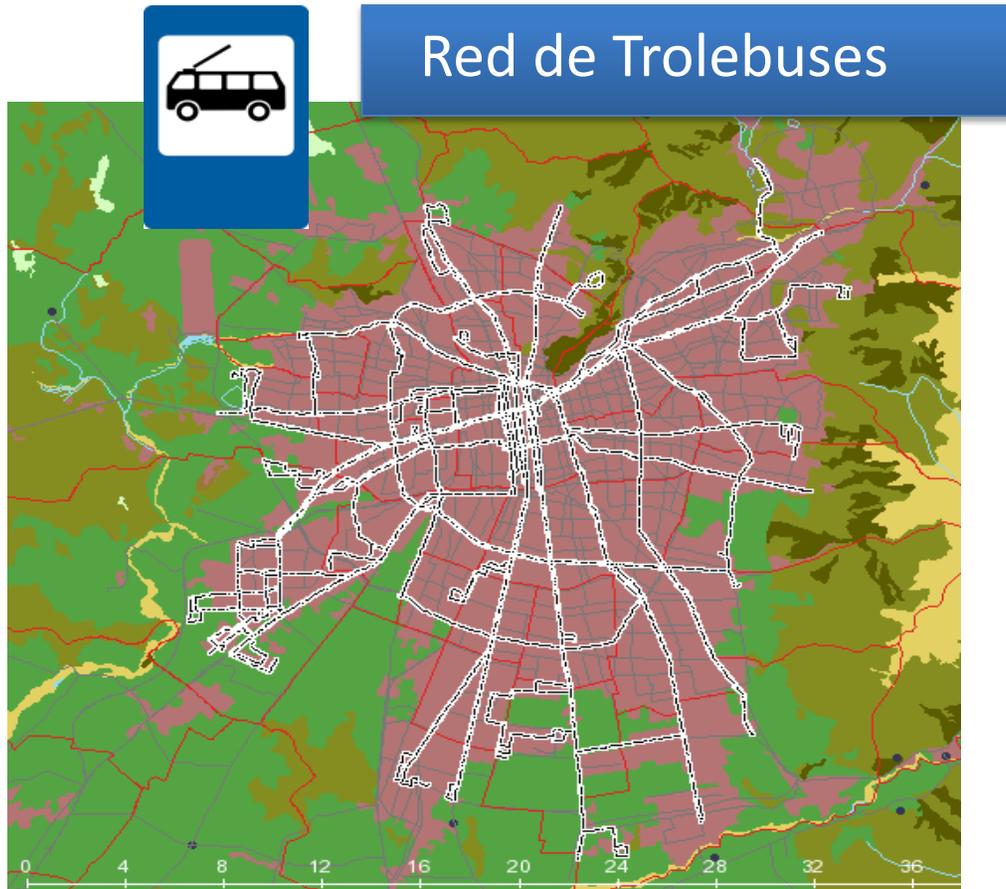
Trolebuses: Utilizando la información proporcionada al CMMCh por SERVIU respecto del Plan Maestro de Corredores, y cruzando esta información con el sistema de información TSANT la cantidad de servicios que operarían son 56 reuniendo un total de 1502 trolebuses.

Tabla 6: Servicios de Trolebús

Trolebuses	
Servicio	Nº Servicios Trolley
100	8
200	20
300	2
400	22
500	4

[Fuente, CMMCh por medio de la herramienta TSANT, AIRVIRO elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

Figura 6: Red de Trolebuses



[Fuente, CMMCh por medio de la herramienta TSATN, AIRVIRO, elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

Dada la planificación de corredores que abarca un total de 434 [km] de infraestructura, se deben construir un total de 894 [km] de trazado de catenaria ya que debe ir en ambos sentidos e incorpora ciertos segmentos adicionales necesarios para la operación.

A continuación se muestra el estado de avance de la construcción de corredores en la capital:

Tabla 7: Plan Maestro de Corredores 2020

Plan Maestro Corredores	
Estado	Longitud Ejes [Km]
Corredores ejecutados	54,9
Otras prioridades ejecutadas	17,0
En Ejecución	8,7
Propuesta por ejecutar 2014-2018	44,8
Propuesta por Ejecutar 2019 en adelante	308,5
TOTAL (km)	433,9

[Fuente: SERVIU (octubre, 2013)]

Buses Eléctricos: Un total de 69 servicios podrían ser realizados por buses eléctricos, 34 no requerirían una recarga rápida de baterías y 35 sí lo emplearían:

Tabla 8: Buses Eléctricos

Servicios que no requieren carga rápida		Servicios con estaciones de carga rápida	
Servicio	Nº	Servicio	Nº
100	1	100	3
300	1	200	2
400	12	300	5
500	3	400	1
C	3	C	3
D	1	E	15
F	4	H	2
I	4	I	3
J	5	J	1
Total	34	Total	35

[Fuente, CMMCh por medio de la herramienta TSATN, AIRVIRO, elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

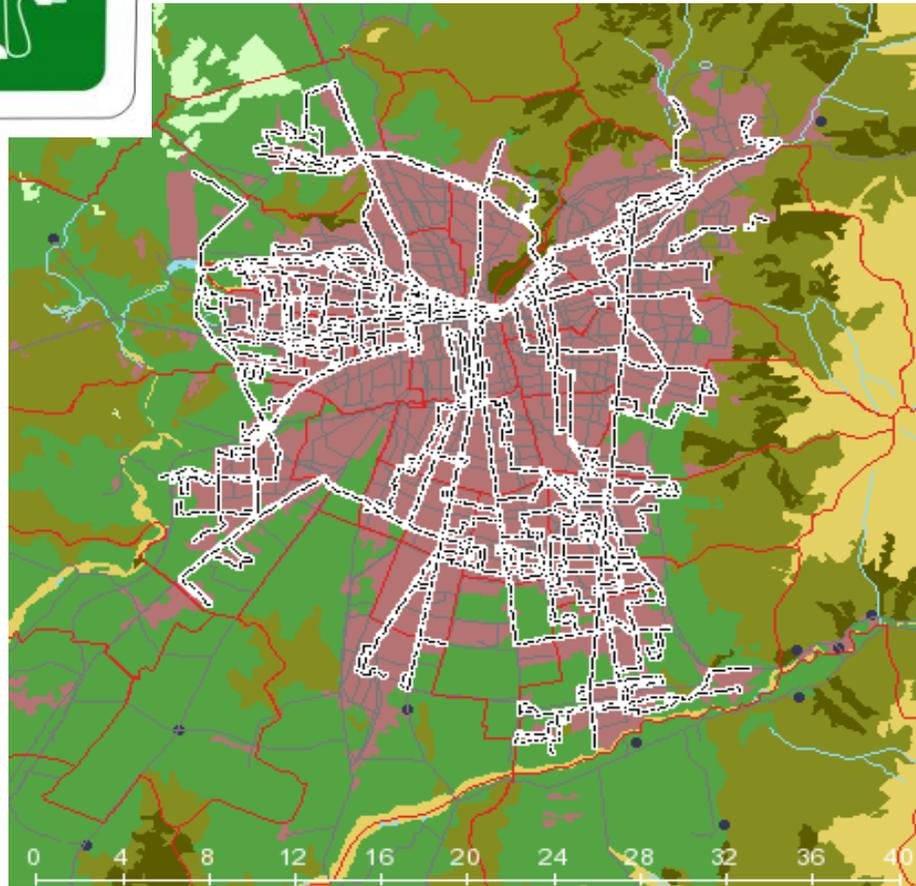
La operación de los buses eléctricos considera:

- Todos los buses recargan sus baterías durante 5 horas en las noches en los depósitos.
- 51% del total requieren terminales con estaciones de recarga rápida (50% de su capacidad) para cumplir con la autonomía de 350 [km/día]
- 6 estaciones de carga rápida son compartidas por varios servicios que operan con movilidad eléctrica.
- 19 estaciones de recarga rápida que sirven solamente a un servicio específico, las cuales no comparten terminales con otros servicios de buses eléctricos.

Figura 7: Red Buses Eléctricos



Red de Buses Eléctricos

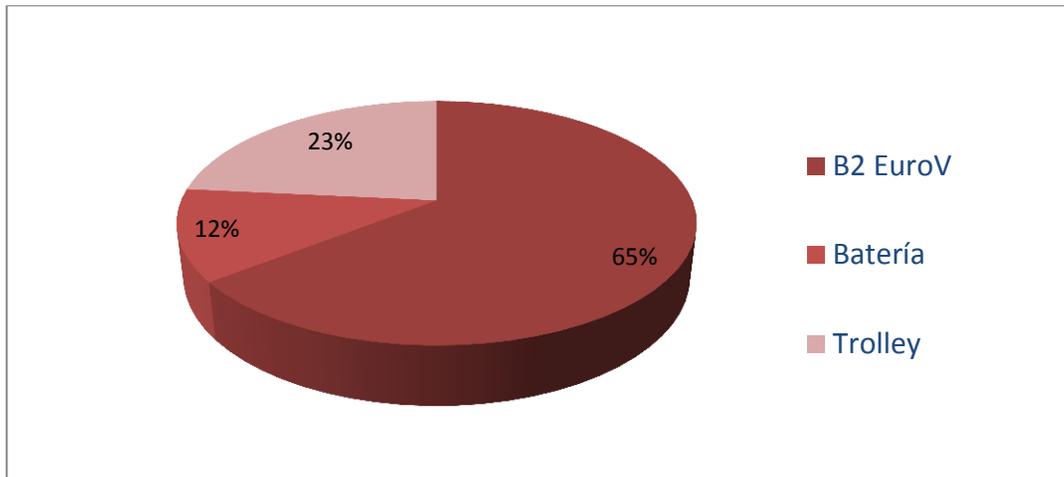


[Fuente: CMMCh, elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

Respecto al consumo energético, al incorporar los 1502 trolebuses estaría incurriendo en un consumo anual total de 140,6 [GWh/año] y la operación de 775 buses eléctricos consumiría 65,2 [GWh/año], sumando un total de 200 [GWh/año] aproximadamente, equivalente al 51% del consumo total de Metro Santiago el 2012. El SIC generó el 2012 un total de 48.795 [GWh/año]

En resumen, el parque de buses de Transantiago tendría 1502 trolebuses, 775 buses a batería y 4158 buses diésel Euro V:

Gráfico 15: Composición de Flota 2020

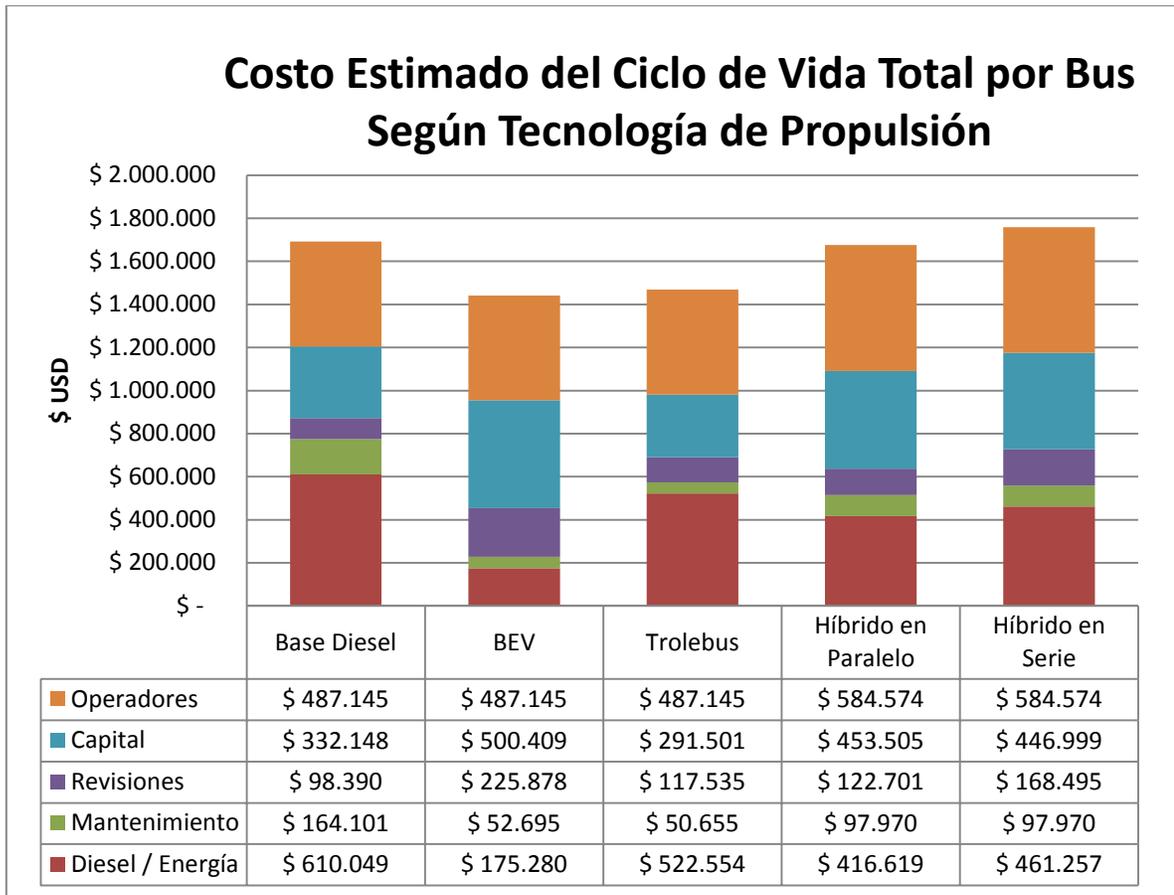


[Fuente: CMMCh, elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

5.6.1 FLOTA TIPO

Considerando una flota de 15 buses, y corriendo el modelo de costos con todos los datos descritos y asumiendo que el financiamiento de la catenaria es subvencionada un 33% por el estado y el resto se financia por medio de un *fee* proporcional al consumo energético, los resultados de los costos para un horizonte de tiempo de 20 años son los siguientes (el detalle se encuentra en el anexo 12):

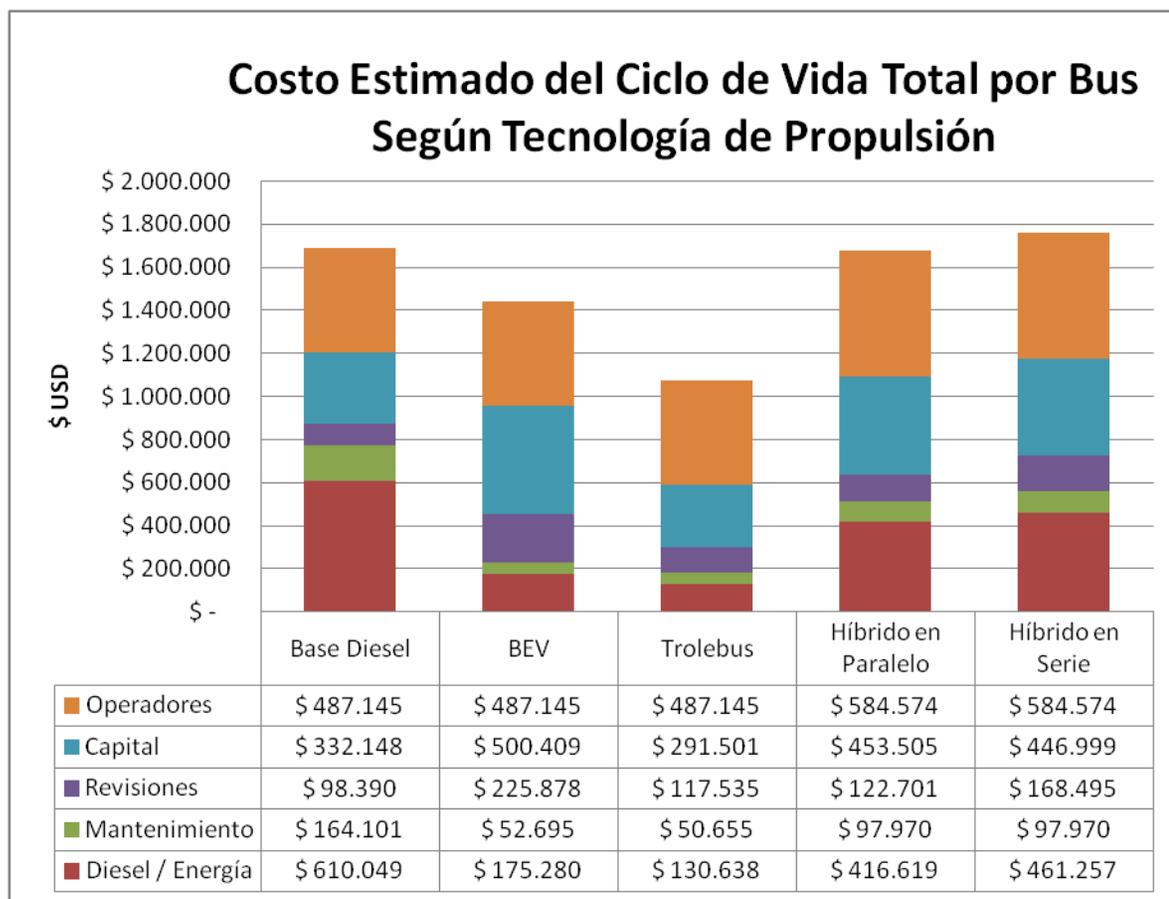
Gráfico 16: Costo Ciclo de Vida Total



[Fuente: Elaboración propia]

Si se considera que la catenaria es financiada por el estado, como parte de la infraestructura vial baja considerablemente el costo de operar con trolebuses:

Gráfico 17: Costo Ciclo de Vida Total sin Considerar Catenaria



[Fuente: Elaboración propia]

5.6.2 FLOTA DEL ESCENARIO COMPLETO

Al considerar la línea base los buses diésel Euro V, el ahorro total para cada tecnología es el siguiente:

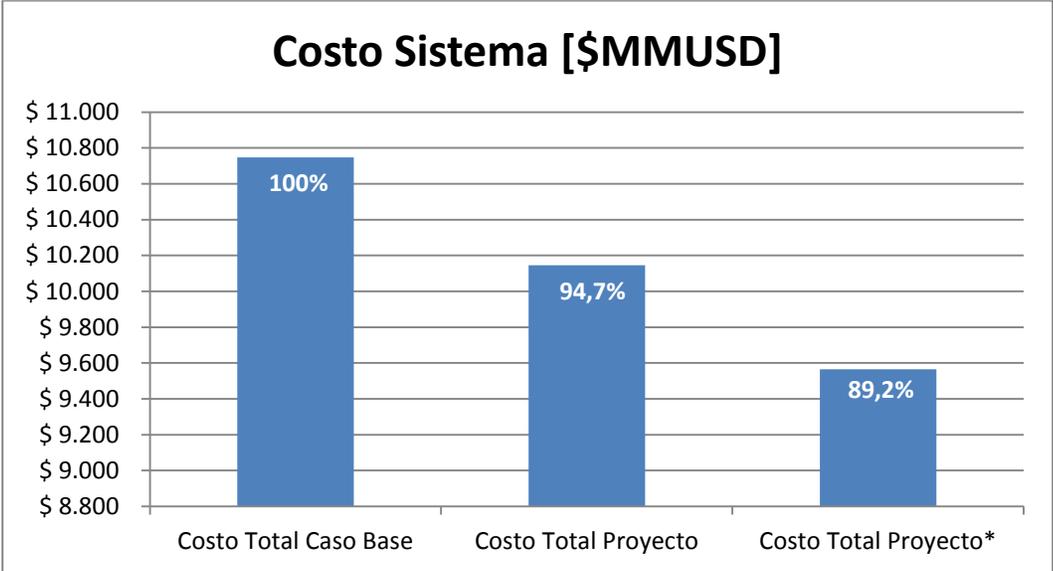
Tabla 9: Ahorro por Bus a un Horizonte de 20 años.

Ahorro por tecnología a 20 años			
Ahorro	Por Bus [\$USD]	#Buses	Total [\$MMUSD]
BEV	\$ 309.690	775	\$ 240,0
Trolebús	\$ 222.444	1502	\$ 334,1
Trolebús*	\$ 614.360	1502	\$ 922,8

[*Considerando que el gobierno financia la catenaria. Fuente: Elaboración propia]

Al comparar con los costos totales, la introducción resultaría en un ahorro para el sistema de transporte:

Gráfico 18: Costo Total Sistema de Transporte



[*Considerando que el gobierno financia la catenaria. Fuente: Elaboración propia]

5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SÉNSIBILIDAD

La incorporación parcial de tecnología eléctrica a un horizonte de 20 años significaría una reducción de los costos totales de entre 5% a 10% para el escenario propuesto.

A continuación se muestran las variaciones en el costo del ciclo de vida total a 20 años por bus al variar los parámetros de precio de los buses, precio de energía, mantención, duración de buses, salarios de choferes:

Tabla 10: Análisis de Sensibilidad

Análisis de Sensibilidad por Tecnología			
Disminución de un 20%	Tecnología		
	Diésel	BEV	Trolebuses
Compra Bus	5,2%	9,4%	3,6%
Diésel/Energía	8,5%	2,5%	2,4%
Mantenición	4,1%	1,1%	1,9%
Duración de buses (-40%)	-2,1%	-18,1%	-7,0%
Choferes	9,7%	10,4%	9,8%

[Fuente: Elaboración propia]

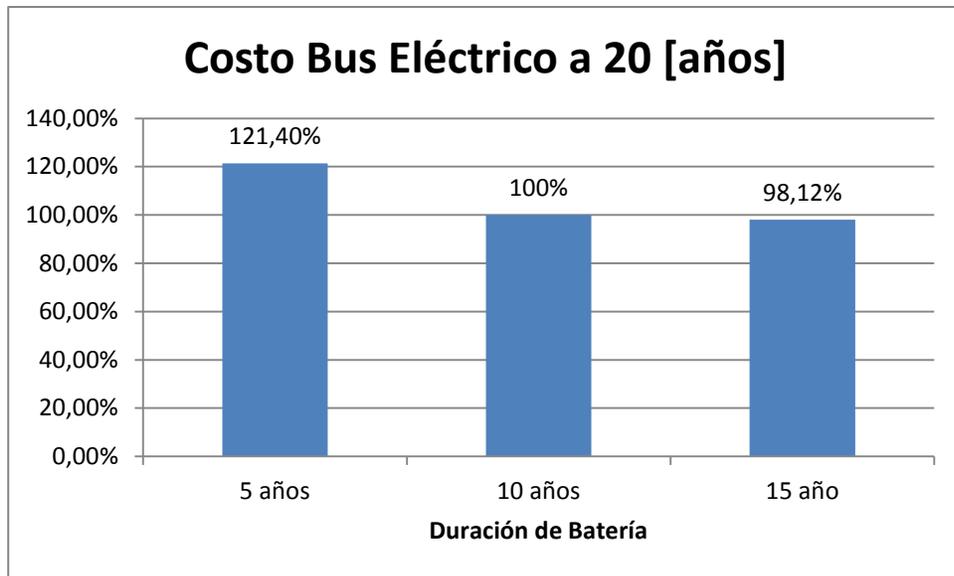
Ante una disminución de un 20% de las diferentes variables se puede apreciar la disminución porcentual del costo de ciclo de vida total a 20 años de cada tecnología.

Se puede ver que las tecnologías eléctricas responden mejor ante variaciones del precio de la energía, esto ocurre porque además de ser más eficientes, el precio por unidad de energía es menor para la electricidad que para el diésel.

También se puede concluir que las bajas en el precio de los buses eléctricos repercutirán de forma substancial en el costo del proyecto total al igual que la duración de los buses, que al disminuir su vida útil en un 40% aumentaría el costo del horizonte para el bus eléctrico un 18,1%.

Respecto a la vida útil de las baterías, los fabricantes aseguran una duración de la batería de 20 años, y los expertos señalan que lo prudente es considerar entre 5 y 10 años. Los cálculos fueron hechos con una duración de 10 años. Al hacer variar la duración de las baterías se tuvo la siguiente variación del ciclo de vida completo a 20 años:

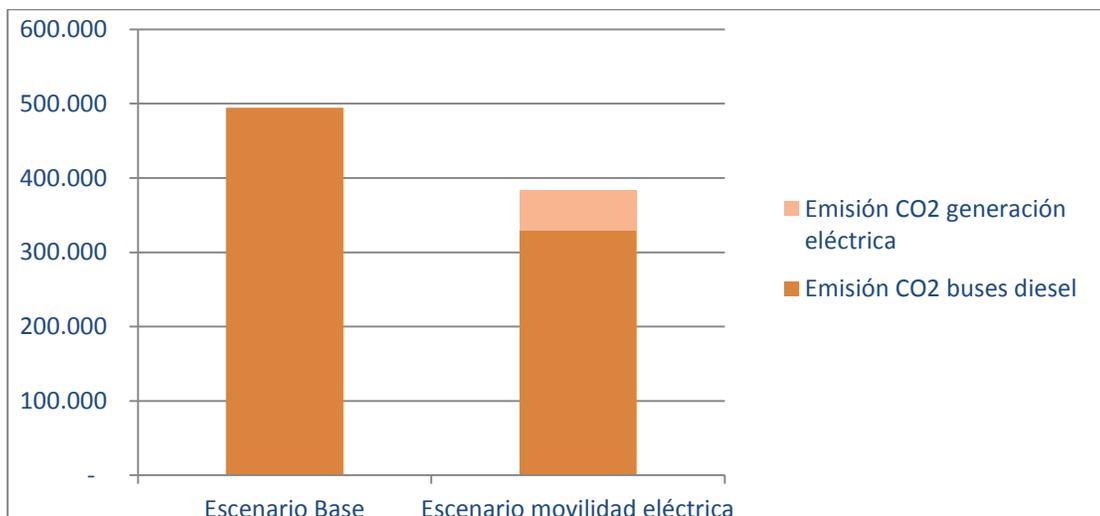
Gráfico 19: Sensibilidad para la Duración de la Batería



[Fuente: Elaboración propia]

Además de significar un ahorro en costos, la participación de la movilidad eléctrica reduciría las emisiones de CO2 equivalente:

Tabla 11: Reducción de CO2e

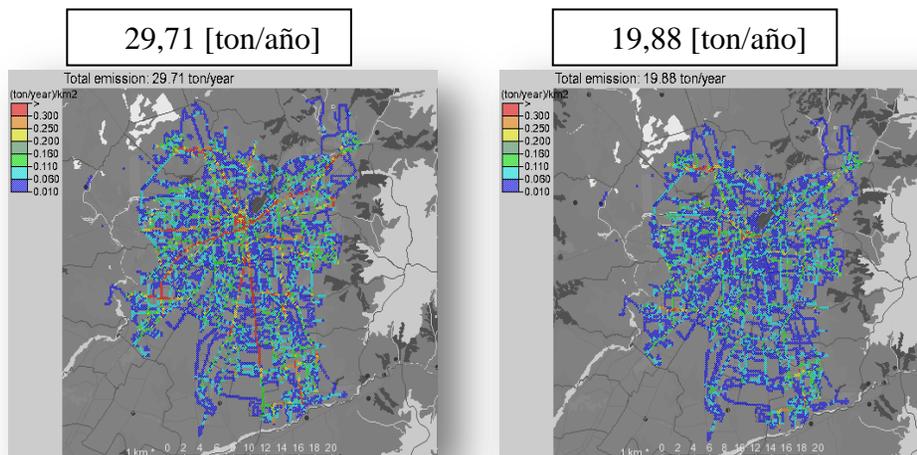


[Fuente: CMMCh utilizando TSANT elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

Si se obtuviesen ingresos por la venta de bonos de carbono, lo cual es factible ya que la contaminación del transporte público afecta directamente a la población, se tendría que sumar el ahorro total de 2,25 [MMton] de CO₂e tomando en cuenta la reducción hasta el 2020, como el análisis de costos fue hecho para un horizonte hasta el 2033, se tendría un ahorro de 7,5 [MMton] de CO₂e.

El mercado del precio de Carbono es variable y depende del precio que se le asigna en cada zona, en febrero de 2013 la tonelada de CO₂ alcanzó un precio record de 13,62 [USD] en el estado de California¹⁵. En diciembre de 2012 en la unión europea¹⁶ se transaba a 6,6 [€/ton CO₂e] y como cota inferior está el caso en que cayó hasta 0,2 [€/ton CO₂e] en junio de 2007¹⁷. Sin embargo, la tendencia es al alza. Si se considera el precio de 7[€/ton CO₂e] el ingreso por la reducción de carbono alcanzaría una recaudación de 52[\$MM€] equivalente a 72 [\$MMUSD] aproximadamente, mejorando en un 0,67% el ahorro total respecto al caso base del proyecto. Y si se considerara un precio como el alcanzado en California serían 140 [\$MMUSD] mejorando un 1,3% el ahorro total del proyecto. Respecto al material particulado reducido al 2020:

Figura 8: Reducción de Material Particulado



[Fuente: CMMCh utilizando TSANT elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

¹⁵ Revista Mercados de Medio Ambiente, <http://www.mercadosdemedioambiente.com/actualidad/la-tonelada-de-co2-en-california-alcanza-un-precio-r-cord/> extraído el 17 de diciembre de 2013

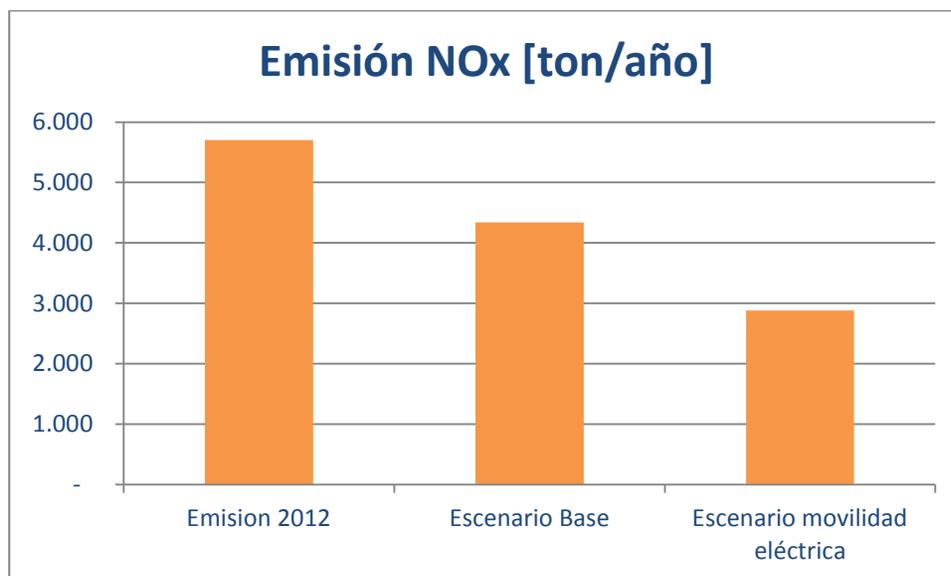
¹⁶ Revista Mercados de Medio Ambiente, <http://www.mercadosdemedioambiente.com/actualidad/el-precio-de-la-tonelada-de-co2-debe-alcanzar-los-150/> extraído el 17 de diciembre de 2013

¹⁷ Revista ideas Sostenibles, <http://xavianet.wordpress.com/2007/06/12/el-precio-del-co2-en-minimos/> extraído el 17 de diciembre de 2013

Esta reducción de un 33% del material particulado contribuirá a alcanzar los niveles de material particulado de la norma primaria que aún no se logra alcanzar.

Y también se tendrán mitigaciones en términos de NO_x al año 2020:

Gráfico 20: Reducción de NO_x



[Fuente: CMMCh utilizando TSANT elaborado por Marcela Castillo, coordinadora de proyectos.]

En conclusión, resulta conveniente en términos económicos y ambientales la introducción tecnológica. El desafío en adelante tiene que ver con la gestión de incertidumbres y generar recomendaciones para que la institucionalidad vinculada con el sistema de transporte público de pasos hacia esta innovación que es una excelente herramienta para mejorar los rendimientos económicos de los operarios de buses, el uso más eficiente y la diversificación de la energía utilizada para el transporte público y la reducción de emisiones.

6. ANÁLISIS SISTÉMICO PARA LA GESTIÓN DE INCERTIDUMBRES Y RECOMENDACIONES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

La mayor parte de esta sección se basa en entrevistas realizadas a expertos de diferentes áreas e información recogida de reuniones con diferentes organismos donde la Propuesta de Movilidad Eléctrica para Santiago (PMES) planteada por CMMCh ha sido presentada y discutida con las autoridades de transporte, un proveedor de buses eléctricos y entendidos en movilidad eléctrica. Los entrevistados y reuniones fueron:

- Reunión Chilectra: Se presentó la PMES. Asistentes: Jean Paul Zalaquett (gerente de innovación y medio ambiente en Chilectra), Orlando Meneses (responsable de Innovación Distribuidoras Latam, especialista gestión de innovación en Chilectra), Gianni López (director CMMCh), Marcela Castillo (coordinadora y ejecutora de proyectos CMMCh), Cristina Valverde (coordinadora y ejecutora de proyectos CMMCh) Javier Mujica (memorista CMMCh). Realizada el lunes 30 de Septiembre de 2013, 16hrs.
- Reunión Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTP): Se presentó la PMES. Asistentes: Diego Puga, Nelson Arriagada (Gerente de Control de la Operación DTP), Felipe Sandoval (Proyect Manager DTP), Gianni López Marcela Castillo, Cristina Valverde y Javier Mujica. Realizada el viernes 15 de noviembre de 2013, 10:30hrs.
- Entrevista a Diego Puga: Gerente de Finanzas Corporativas en el DTP. Realizada el jueves 21 de noviembre de 2013, 9hrs.
- Conferencia con Matthew Barth: Director del Centro de Investigación Ambiental y Tecnología Ambiental de la Universidad de California, Riverside. Fue consultado respecto a aspectos técnicos de PMES. Asistentes: Matthew Barth, Gianni López, Marcela Castillo, Cristina Valverde y Javier Mujica. Realizada el lunes 25 de noviembre de 2013, 15:30hrs.
- Reunión BYD: Proveedor de buses eléctricos, realizada el miércoles 27 de noviembre de 2013, 9:30hrs. Asistentes: Gianni López, Marcela Castillo, Cristina Valverde, Javier Mujica, Rodrigo Sánchez (gerente general BYD Chile) Jimmy Green (jefe comercial BYD Chile) Johann Weiner (subgerente de asistencia técnica BYD Chile).
- Entrevista a Álvaro Henríquez: Fundador PRO5. Ingeniero Civil en Transportes de la Universidad de Chile y Magister en Medio Ambiente Urbano y Sostenibilidad de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona - España. Diplomado en Gerencia Pública y Magister en Gestión y Políticas Públicas en la Universidad de Chile. Realizada el miércoles 27 de noviembre de 2013, 16hrs.

- Reunión Ministerio del Medio Ambiente: Se presentó la PMES. Asistentes: Gianni López, Marcela Castillo, Cristina Valverde, Javier Mujica, Cristian Tolvett, Marcelo Fernández, Roberto Martínez, Gabriel Silva, Nancy Manríquez. Realizada el lunes 9 de diciembre de 2013, 16hrs.
- Entrevista a Sebastián Tolvett: Fundador Sistemas Sustentables. Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Chile, Especialista en Medioambiente y Sistemas Sustentables, Research Engineer, ISSRC. Realizada el miércoles 11 de diciembre de 2013, 9hrs.
- Reunión Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones: Asistentes: Gianni López, Marcela Castillo, Cristina Valverde, Javier Mujica, y miembros del comité de formulación para las nuevas bases de licitación para la renovación de flota del 2016 (ver tabla 1.2.1). Realizada el jueves 12 de diciembre de 2013, 16 hrs.

6.1 AJUSTES NECESARIOS, SALVEDADES E INCERTIDUMBRES

Dentro de los de los datos ingresados al modelo, existen variables que inciden preponderantemente en el costo de ciclo de vida total además de otros elementos que afectan la capacidad de contar con la infraestructura necesaria en los próximos años.

6.1.1 DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGÍA

La disponibilidad de proveedores de buses juega un rol clave ya que dependiendo de la producción de buses y la demanda de países de la región, podrían cambiar los precios de estos.

En los últimos años en Brasil, Sao Paulo Trans, ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas para su transporte público. Hoy en día existen fabricantes de trolebuses en este país y a un precio menor que el de los fabricantes europeos. Este es un elemento clave para poder pensar en la adquisición de los trolebuses para Santiago, años atrás resultaba más costoso ingresar este tipo de tecnología al país dado el elevado precio de los fabricantes europeos y los mayores costos de transporte desde otro continente. Este factor es el que hace posible que el costo de ciclo de vida total considerado en el estudio de costos sea competitivo respecto del diésel.

Respecto a los buses a baterías, la mayoría de los desarrollos a gran escala se encuentran en Asia, los productores europeos el proveedor que aparentemente es más apto es BYD. Se destaca la firma China que inicialmente se especializaba en el desarrollo de baterías, a medidas que se dieron cuenta de que la tecnología que desarrollaron haría posible el aumento de la autonomía de vehículos eléctricos, decidieron realizar una integración aguas abajo y extendieron el *core* de su negocio a la fabricación de autos y automóviles. Su bus K9 ya está presente como parte de las flotas del transporte público de Shangái y Shenzhen, mientras Shenzhen ha tomado la determinación de cambiar el 100% de su flota de buses eléctricos en el corto plazo.

Cabe destacar que al entrevistar a los proveedores de la marca en Chile, se mostraron reticentes a introducir el bus en el transporte público de Santiago, señalando que las exigencias técnicas escapaban de su rango de acción, y donde sí ven mayor posibilidades es en regiones. Este punto da cuenta de que la forma en que se estructuran los actores que manejan el transporte público no logra un fluir ágil que permita la innovación y el desarrollo.

6.1.2 FACTIBILIDAD TÉCNICA

Corredores: Para la implementación de los trolebuses se requiere del cumplimiento de los plazos que ha determinado el MOP que dependen de las unidades ejecutoras MOP/CCOP y SERVIU en cuanto a la construcción de los corredores exclusivos para buses, la información que hoy se maneja describe que de los 433 [km] de corredores planificados para el 2020, sólo un 12,7% se ha ejecutado, ver tabla 6.

La introducción de trolebuses tendrá sentido en la medida que existan los corredores ya que resulta muy complejo el diseño y adecuación de catenarias fuera de un recorrido que no esté segregado.

Baterías: La duración de las baterías se depende de la cantidad de ciclos de carga que puede soportar hasta llegar a una capacidad de carga de un 80% respecto a su capacidad inicial de carga. El bus eléctrico BYD K9 considerado señala que sus baterías de fosfato de hierro y litio poseen 6.000 ciclos de carga hasta antes de llegar a un 80% de su capacidad (ver anexo 4). En teoría, considerando una carga diaria, la batería podría ser

utilizada 6.000 días, lo cual sería equivalente a un total de 20 años funcionando 300 días al año. Sin embargo, las pruebas realizadas a esta batería fueron hechas en un lapso de tiempo de días y no se tiene claridad respecto al comportamiento de los ciclos de carga para un lapso de tiempo más extendido. Hasta la fecha las baterías han funcionado en varios buses en China durante 2 años y no existe certeza respecto a la verdadera duración de estas. Al entrevistar Los expertos recomiendan tomar los datos del fabricante con cierto sesgo debido a la necesidad de venta y que se debe considerar una vida útil de 10 años a lo sumo.

Sinergias con Metro: Muchos de los corredores planificados para el 2020 siguen las diferentes líneas de Metro Santiago. Al instalar la red de catenaria para los corredores donde ocurre esto, las subestaciones de las catenarias se podrían integrar con las del tren subterráneo sinérgicamente. Matthew Barth declaró que no conoce experiencia en otros países donde se haya hecho algo similar, pero sería interesante estudiarlo.

Recarga Rápida de Baterías: La posibilidad de realizar una recarga rápida que complete parcialmente la capacidad de las baterías está considerada dentro de las estimaciones de la propuesta. Existen desarrollos en diferentes países europeos que investigan y están midiendo el funcionamiento de diversas tecnologías: En Suiza el grupo ABB trabaja con un sistema de recarga de contacto ultra rápida (Flash-Charging) capaz de recargar parte importante de la carga en 15 segundos a una potencia de 400 [kW] y una carga completa en 4 minutos. El modelo la empresa suiza Opbrid realiza recargas rápidas de 5 a 10 minutos al inicio y al final de cada recorrido. Existen además buses de recarga vía inductiva, que pueden cargar el bus sin necesidad de que este se detenga y sin necesidad de contacto, sin embargo al consultar con expertos, se piensa que no tendrá mayor desarrollo debido a una gran pérdida de eficiencia energética durante el proceso inductivo además de generar gran interferencia con las redes móviles.

Matthew Barth, señala que considerando que los sistemas de recarga rápida están en desarrollo no sería conveniente incorporar esta tecnología en una primera etapa por lo que el número de buses eléctricos se vería reducido a la mitad. Esto significa que el ahorro en costos vinculados con la flota de buses eléctricos se reducen en un 50% aproximadamente, ya que alrededor de la mitad de los servicios requerían la recarga.

Pendiente de Recorridos: Matthew Barth indicó que al incorporar buses eléctricos deben ser testeados en recorridos de diferentes pendientes. Esto ya que la autonomía

varía con recorridos con pendientes superiores a un 5%. Señaló que tomando datos para una muestra, es posible predecir la autonomía para perfiles de elevación de otros servicios con recorridos similares utilizando un modelo de autonomía.

Adelantamiento de Trolebuses: Antiguamente si un trolebús fallaba toda la red asociada a ese circuito se veía afectada, Jean Paul Zalaquett destacó que actualmente existen sistemas que permiten adelantamiento de una forma similar a la que emplean los trenes.

Trolebuses por Circuito de Catenaria: En cada circuito de catenaria pueden operar un máximo de 30 trolebuses, dada la potencia a la cual puede operar el servicio de catenaria.

Transferibilidad: Como los buses deben ser recargados con su respectivo cargador que funciona a una determinada potencia, no es necesariamente un bien transferible, tiene sentido su funcionamiento dentro de un sistema determinado.

6.1.3 TASAS

Se consideraron tasas asociadas a los precios de los insumos, inflación salarial, al costo de la energía y el diésel, a la disminución del costo de baterías en el tiempo y al crédito para la adquisición de buses.

Si bien se trata de muchas variables que introducen incertidumbre, las variaciones en su conjunto suman mayor incertidumbre para el caso base. Un aumento en la tasa de crédito y en la inflación salarial afectan en igual medida. Sólo un alza en el precio de la energía perjudica mayormente a la tecnología eléctrica, mientras que para los diésel este cambio le es indiferente. La inflación en utilización de materiales afecta mayormente a los buses diésel ya que requieren mayor inversión en mantención, lo cual implica más cantidad de repuestos. La baja del precio de las baterías es indiferente para el caso base pero beneficia para el caso de la propulsión eléctrica. El aumento del precio del diésel perjudica mayormente al caso base y de forma más pronunciada que lo que el aumento

del precio de la energía incide en los buses eléctricos ya que en su estructura de costos, la porción monetaria dedicada al pago de esta es mucho menor.

Tabla 12: Variación de Tasas

Variación de Tasas		
Tasa	Diésel	Proyecto
Crédito (aumento)	Perjudica	Perjudica
Inflación Salarial	Perjudica	Perjudica
Inflación Insumos	Perjudica	Perjudica
Precio Baterías (baja)	Beneficia	Beneficia
Precio Energía (aumento)	Indiferente	Perjudica
Precio Diésel (aumento)	Perjudica mayormente	Indiferente

[Fuente: Elaboración propia]

6.2 TÉRMINOS CONTRACTUALES

Desde el inicio de Transantiago, la prestación del servicio de deponer y operar la flota de buses se licitó a empresas privadas, las cuales operan flotas en determinados sectores del país (ver anexo 1). Las distintas empresas reciben ingresos por la cantidad de pasajeros transportados y los kilómetros recorridos, además de sufrir un descuento según su desempeño en cuanto a capacidad, calidad de servicios, y frecuencias de servicio. Los cobros tarifarios a los pasajeros en conjunto con los montos públicos designados para el transporte público alimentan al sistema y financian a las empresas operarias.

En el anexo 10 se puede ver un diagrama que muestra la relación entre las variables tarifarias y de operación, presente en cada anexo de los contratos de concesión. En cada contrato se señala que:

- Una mayor satisfacción de usuarios aumenta la demanda del sistema. aumenta la demanda del sistema.
- La oportuna prestación de oferta impacta positivamente la satisfacción de usuarios.
- La inteligencia de negocio favorece la operación y permite un control de los costos de capital.
- Los ingresos del operador se determinarán esencialmente por las transacciones, las cuales dependerán de la calidad y la cobertura de servicio.

Estos contratos fueron pensados para buses de combustión interna, cuya vida útil, operando un promedio de 300 [km/diarios] es de 12 años aproximadamente. Existen ciertos avances respecto a cómo se debe legislar al operar con buses eléctricos, ya que en los contratos por ejemplo, al estipular el máximo de años que puede operar un bus desde su fabricación se explicita normativa para buses eléctricos:

Tabla 13: Vida Útil Buses por Tecnología

Vida útil de los vehículos de la Flota				
Tecnología de propulsión	Vehículos inscritos y en operación a la fecha de inicio del contrato (a)		Vehículos nuevos inscritos a partir de la fecha de inicio del contrato (b)	
	Kilometraje máximo recorrido	Edad máxima (años desde su fabricación)	Kilometraje máximo recorrido	Edad máxima (años desde su fabricación)
Motor Diesel	1.000.000	no aplica	1.000.000	12
Motor a gas natural comprimido	1.400.000	no aplica	1.400.000	15
Motor híbrido (Diesel-eléctrico)	1.400.000	no aplica	1.400.000	15
Sistema eléctrico	1.800.000	no aplica	1.800.000	20

[Fuente: Contrato de concesión, Unidad de Negocio N°1, Inversiones Alsacia S.A. anexo 4]

Además en el mismo anexo, se describe que los plazos de concesión podrían llegar a ser extendidos a un máximo de 3 años al realizar un recambio de un bus de menores emisiones. Sin embargo, al momento de determinar el valor de pago por kilómetro recorrido (PK), sólo se señala para tecnología diésel y describe que de requerirse valores de PK para buses cuya tecnología no esté comprendida, el Ministerio generará la estructura de costos que corresponda y definirá los respectivos valores.

Es importante señalar que aunque existe el incentivo de la ampliación de la duración de los contratos de concesión por reducir las emisiones, resulta difícil para los operadores estimar la conveniencia económica de ingreso de nuevas tecnologías al no tener claro el valor del precio por kilómetro. Además, en el contrato se señala que el valor a pagar por kilómetro para otras tecnologías será en base a la estructura de costos y se puede inferir

que, dados los costos de operación y mantención más bajos, el PK a asignar a tecnologías eléctricas sería más bajo. Bajo este supuesto se puede concluir que la forma como se estructura el sistema de transporte distorsiona los incentivos y los beneficios económicos del cambio tecnológico no logran ser percibidos por los operarios de buses que son los que deben comprar los buses.

Otro elemento interesante es el destacado por Gianni López (ver figura 2, capítulo 1), él describe que los buses utilizados en la primera licitación de Transantiago siguieron todo un proceso contractual que hizo que los buses que operan actualmente están desfasados por más de 10 años. Destaca que las normativas ambientales para vehículos pesados están incorporando nuevas dimensiones a nivel internacional, como lo es la del rendimiento de los vehículos y que es preciso planificar el transporte público a largo plazo para no continuar desfasados tecnológicamente si además ya se cuenta con proveedores y la factibilidad técnica de dar pasos hacia un mayor desarrollo.

6.3 FACTIBILIDAD POLÍTICA

Otro punto a tener en consideración, considerando que se avecina un cambio de gobierno, el cual será constituido por La Nueva Mayoría. En el programa de gobierno de Michelle Bachelet 2014-2018 se realizan menciones generales que van en una línea que favorecería la implementación:

En la sección de Medio Ambiente, página 126:

“fortaleceremos el rol del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad que impulsará políticas y regulaciones con eje en la sustentabilidad y en concordancia con medidas para hacerse cargo de los efectos del cambio climático.”

Luego en la siguiente página se destaca el cumplimiento de la promesa hecha por Chile el 2009 en la XV Conferencia de las Partes mencionada al inicio de este trabajo:

“El Consejo de Ministros para la Sustentabilidad debe pasar a denominarse “Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático”. Este órgano debe elaborar, con la máxima celeridad posible, un nuevo plan nacional de cambio climático con una visión transversal e integrada, en adaptación, mitigación de impactos y creación de capacidades, orientando las medidas adoptadas hacia una economía baja en carbono que beneficiarán doblemente a Chile: aportarán tanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como a la calidad del aire que respiramos en Chile y a la calidad de vida de los chilenos. Nuestra meta, como mínimo, es cumplir el compromiso de emisiones de gases de efecto invernadero, asumido por Chile el 2009 en la XV Conferencia de las Partes de Cambio Climático.”

Finalmente en la sección de transporte y telecomunicaciones (página 142) se declara:

“(…) crearemos la Autoridad Metropolitana de Transportes para cada área metropolitana.”

“Procuraremos que las personas y también los bienes se transporten de la forma más eficiente posible desde una perspectiva social, fomentando el empleo de aquellos medios que generen menores tasas de contaminación, congestión y accidentes. Invertiremos la totalidad de los recursos para subsidiar el transporte público aprobados por ley, tanto para las comunas donde opera el Transantiago como para el resto del país. De este modo financiaremos programas de renovación de flota, transporte escolar y subsidio para transporte en zonas aisladas, además de incrementar las inversiones en infraestructura vial.

Aceleraremos las inversiones de superficie del Transantiago, tanto en corredores o vías exclusivas como de infraestructura operacional, avanzando en el desarrollo de infraestructura vial y tecnologías de control de flota en Santiago, permitiendo así aumentar la velocidad de estos servicios, disminuyendo los tiempos de espera y de viaje de los usuarios.”

En resumen, el programa de gobierno no tiene la función de especificar y detallar en profundidad las medidas para alcanzar las declaraciones, se habla de impulsar políticas y regulaciones sustentables que se hagan cargo de los efectos del cambio climático.

Se recuerda el compromiso tomado en la Conferencia de las Partes el 2009 y declara la promoción de medios de transporte de bajas emisiones. También se habla de la creación de Autoridad Metropolitana de Transporte, lo cual permitirá organizar de manera menos centralizada la gestión del sistema de transporte, y además se menciona la renovación de las flotas de buses con énfasis en reducir la contaminación, la congestión y los accidentes. Tanto Álvaro Henríquez como Diego Puga señalan que la mención de la Autoridad Metropolitana de Transporte no describe específicamente sus atribuciones y no existen mayores especificaciones que den cuenta de sus facultades para poder coordinar un enfoque sistémico integrado en el cual los intereses y objetivos sectoriales se sometan a un objetivo mayor. Sin embargo, si esta autoridad posee el poder para coordinar a los diversos sectores de forma sistémica, es posible que se logre avanzar de manera más eficiente en materia de descongestión, mejora en la operación del transporte público, eficiencia económica para el sistema de transporte y el nivel de emisiones de contaminantes locales como también de los GEI.

Álvaro Henríquez, respecto a la Autoridad Metropolitana de Transporte, añadió además que si esta autoridad sólo abarca el transporte público se estaría en un error ya que no se puede planificar el transporte público sin considerar el escenario completo de transporte.

Al entrevistar a Sebastián Tolvett, remarcó la importancia de atacar prioritariamente la descongestión de la ciudad dando énfasis al uso del transporte público, tomando medidas que logren entregar una calidad de viaje superior a la alcanzada usando vehículos particulares. Tomando medidas como la implementación de BRT (Bus Rapid Transit, ver anexo 11) entregando más vías exclusivas a los buses y restando a los vehículos particulares. Luego en segunda prioridad atender medidas de reducción de emisiones, zonas de bajas emisiones donde sólo pueden ingresar vehículos con cierto etiquetado, y la incorporación de vehículos menos contaminantes.

Otro factor político relevante señalado por Álvaro Henríquez, es que el gobierno de Michelle Bachelet 2007 – 2009 asumió los costos políticos de la mala implementación del Transantiago, por lo cual es de esperarse que los cambios en materia de transporte público guarden una prudencia pronunciada y no se den cambios sustantivos.

6.4 RESUMEN E INTERVENCIONES CLAVES A REALIZAR

La presencia de **proveedores** va en aumento, este factor en los últimos años ha ido mejorando y dados los beneficios económicos y de reducción de emisiones, lo más probable es que continúe haciéndolo.

En **términos técnicos**, las principales incertidumbres recaen en la presencia de los corredores y en la duración de las baterías. El primer factor impacta en la realización, lo cual afectaría en la postergación de la introducción tecnológica. La vida útil de las baterías sí afecta directamente la factibilidad del proyecto por lo cual el manejo de esta incertidumbre deberá ser bien estudiado en los contratos de concesión y acordar con los involucrados la absorción de este eventual costo.

El **marco contractual** regulatorio del sistema de transporte está diseñado para buses diésel, la introducción de nuevas tecnologías implicará una reestructuración de estos en términos de la duración del plazo de concesión y transfiriendo claramente los beneficios de operar con una tecnología más eficiente económicamente.

A nivel **político** Chile está sujeto a su compromiso realizado en la conferencia de las partes del 2009 de la reducción de un 20% de su huella de carbono. Además forma parte de la OCDE (Organisation for Economic Cooperatio and Development) desde mayo del 2010, lo cual significa que posee el gran desafío de incrementar sustantivamente su nivel de desarrollo. Se avecina la nueva Autoridad metropolitana de transporte, que dependiendo de sus atribuciones podrá articular a los diferentes actores involucrados solucionando la divergencia de diversos intereses sectoriales. Además deberá ser capaz de plasmar una visión a largo plazo, que incluya mayor inversión en investigación y un profundo análisis prospectivo que permita a Chile disminuir la brecha tecnológica que existe contrastando con países desarrollados.

INTERVENCIONES CLAVE

- Desarrollo de un plan estratégico que abarque de forma idónea, las metas de reducción de los tiempos de viaje, mejora en la calidad de servicio del transporte público y reducción de emisiones.
- La futura Autoridad Metropolitana de Transporte debe tener las facultades de dirigir y coordinar a los involucrados, en materia de transporte. Logrando así llevar a cabo un proceso estratégico coordinado de mejora en el sistema de transporte.
- Además, deberá abarcar el total del sistema de transporte, incluyendo al transporte público, vehículos particulares, carga y otros medios emergentes como la bicicleta. Ya que la mejor forma de abordar el desafío en transporte es modelando el sistema completo.
- La prioridad debe ser la descongestión por medio del incentivo del uso del transporte público.
- Reestructurar los contratos de concesión de los operarios de buses incluyendo una modificación en la duración de estos según la tecnología empleada y generando mecanismos que transmitan los beneficios económicos y ambientales de incorporar movilidad eléctrica y otras tecnologías que puedan ser aprovechadas.
- Invertir en investigación y desarrollo visitando experiencia internacional e incorporando diferentes alternativas tecnológicas testeando y midiendo en servicios del Transantiago.
- Incluir subvenciones a buses menos contaminantes y más eficientes. Para el caso de los buses eléctricos, gestionar la incertidumbre de la vida útil de baterías, negociando con los fabricantes y buscar mecanismos que respalden a los operarios que innoven.

7. CONCLUSIONES

La movilidad eléctrica tiene sentido en ciertos servicios del transporte público. Dentro de este conjunto de recorridos es la tecnología más eficiente en términos económicos y ambientales. El mayor desafío no se encuentra en la factibilidad técnica, sino que en la coordinación sistémica de los diversos actores involucrados en la adopción tecnológica.

7.1 EMISIONES

La propuesta de movilidad eléctrica reduce en un 33% las emisiones de material particulado, un 23% las emisiones de CO₂e y un 32% el NO_x considerando un horizonte hasta el 2020.

Sin embargo el problema de la contaminación emitida por el transporte de la ciudad se puede mejorar substancialmente si se toman medidas que favorezcan la descongestión vehicular, ya que al disminuir los tiempos de viaje se reduce el tiempo que tiene cada vehículo para contaminar el aire.

7.2 AHORRO EN COSTOS E INGRESOS ADICIONALES

La incorporación parcial de movilidad eléctrica en aquellos recorridos donde es posible hacerlo implica un ahorro de 607 [\$MMUSD] (5,3% del costo del caso base) si se considera que un tercio de la catenaria es financiada por el estado y de 1184 [\$MMUSD] (10,8% del costo del caso base) si la financia completamente.

Es importante señalar que los análisis incorporan la posibilidad de recarga rápida para cerca de la mitad de los buses a baterías. Según los expertos, la recarga no es factible a corto plazo, mas el horizonte de tiempo del análisis es de 20 años y es razonable suponer que en una primera etapa no se incluirán los servicios que requieran recarga rápida de baterías, pero luego, en una segunda parte se logrará alcanzar la propuesta planteada.

Al realizar un breve análisis del potencial de venta de los bonos de carbono asociado al ahorro en emisiones, se alcanzarían ingresos que fluctúan entre 52 y 140 [\$MMUSD] lo cual mejoraría entre un 0,7% y un 1,3% el ahorro en costos totales del proyecto respecto al caso base. A continuación se muestra un resumen del ahorro total de costos dependiendo del financiamiento de la red de catenarias y la presencia de venta de bonos de carbono:

Tabla 14: Ahorro de Costos Totales

Ahorro respecto al caso base	Proyecto	Proyecto*
Sin venta de bonos de carbono	5,3%	10,8%
Con venta de bonos de carbono a precio regular	6,0%	11,5%
Con venta de bonos de carbono a alto precio	6,6%	12,1%

*[*Considera que el estado financia la infraestructura de la catenaria. Fuente: Elaboración propia.]*

Es importante señalar que teniendo este estudio por objetivo acercar la movilidad eléctrica al *Transantiago*, fue necesario realizar una evaluación del proyecto de manera privada sin incorporar todas las externalidades positivas. Ya que si el proyecto no resultase rentable para los flujos que maneja el sistema de transporte público, como no existen mecanismos que transfieran las externalidades positivas, no se llevaría a cabo dada la orgánica constitucional sectorizada que existe.

Realizando una evaluación social de proyectos, se esperaría que la rentabilidad aumentara significativamente por los ahorros en salud de la población en términos de enfermedades respiratorias y deterioro auditivo, como también en las mejoras de la salud mental debido a la disminución del ruido. Una forma de medir los ahorros sería mediante la utilización de estadísticas históricas de Santiago, o de otros países de geografías similares, para obtener el porcentaje de afectados por enfermedades respiratorias a un determinado nivel de material particulado y de esta forma sería posible cuantificar los ahorros en salud con los datos de disminución de contaminantes obtenidos.

7.3 INTERVENCIONES CLAVE

Resulta factible la introducción de movilidad eléctrica al transporte público de la ciudad. Tras presentar la propuesta al DTM (Directorio de Transporte Público Metropolitano) se inició un asesoramiento de parte del CMMCh para incorporar ciertas modificaciones en los contratos de concesión de modo que algunos de los servicios para de próxima renovación de buses, que se avecina para el 2018, cuenten con la presencia de entre 60 y 100 buses eléctricos. Claramente es un avance, pero sin embargo el desafío pretende una mayor penetración que puede ser facilitada con las intervenciones señaladas.

Las intervenciones a ser realizadas apuntan principalmente a una renovación de la orgánica institucional en que se inserta el sistema de transporte público. Los antecedentes apuntan hacia una institucionalidad que plantee metas definidas y una estrategia a largo plazo coordinada por la Autoridad Metropolitana de Transporte que tenga como objetivo la descongestión de todo el sistema de transporte, el mejoramiento de la eficiencia de la energía utilizada para la propulsión de los vehículos y la reducción de emisiones locales y GEI, por medio de medidas que mejoren el servicio de transporte público, y el fomento de nuevas tecnologías de propulsión más eficientes, económicas, limpias y silenciosas.

Se trata de una labor desafiante dado que la institución pública debe coordinar sus diversas divisiones además de estar estrechamente vinculada con varios sectores. La renovación sistémica debe ser un esfuerzo conjunto en una compleja coordinación. Por lo demás asistiendo a las diversas reuniones y teniendo la experiencia de las entrevistas, se observó que usualmente se tenía más foco en los problemas, frenos, dificultades de coordinación y precauciones más que en buscar mecanismos y herramientas que permitan mejores resultados para los proyectos.

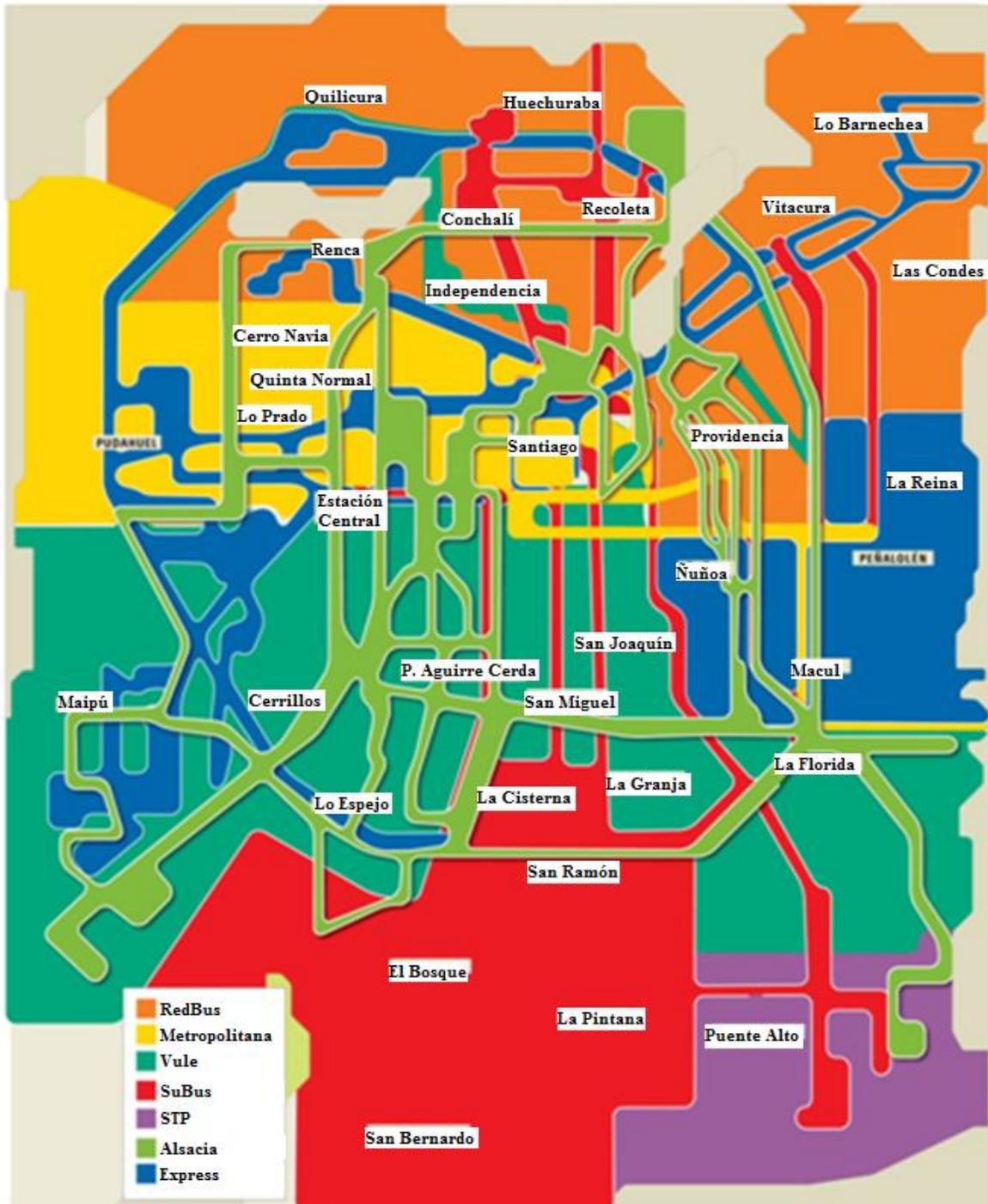
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Centro Mario Molina, «¿Qué es el Cambio Climático?,» 2012.
- [2] P. Mosquera, «El IPCC confirma que apenas queda tiempo para actuar,» *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*, 30 Septiembre 2013.
- [3] Directorio de Transporte Público Metropolitano, «Informe de Gestión 2012,» Santiago, 2012.
- [4] Á. Henríquez, «Factores Determinantes Políticos e Institucionales en el Proceso de Formulación y Toma de Decisiones de Transantiago, Período 2000 – 2004,» Santiago, 2013.
- [5] Massachusetts Institute of Technology, «Light Vehicles Technology Projections 2035,» Massachusetts, 2008.
- [6] Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, «Life Cycle Cost & Emissions Model Alternative Bus Technologies,» 2006.
- [7] R. O’Ryan, «Contaminación del aire en Santiago: ¿qué es, qué se ha hecho, qué falta?,» Santiago, 2006.
- [8] Ministerio del Medio Ambiente, Chile, «Normas de Calidad Ambiental y de Emisión, Planes de Prevención y Descontaminación,» Santiago, 2011.
- [9] Clinton Climate Initiative, C40 Cities Climate Leadership Group, «Low Carbon Technologies Can Transform Latin America's Bus Fleets,» New York, 2013.
- [10] C. A. Pope III y W. D. Douglas, «Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect,» 2006.
- [11] Secretaría General de la Presidencia de la República, *REVISAR, REFORMULAR Y ACTUALIZAR PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA (PPDA)*, 2009.
- [12] Gobierno de Chile, «Informe del Estado del Medio Ambiente 2011,» 2011.
- [13] C. Espinoza, «Cambio climático: Chile debe bajar 35 millones de toneladas de CO2 para 2020,» *La Tercera*, 23 Julio 2013.

- [14] F. Kesicki, «Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis,» 2013.
- [15] McKinsey & Company's Automotive & Assembly Practice, Climate Change Special Initiative, «Transport Abatement Projection 2030,» 2009.
- [16] CMMCh, «Estudio de Oportunidades para el Desarrollo de la Movilidad Eléctrica en la Ciudad de Santiago: Propuesta para el Transporte Público,» Santiago, 2012.
- [17] CMMCh, «Propuesta de Regulaciones Para la Reducción del MP2,5, sus Precursores y Contaminantes que Afectan el Cambio Climático, Para las Distintas Fuentes Estacionarias de la Región Metropolitana,» Santiago, 2013.
- [18] S. N. Stern, «Stern Review on the Economics of Climate Change,» Reino Unido, 2006.
- [19] M. Molina, «Contaminantes Climáticos de Vida Corta,» Santiago, Chile, 2013.
- [20] G. López y R. Alfonso, «Seguimiento Ambiental del Mercado Automotriz Chileno,» 2010.
- [21] Naciones Unidas, «Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 15º período de sesiones, celebrado en Copenhague del 7 al 19 de diciembre de 2009,» 2010.
- [22] Gobierno de Chile, «Estudio para la actualización de la estructura de costos y evaluación del equilibrio económico de los contratos de operadores de vías del sistema de transporte público de Santiago mediante buses.,» 2013.
- [23] CMMCh, «Estudio de Oportunidades Para el Desarrollo de la Movilidad Eléctrica en la Ciudad de Santiago: Propuesta Para el Transporte Público.,» Santiago, 2013.
- [24] M. Osses, «Modelo de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Producidos por Transporte Urbano: El Caso de Santiago de Chile,» Santiago, 2001.
- [25] B. Campos, *Análisis Estocástico del Costo de una Cartera Eficiente de Medidas de Mitigación de Gases de Invernadero Para el Cumplimiento de Objetivos de Reducción en Chile*, 2011.

ANEXOS

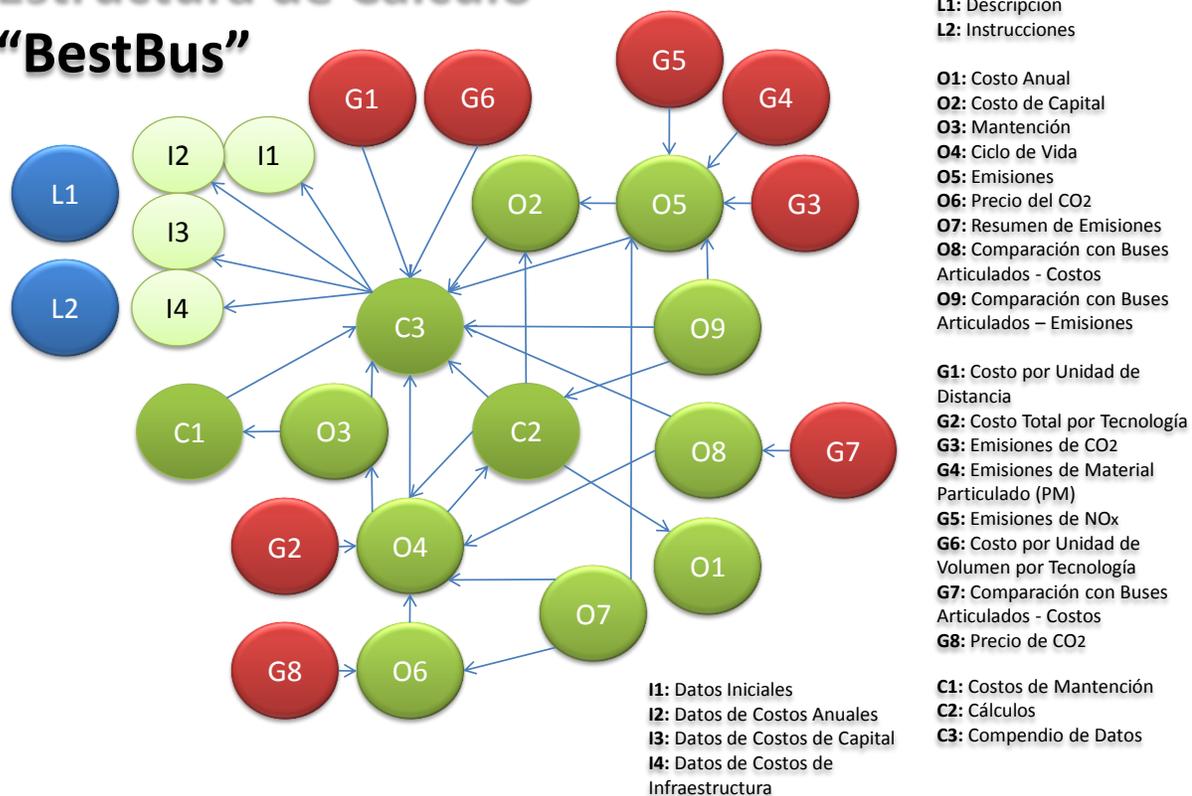
1. DISTRIBUCIÓN DE OPERADORES DE BUSES DEL TRANSANTIAGO (AÑO 2012)



[Fuente: www.transantiago.cl al 23 de octubre de 2013]

2. ESTRUCTURA DE CÁLCULO DEL MODELO “BEST BUS”

Estructura de Cálculo “BestBus”

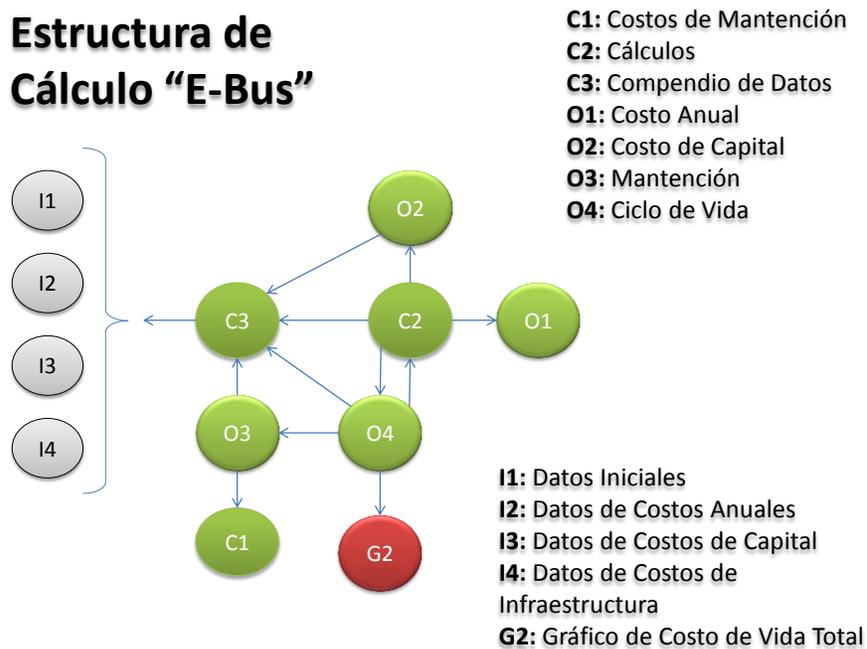


[Fuente: Elaboración propia]

El diagrama muestra la relación entre las diferentes pestañas de la planilla de cálculo. Cada círculo es una pestaña, y las flechas indican qué hojas son llamadas desde cada una.

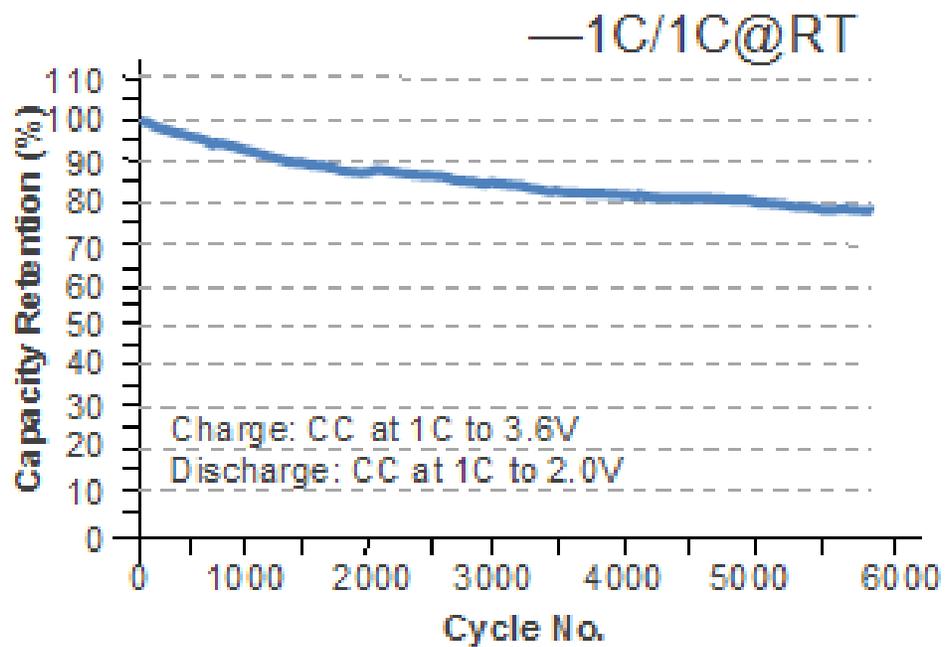
3. “E-BUS” ESTRUCTURA DE CÁLCULO DE LA ADAPTACIÓN DEL MODELO “BEST BUS”

Estructura de Cálculo “E-Bus”



[Fuente: Elaboración propia]

4. TEST DE CICLO DE RECARGA TECNOLOGÍA *ELECTROMOTION* (BATERÍAS LITIO FOSFATO DE FIERRO)



[Fuente: <http://www.byd.com/la/auto/technology.html> consultada el 5 de noviembre de 2013]

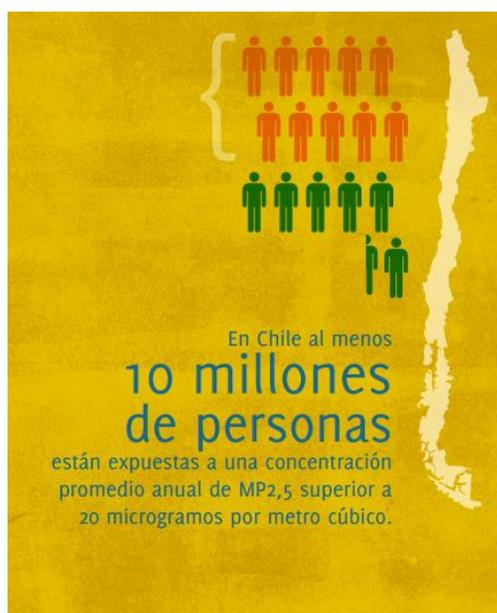
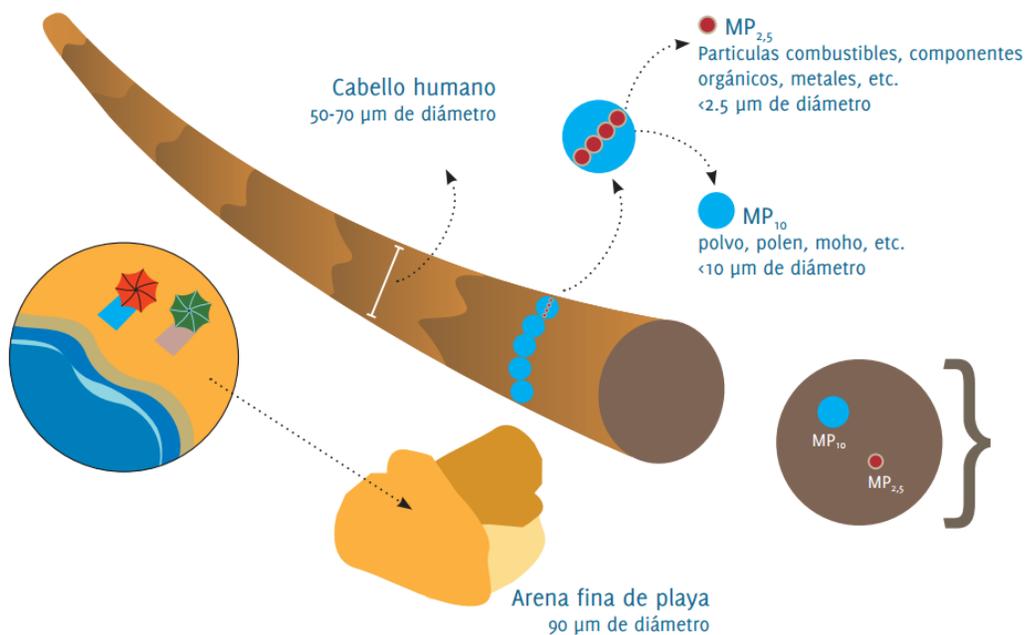
5. CUENCA REGIÓN METROPOLITANA



[Fuente: Elaboración propia a partir de imagen satelital del Departamento de Geografía del Estado, EEUU. Extraída el 8 de noviembre de 2013]

La región metropolitana en su mayoría está compuesta por terreno montañoso, la zona urbana, Santiago, se encuentra rodeada de montañas. En la figura se marca en rojo las cadenas montañosas que generan la cuenca de la ciudad.

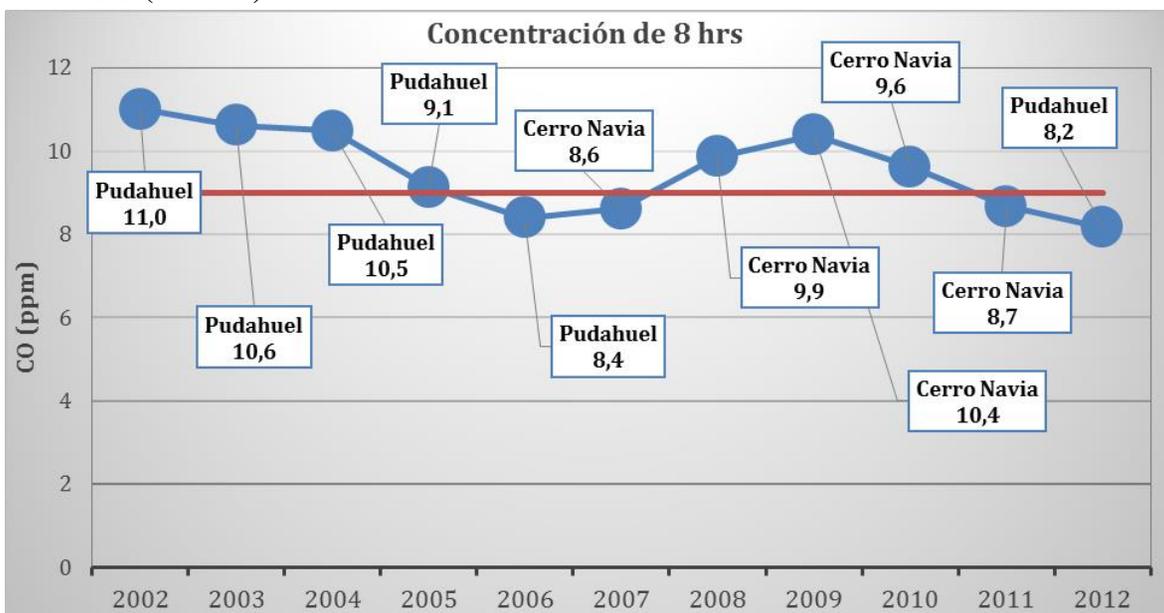
6. DIMENSIONES DE MATERIAL PARTICULADO Y EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN CHILENA.



[Fuente: Informe del Estado del Medio Ambiente 2011, Gobierno de Chile]

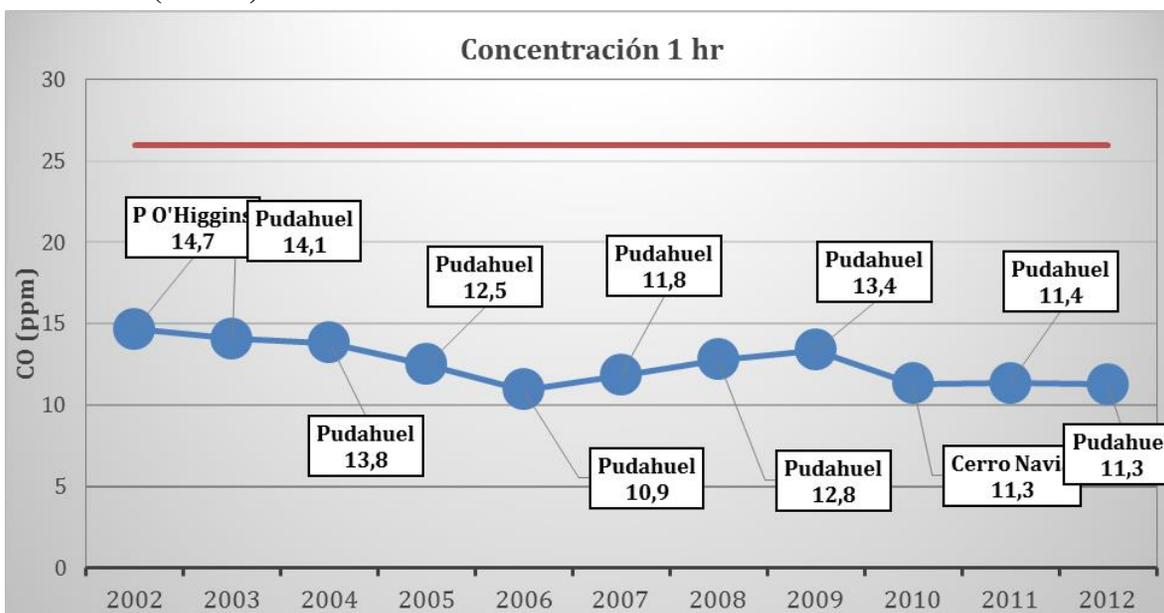
7. MONITOREO DE CONTAMINANTES NORMADOS POR ESTACIONES AIRVIRO (EDB SANTIAGO REAL TIME)

CO (8 horas)



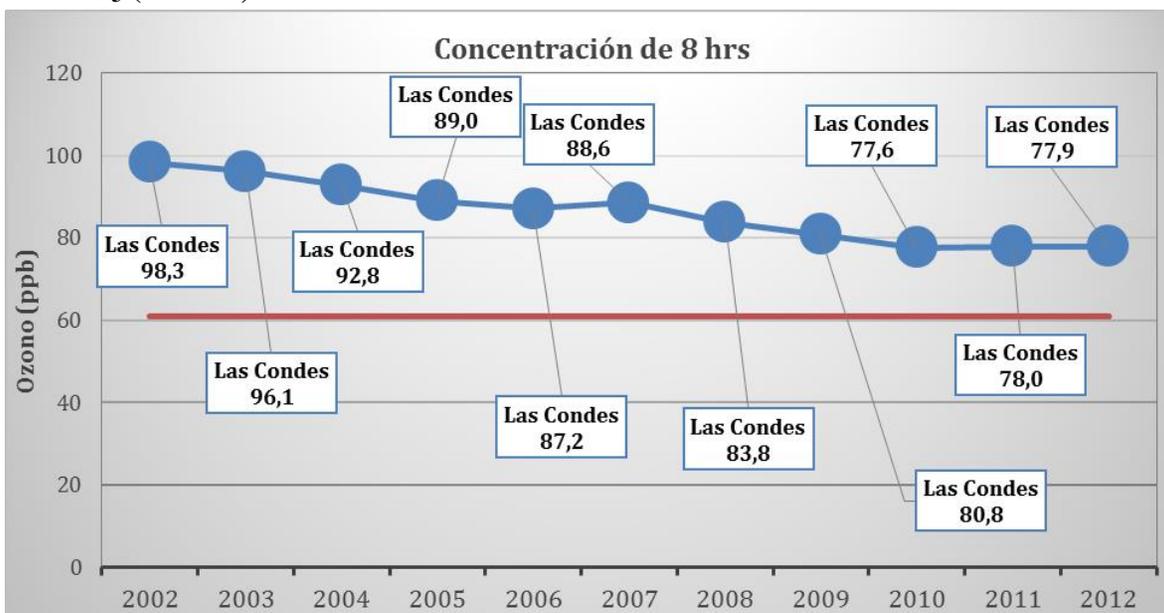
Evolución del promedio trianual del percentil 99 de concentración de 8 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

CO (1 hora)



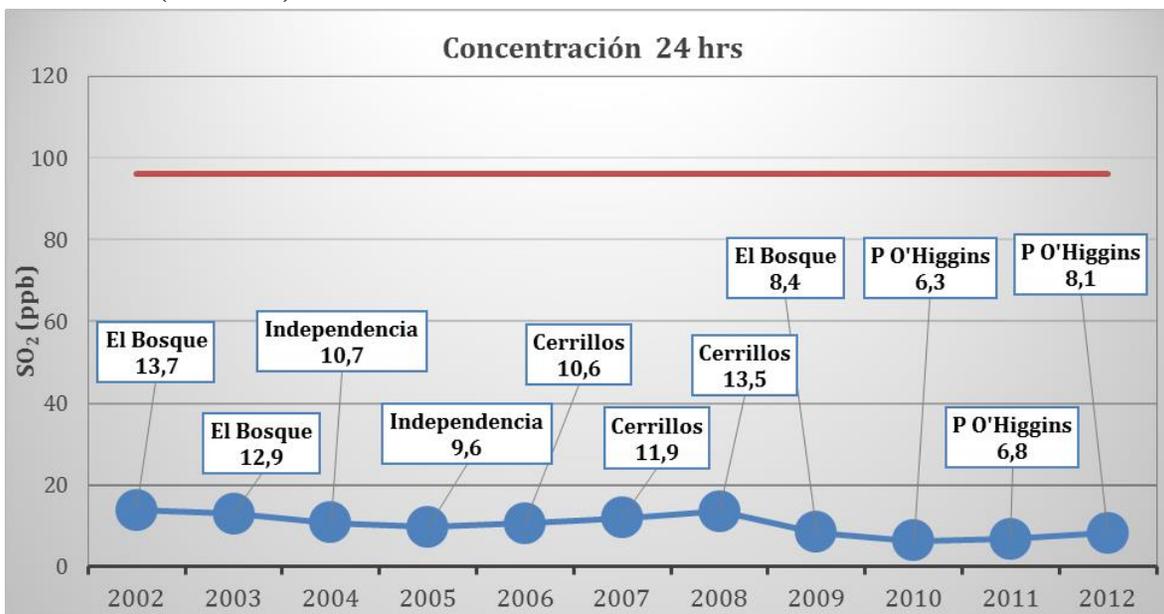
Evolución del promedio trianual del percentil 99 de concentración de 1 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

O₃ (8 horas)



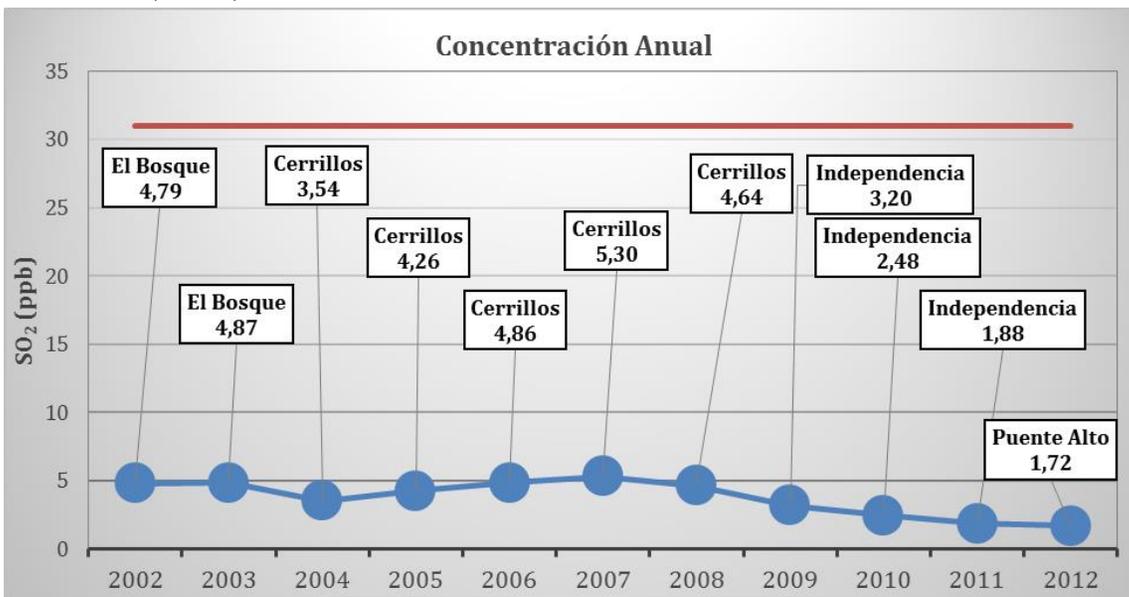
Evolución del promedio trianual del percentil 99 de concentración de 8 hrs. Indicados en la serie está tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

SO₂ (24 horas)



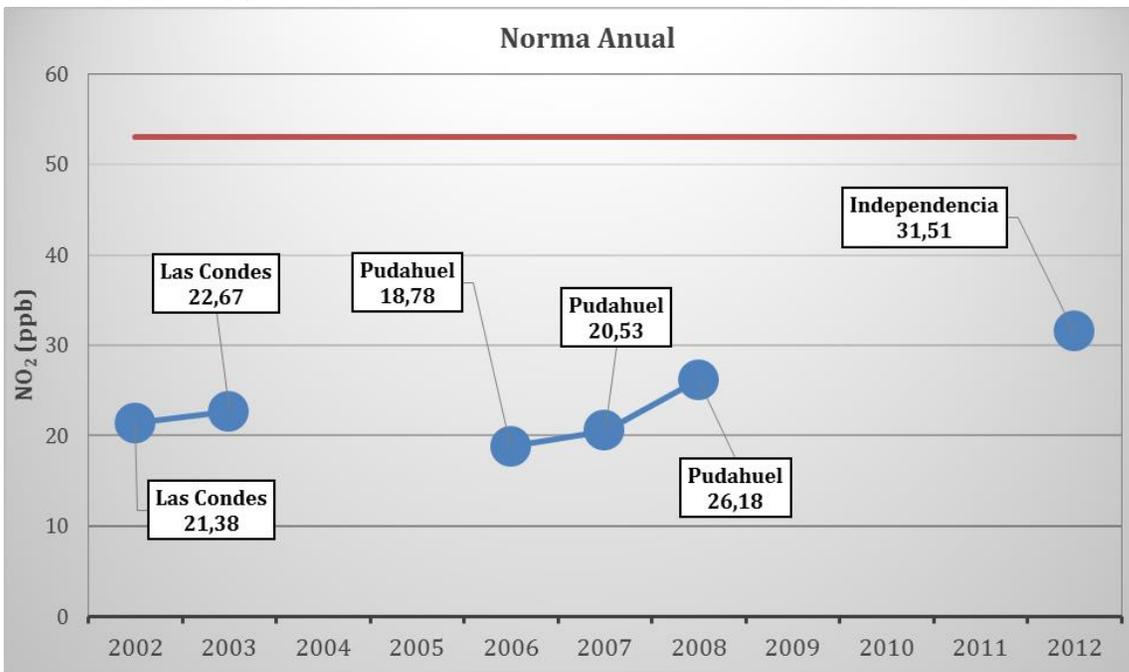
Evolución del promedio trianual del percentil 99 de concentración de 24 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

SO₂ (anual)



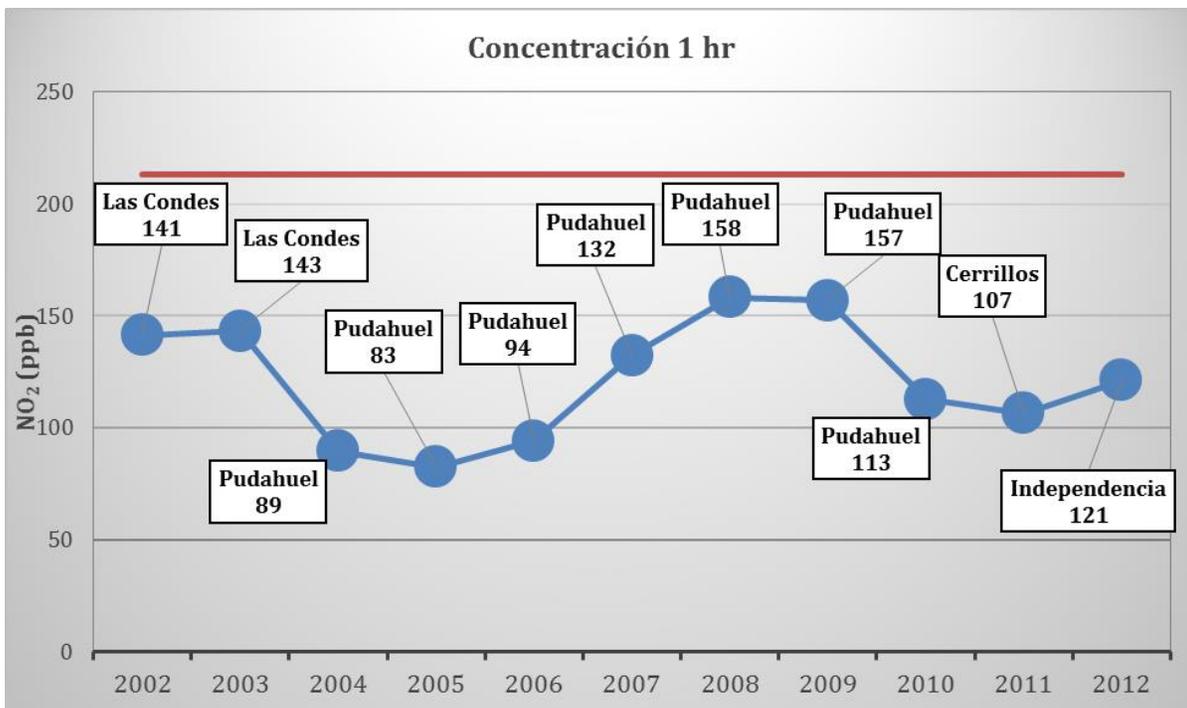
Evolución del promedio trianual la concentración anual. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

NO₂ (Anual)



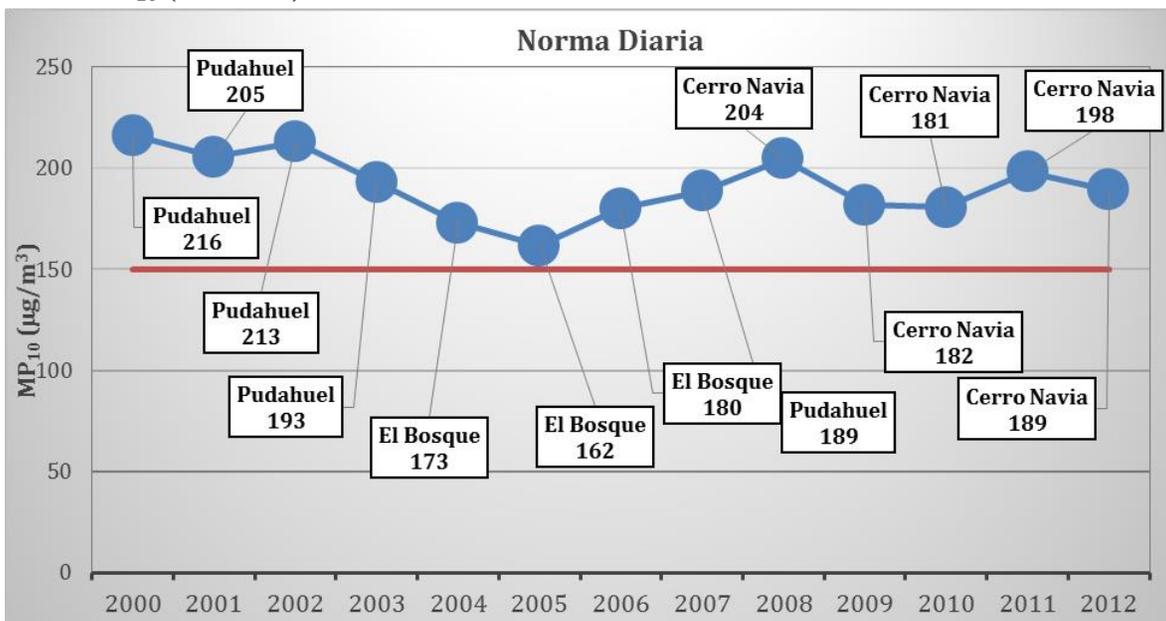
Evolución del promedio trianual la concentración anual. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

NO₂ (1 hora)



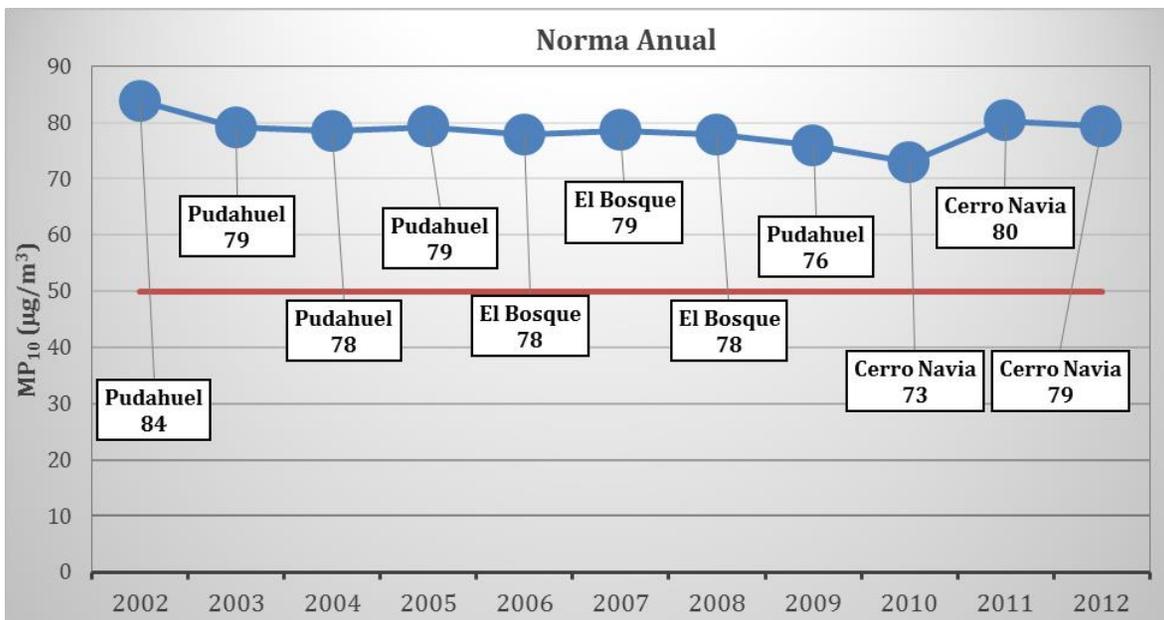
Evolución del promedio trianual del percentil 99 de concentración de 1 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

MP₁₀ (24 horas)



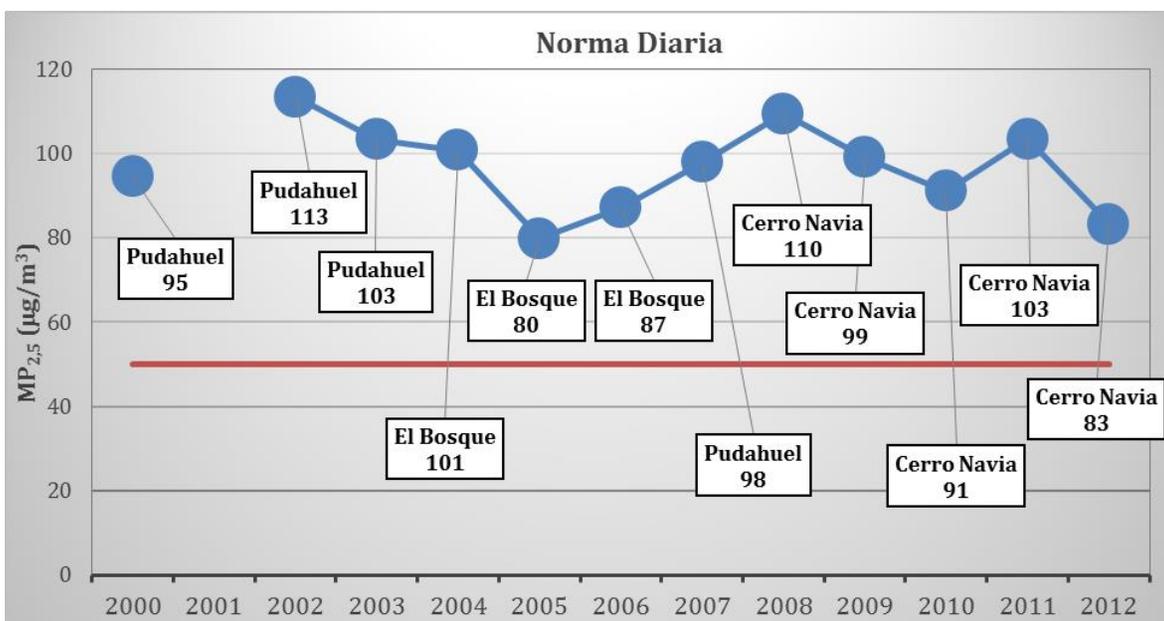
Evolución del percentil 98 de concentración de 24 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

MP₁₀ (anual)



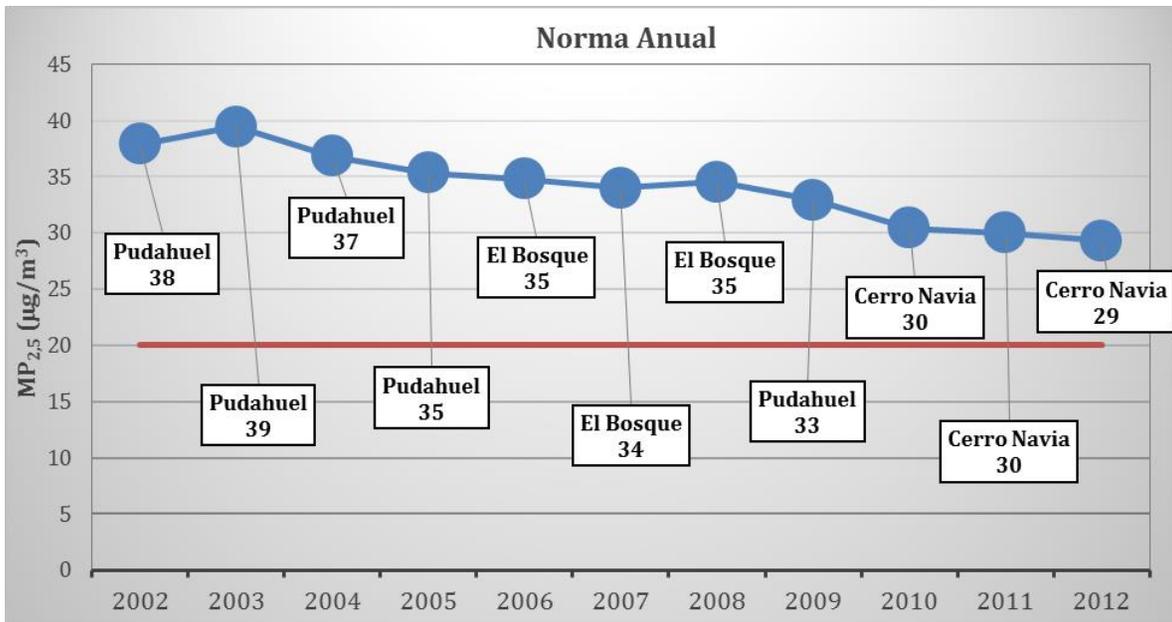
Evolución del promedio trianual de la concentración anual. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

MP_{2,5} (24 horas)



Evolución del percentil 98 de concentración de 24 hrs. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

MP_{2,5} (anual)



Evolución del promedio trianual de la concentración anual. Indicados en la serie están tanto la concentración como la estación MACAM que presentó la máxima concentración anual.

Fuente: [20]

8. MODELOS DE CADA TECNOLOGÍA

- **Bus Diésel Euro V (Caso Base):** Bus Diésel Volvo B7R

Figura 9: Bus Diésel Volvo B7R



[Fuente: <http://www.orientalmodelbuses.co.uk/Volvo/B7R/cnbus1018.htm> consultada el 4 de diciembre de 2013]

- **Trolebús:** Busscar Urbanus Pluss LF Trolebús



[Fuente: <http://www.flickr.com/photos/businfocus/6991644008/> consultada el 4 de diciembre de 2013]

- **Bus Eléctrico: BYD K9**



[Fuente: <http://www.byd.com/la/auto/ebus.html> consultada el 9 de diciembre de 2013]

- **Híbrido en Paralelo: Volvo 7900 Híbrido Parallel**



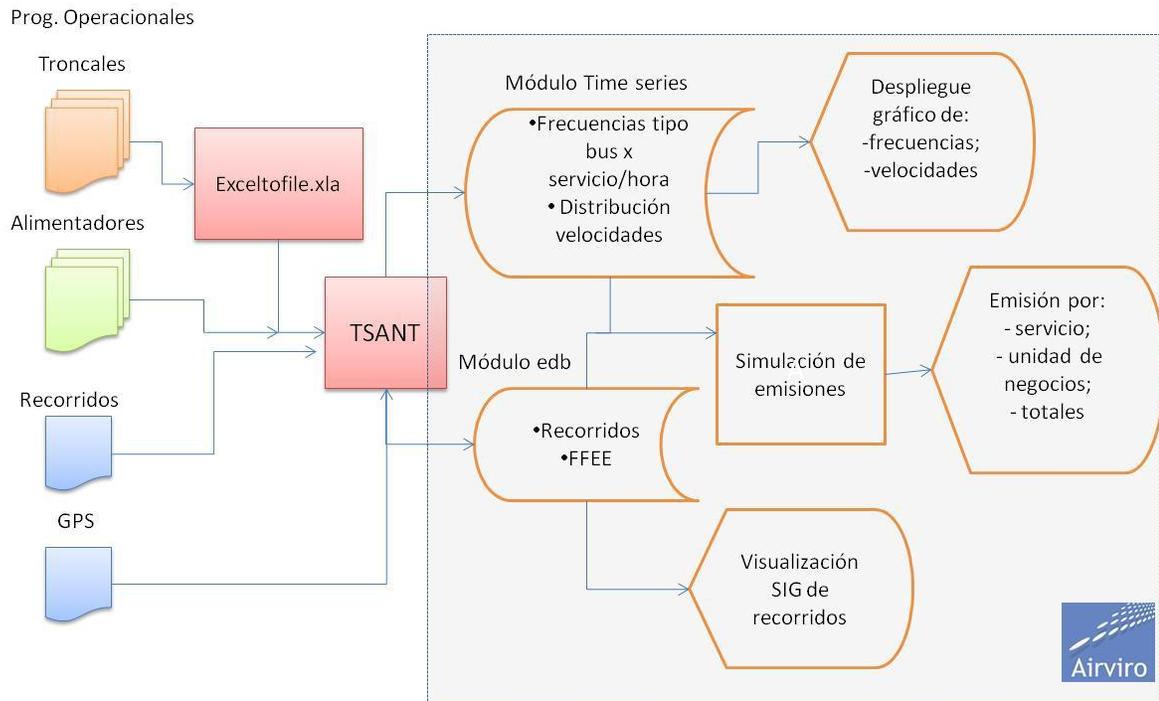
[Fuente: http://www.volvobuses.com/bus/spain/es-es/products/City%20buses/volvo_7900_hybrid/Pages/Introduction.aspx consultada el 4 de diciembre de 2013]

- **Híbrido en Serie:** Citea SLF-120/hybrid



[Fuente: <http://www.omnibusarchiv.de/include.php?path=article&contentid=840> consultada el 4 de diciembre de 2013]

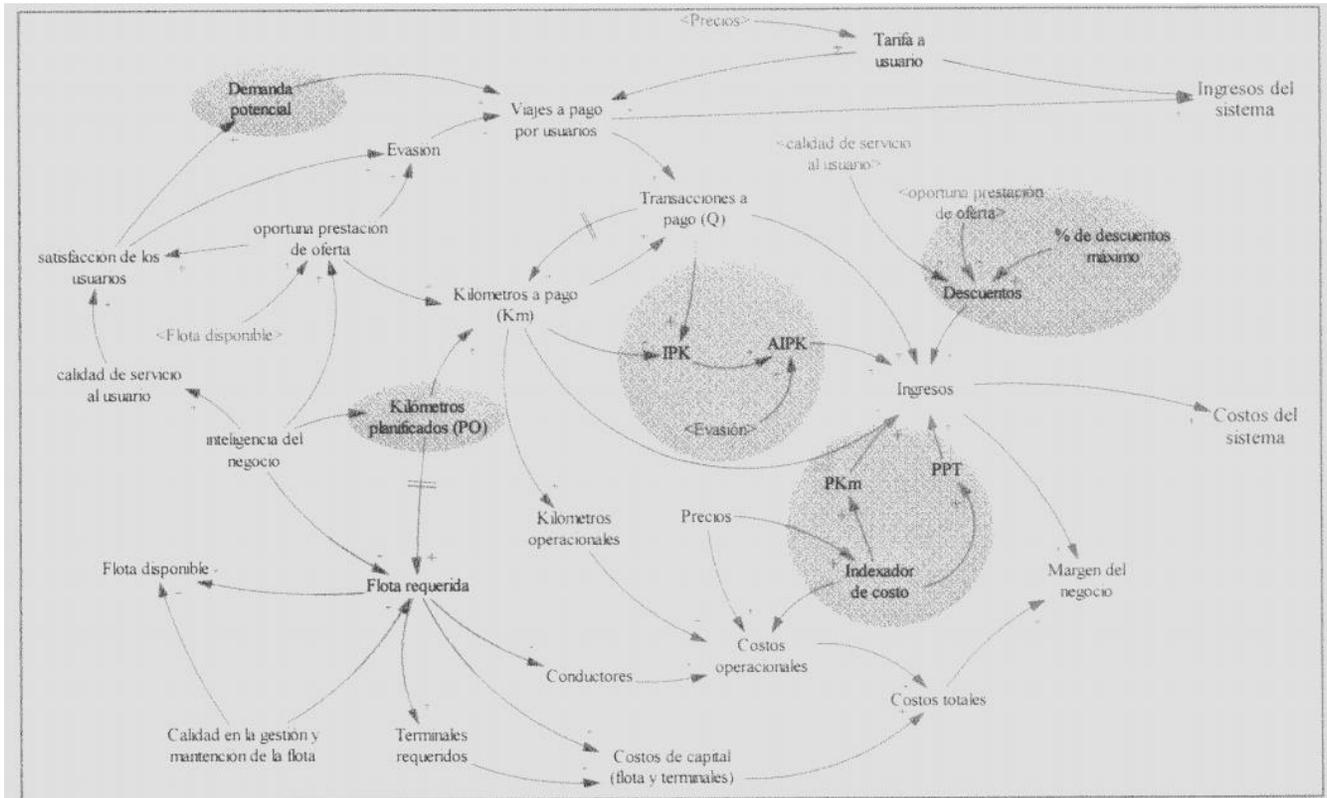
9. ESTRUCTURA DE POBLAMIENTO DE DATOS DE OPERACIÓN DE TRANSANTIAGO EN TSANT Y SU INTEGRACIÓN CON AIRVIRO



La información de TSANT se recoge desde la información a bordo de los buses troncales y alimentadores, la información de los recorridos y los informes de GPS.

Al integrarlo a AIRVIRO logra entregar una visualización en un sistema de información geográfico de los recorridos; Emisiones por servicio, unidad de negocios y troncales; Y despliegue de gráficos de frecuencias y velocidades de los diferentes servicios.

10. DIAGRAMA RELACIONES ENTRE VARIABLES DEL NEGOCIO EN EL MARCO DEL CONTRATO DE CONCESIÓN



[Fuente: Contrato de concesión, Unidad de Negocio N°7, Servicio de Transporte de Personas S.A. anexo 9]

PKm: Pago por kilómetros recorridos.

PPT: Pago por pasajero transportado.

AIPK: Ajuste de índice de pasajeros/kilómetro.

IPK: Índice de pasajeros/kilómetro.

11. BUS RAPID TRANSIT (BRT)



[Fuente: <http://transittime2.blogspot.com/2011/04/understanding-bus-rapid-transit.html>
extraída el martes 17 de diciembre de 2013]

12.FLUJO DE CAJA DE ALTERNATIVAS

La tasa de descuento utilizada fue de 6% y el proyecto fue evaluado a un horizonte de 20 años.

Los costos son organizados en 5 secciones

- Costos de Operarios:

Se realizó un cálculo en base a la distancia anual recorrida por bus y utilizando la velocidad media de operación se obtuvo la de horas que se requieren conductores. Además se incluyó el reajuste de sueldos.

- Costos de Capital Anualizados:

Los costos de capital incluyen la compra de buses, infraestructura como las estaciones de recarga, catenaria y estaciones de diésel. Todos estos costos de capital fueron anualizados de modo que estos montos se pagan en cuotas anuales. Además, se consideró la vida útil de los buses, por lo cual aquellos buses de menor duración requirieron más compras que los más duraderos para el periodo de evaluación.

- Costos Revisiones periódicas:

Se consideraron diferentes tipos de revisiones periódicas: motor, transmisión, y para el caso de los buses eléctricos: el sistema de conducción y el reemplazo de baterías. Cada una de estas revisiones tiene diferentes frecuencias. Además se incluyó el costo de los materiales, la cantidad de horas necesarias y el pago de los mecánicos asociado.

- Costos de mantenciones anuales:

Correspondiente a la mantención anual de los buses como también del gasto asociado ante cualquier eventualidad que interrumpa el buen funcionamiento del bus.

- Costo de combustible:

Se calculó en base a los kilómetros anuales recorridos en combinación con el rendimiento energético de cada tipo de tecnología. Para el caso de los trolebuses se incluyó un *fee* equivalente a tres veces el precio de la energía consumida como derecho de uso.