



“Estudio Escenarios de Usos Futuros de la Electricidad” Capítulos Transporte y Residencial

**EXPERTOS EN CONSULTORÍA ESTRATÉGICA
Y TÉCNICA ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



Generadoras de Chile
energía que nos mueve

**PARA:
Asociación de Generadoras
SANTIAGO**

Resumen Ejecutivo

Las fuentes energéticas que la sociedad utiliza tienen consecuencias directas y relevantes en el desarrollo económico y en el bienestar social. En este estudio se construyen y analizan escenarios futuros de consumo de energía en que el desarrollo de la matriz de usos finales incorpora gradualmente más energía eléctrica. La naturaleza del análisis de escenarios es exploratoria ya que permite identificar y cuantificar costos y beneficios que se desprenden de mayor consumo eléctrico, pero en ningún caso existe un afán predictivo. No obstante, en cada sector de consumo final se analizan condiciones tecnológicas, de mercado, económicas y regulatorias que permitan fundamentar distintos niveles de penetración de la energía eléctrica en los distintos usos energéticos.

El estudio se enfoca en sectores de consumo final con potencial real de aumentar el consumo eléctrico en la matriz de usos finales, siendo estos: 1) sector transporte terrestre; 2) sector residencial; y 3) sectores industriales y mineros. Para cada uno de estos sectores se construyen tres escenarios con distintos niveles de participación de consumo eléctrico:

- **Escenario conservador (base):** se asocia a proyección de tipo tendencial del consumo de energía y de emisiones de gases efecto invernadero y sin grandes quiebres. Bajo este escenario se incluyen todas aquellas políticas implementadas y comprometidas por el Gobierno que modifican los niveles o estructura de consumo de energía.
- **Escenario moderado:** para cada sector se examina un caso con mayor electrificación que el escenario base consistente con criterios de potencial técnico, económico y regulatorio.
- **Escenario optimista:** este escenario se construye bajo la consideración de lograr una incorporación incluso mayor de electricidad que en el escenario anterior.

Los resultados de demanda eléctrica agregada revelan incrementos importantes de consumo eléctrico en los escenarios de electrificación respecto del escenario conservador. En efecto, de un nivel en torno a los 72 mil GWh en 2016, el consumo de energía eléctrica llega casi a 170 mil GWh en 2050 en el escenario conservador. Este último año el consumo alcanza 196 mil GWh y 228 mil GWh en los dos escenarios de mayor electrificación. Las tasas de crecimiento promedio anual- entre 2017 y 2050- para los escenarios conservador, moderado y optimista son 2,5%; 3,0%; y 3,4% respectivamente.

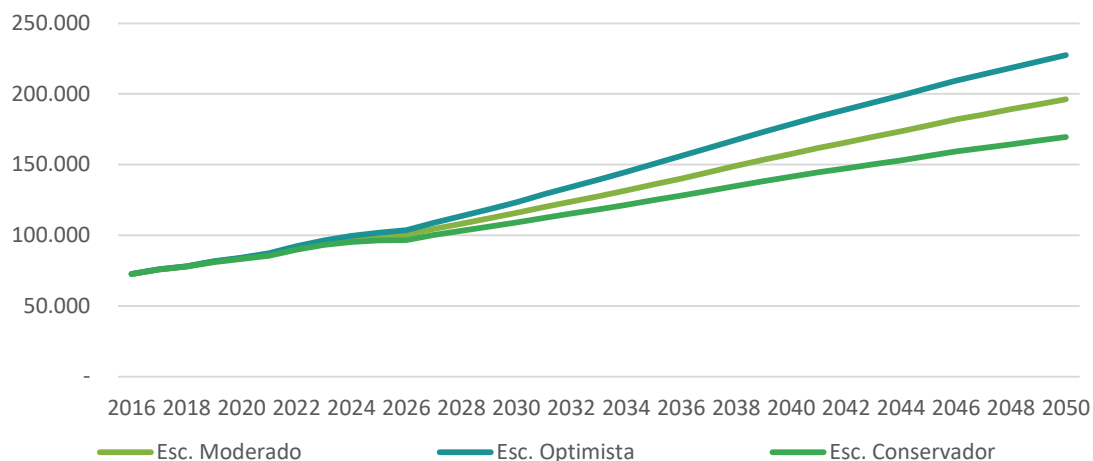


Ilustración 1 Consumo Eléctrico en los distintos escenarios (GWh)

Fuente: Elaboración propia

Al examinar los incrementos sectoriales de consumo de energía eléctrica en los escenarios de electrificación, los resultados muestran que en ambos casos destacan los aumentos en el sector residencial- especialmente por calefacción, y del sector transporte. El cuadro siguiente presenta el incremento de consumo eléctrico en los escenarios moderado y optimista respecto del escenario optimista, y la participación sectorial de estos incrementos.

Escenario	Moderado		Optimista	
	2030	2050	2030	2050
Incremento consumo eléctrico (GWh)	6.764	26.519	14.264	57.882
Transporte	4,6%	31,0%	14,1%	29,5%
Residencial	69,9%	46,9%	67,3%	55,4%
Industria y Minería	25,5%	22,2%	18,6%	15,1%

Cuadro 1 Estructura e incrementos de consumo eléctrico

Fuente: Elaboración propia.

La mayor participación de consumo eléctrico se asocia a niveles significativos de eficiencia energética- ahorros de consumo de energía en los escenarios de mayor electrificación respecto del escenario conservador. El ahorro promedio anual de consumo en los sectores de demanda final alcanza el 1,5% en el escenario moderado y 3,8% en el optimista. El sector transporte es responsable de casi el 70% de estos ahorros en ambos escenarios.

Desde una perspectiva sistémica al estimar el consumo total primario- es decir, incluyendo explícitamente los consumos de la generación eléctrica y del resto de los centros de transformación- también se obtienen ganancias de eficiencia energética respecto del escenario conservador (base). Esta estimación considera que la matriz de generación cumple con la normativa y los objetivos de la Política Energética Nacional en cuanto a su composición. El escenario moderado presenta un ahorro promedio anual de 0,2% mientras que en el escenario optimista 1,2%. Los ahorros considerando sólo los

requerimientos primarios de fósiles- sin fuentes renovables- son incluso mayores y alcanzan tasas medias anuales de 1,8% en el escenario moderado y 4,5% en el optimista.

Escenario	Moderado		Optimista	
	2030	2050	2030	2050
Ahorro de Consumo final	3.205	22.780	12.215	47.217
Ahorro de Consumo primario	-1.211	9.122	4.181	21.151
Ahorro de consumo primario de fósiles	3.436	29.015	11.839	61.375

Cuadro 2 Ahorros de consumo final, consumo primario y consumo primario de fósiles (sin fuentes renovables) (Teracalorías)

Fuente: Elaboración propia.

Los escenarios de mayor electrificación reducen las emisiones agregadas de gases efecto invernadero del sistema energético, lo que resulta consistente con las reducciones de consumo de combustibles fósiles. En el escenario conservador las emisiones suben de 94 millones en 2016 de toneladas a 130 millones en 2050. En los escenarios, las emisiones en 2050 llegan a 123 millones (moderado) y 116 millones (optimista). Como consecuencia, en el primer escenario- en el acumulado 2020-2050- se reducen en casi 72 millones de toneladas las emisiones de gases efecto. En el segundo, esta cifra aumenta a más del doble alcanzando un ahorro acumulado de casi 166 millones de toneladas lo que estabiliza el crecimiento de las emisiones de los sectores energéticos.

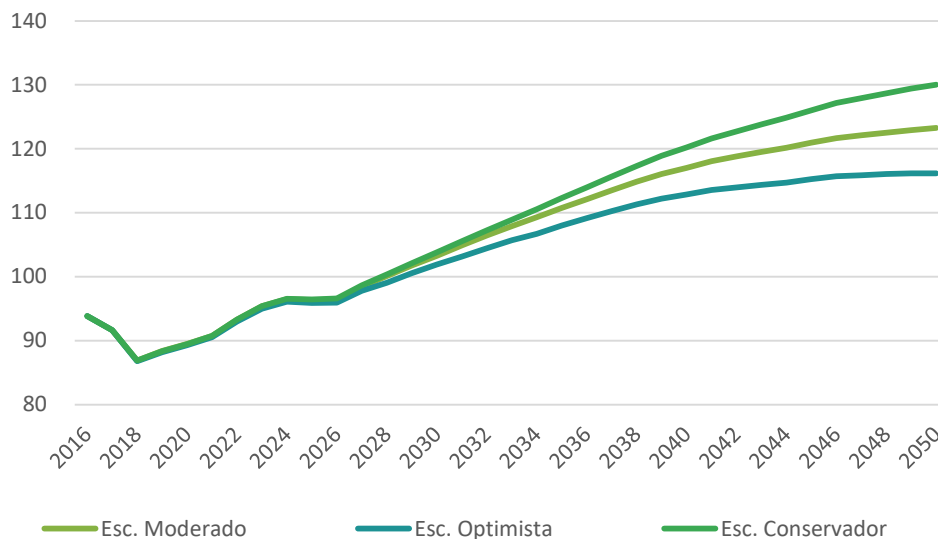


Ilustración 2 Emisiones de gases efecto invernadero en cada escenario (Millones de toneladas de CO2eq)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la mayor participación de energía eléctrica en la matriz de usos finales se asocia a importantes beneficios ambientales derivados de mejor calidad del aire. Mediante el análisis de dos casos- sistema de transporte en Santiago y sector residencial en Temuco-Padre las Casas, se confirma

que los beneficios del consumo eléctrico son significativos. En Santiago, considerando todo el periodo de evaluación, en los escenarios moderado y optimista se evitan 2.600 y 6.700 casos de muerte prematura respectivamente además de otras condiciones adversas de salud. Los beneficios económicos correspondientes- en valor presente utilizando la tasa social de descuento- alcanzan US\$ 340 millones en el escenario moderado y US\$ 940 millones en el optimista.

Los beneficios en Temuco y Padre las casas son muy relevantes en el escenario optimista por reemplazar leña por consumo eléctrico en los usos calefacción. Si 20 mil viviendas utilizaran electricidad en vez de leña, entonces se evitarían 140 casos de mortalidad prematura y 200 casos de admisiones hospitalarias. En consecuencia, en estas comunas se percibirían beneficios del orden de US\$ 90 millones por año. En todo el horizonte se evitan 3.300 casos de muerte prematura y se obtienen beneficios de US \$ 600 millones. En el escenario moderado se perciben muy pocos beneficios- US\$ 1 millón- ya que el consumo eléctrico sólo desplaza kerosene y gas licuado.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Relación entre PIB per cápita y consumo eléctrico per cápita	16
Figura 1.2 PIB per cápita en 2015 (US\$) y Consumo eléctrico per cápita en 2014 (kWh)	17
Figura 1.3 Estructura Sectorial del Consumo Final en Chile	18
Figura 1.4 Composición de energéticos en consumo final	18
Figura 1.5 Emisiones GEI de Chile por sector en 2013 con detalle del sector Energía, MtCO2.....	19
Figura 2.1 Composición del consumo de energía del sector transporte a nivel mundial.....	22
Figura 2.2 Consumo de energía por sector y por fuente de Chile (BNE, 2015)	23
Figura 2.3 Consumo de energía por sub-sector y del consumo terrestre de Chile (BNE, 2015)	23
Figura 2.4 Consumo per cápita (PPP) versus vehículos	24
Figura 2.5 Ventas de vehículos livianos y medianos (ANAC, 2016)	25
Figura 2.6 Parque versus tasa de motorización (ANAC, 2016)	26
Figura 2.7 Partición modal de viajes en automóvil de distintas ciudades del mundo vs PIB per cápita	27
Figura 2.8 Parque de autos eléctricos por país (IEA)	29
Figura 2.9 Costo y densidad energética de las baterías de ion-litio (IEA,2016).....	29
Figura 2.10 Evolución de precio de baterías y ventas de vehículos eléctricos (McKinsey & Company, 2017)	30
Figura 2.11 Costo de ciclo de vida para distintas tecnologías de buses en Santiago, miles de dólares-valor presente neto a 10 años (PNUMA, 2016)	31
Figura 2.12 Metodología de estimación de consumo en sector transporte.....	34
Figura 2.13 Modelo Econométrico.....	36
Figura 2.14 Proyección de costo de las baterías de ion-litio	41
Figura 2.15 Inversión adicional en millones de pesos (CLP)	43
Figura 2.16 Porcentaje de ventas de autos particulares eléctricos	44
Figura 2.17 Parque de vehículos livianos: Escenario Conservador	45
Figura 2.18 Parque de vehículos livianos: Escenario Moderado	45
Figura 2.19 Parque de vehículos livianos: Escenario Optimista.....	46
Figura 2.20 Parque de taxis: Escenario Conservador.....	47
Figura 2.21 Parque de taxis: Escenario Moderado	47
Figura 2.22 Parque de taxis: Escenario Optimista	47

Figura 2.23 Parque de buses eléctricos de Transantiago: Escenario	49
Figura 2.24 Valor presente de los costos de vehículos eléctricos versus convencional según año de compra	49
Figura 2.25 Consumo de Energía por combustible del Transporte Terrestre: Escenario Conservador.....	51
Figura 2.26 Consumo total de energía del transporte terrestre.....	52
Figura 2.27 Consumo de energía eléctrica del transporte terrestre	52
Figura 2.28 Variación de consumo de energía: Escenario moderado versus Conservador	53
Figura 2.29 Variación de consumo de energía: Escenario Optimista versus Conservador.....	54
Figura 2.30 Emisiones de gases efecto invernadero (Millones de toneladas de CO ₂ eq	55
Figura 2.31 Reducción de concentraciones de escenario moderado	57
Figura 2.32 Reducción de concentraciones de escenario optimista.....	57
Figura 3.1 Consumo relativo de subsectores en energía final total y energía eléctrica final	61
Figura 3.2 Composición del Consumo de sectores comercial y público	62
Figura 3.3 Composición del Consumo del sector residencial	62
Figura 3.4 Consumo Promedio de Hogares	63
Figura 3.5 Tasa de crecimiento medio anual del consumo de energía del sector residencial 2012-2040.....	64
Figura 3.6 Distribución de consumos energéticos por uso final, en el subsector Residencial	65
Figura 3.7 Consumo medio de energía por hogar	65
Figura 3.8 Distribución de consumo energético total por uso final Residencial, por región.....	66
Figura 3.9 Relación entre PIB per cápita y tamaño de los hogares	67
Figura 3.10 Enfoque Metodológico Sector Residencial	68
Figura 3.11 Precios de equipos de calefacción	72
Figura 3.12 Cuenta mensual representativa por tecnología en Santiago.	72
Figura 3.13 Cuenta mensual representativa por tecnología en Concepción.	73
Figura 3.14 Cuenta mensual representativa por tecnología en Valdivia.	73
Figura 3.15 Proyección de Consumo de Energía del Sector Residencial por uso en Escenario Base (Teracalorías).....	76
Figura 3.16 Proyección de Consumo de Energía del Sector Residencial por energético en Escenario Base (Teracalorías)	77
Figura 3.17 Consumo de Energía Residencial (Teracalorías)	78
Figura 3.18 Consumo de Energía Eléctrica Residencial (GWh)	78

Figura 3.19 Aumento de Consumo Eléctrico por uso en Escenario Moderado (GWh)	78
Figura 3.20 Aumento de Consumo Eléctrico por uso en Escenario Optimista (GWh).....	79
Figura 3.21 Emisiones de gases efecto invernadero en cada escenario (Miles de toneladas de CO2eq).....	80
Figura 3.22 Rango de precio y emisiones por tipo de calefactor.....	81
Figura 3.23 Reducción de concentraciones de escenarios moderado y optimista.....	82
Figura 4.1 Etapas del Método de la Función de Daño, Requerimientos de Datos y Modelos.....	89

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Precios de referencia actuales de vehículos (en \$)	39
Tabla 2.	Antecedentes relevantes para el cálculo	39
Tabla 3.	Payback tecnologías	40
Tabla 4.	Parque de vehículos eléctricos particulares en cada escenario (número de vehículos)....	44
Tabla 5.	Parque de vehículos taxis en cada escenario (número de vehículos).....	46
Tabla 6.	Parque de Buses Eléctricos en Transantiago.....	48
Tabla 7.	Resultados del análisis de valor presente de los costos (CL\$)	50
Tabla 8.	Reducción de emisiones respecto de escenario conservador.....	56
Tabla 9.	Casos de salud evitados en escenario moderado respecto del conservador	58
Tabla 10.	Casos de salud evitados en escenario optimista respecto del conservador.....	58
Tabla 11.	Beneficios monetarios en escenario moderado respecto del conservador (US\$).....	59
Tabla 12.	Beneficios monetarios en escenario optimista respecto del conservador (US\$).....	60
Tabla 13.	Escenarios de consumo eléctrico sector residencial	71
Tabla 14.	Valor presente de costos de calefacción para distintas tecnologías en Concepción	74
Tabla 15.	Reducción de emisiones respecto de escenario conservador (ton MP2,5 por año)	81
Tabla 16.	Casos de salud evitados en escenario moderado respecto del conservador	83
Tabla 17.	Casos de salud evitados en escenario optimista respecto del conservador	83
Tabla 18.	Beneficios monetarios en escenario moderado respecto del conservador (US\$)	84
Tabla 19.	Beneficios monetarios en escenario optimista respecto del conservador (US\$).....	85
Tabla 25.	Supuestos de modelación	86
Tabla 26.	Resultados Efectos de Salud Considerados en Evaluación.....	88
Tabla 27.	Coeficientes de Riesgo Unitario por Grupo Etario (MMA, 2015).....	97
Tabla 28.	Tasas de Incidencia por Grupo Etario (GreenLabUC 2011)	92
Tabla 29.	Valores Unitarios por Casos Evitados por Grupo Etario (MMA 2015)	99

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1 Formulación Cobb-Douglas.....	15
Ecuación 2 Versión logarítmica de la formulación Cobb-Douglas	15
Ecuación 3 Descomposición del consumo energético	15
Ecuación 4 Versión logarítmica de descomposición del consumo energético	15
Ecuación 5 Tasas de cambio de consumo energético.....	15
Ecuación 6 Pasajeros-Kilómetro Totales	35
Ecuación 7 Pasajeros-Kilómetro Totales	35
Ecuación 8 Estimación de pasajero-kilómetro	35
Ecuación 9 Consumo Energético	36
Ecuación 10 Evolución parque vehicular	37
Ecuación 11 Recuperación del capital.....	37
Ecuación 12 Modelo de difusión.....	38
Ecuación 13 Tasa de adopción	38
Ecuación 14 Participación máxima	38
Ecuación 15 Curva logística.....	42
Ecuación 16 Participación del consumo de electricidad.....	71
Ecuación 17 Cambio de efectos evitados.....	89
Ecuación 18 Variación de concentración ambiental.....	95
Ecuación 19 Variación de beneficios.....	95

CONTENIDO

1	Introducción y Antecedentes Generales	13
1.1	Determinantes del crecimiento del consumo de energía	14
1.2	La Estructura de consumo final de energía y emisiones en Chile.....	17
1.3	Metodología de proyección energética y de emisiones.....	19
1.4	Escenarios de Consumo Eléctrico	21
2	El Sector Transporte	22
2.1	Antecedentes del sector transporte.....	22
2.1.1	Evolución reciente y perspectivas del transporte de pasajeros.....	24
2.1.2	La alternativa de vehículos eléctricos	28
2.2	Escenarios de consumo futuro de energía	32
2.3	Metodología general de proyección energética en transporte.....	34
2.4	Metodología de penetración de vehículos eléctricos para cada escenario	37
2.4.1	Estimación del payback en condiciones actuales.....	39
2.4.2	Supuestos de estimación de escenarios.....	41
2.5	Resultados de ventas y parque.....	44
2.5.1	Vehículos particulares	44
2.5.2	Taxis 46	
2.5.3	Buses 48	
2.6	Análisis de Valor Presente	49
2.7	Consumo de energía.....	50
2.8	Reducción de gases efecto invernadero.....	55
2.9	Beneficios de contaminación local en Santiago	56
3	El sector residencial.....	61
3.1	Los Sectores Residencial, Público y Comercial	61
3.2	Caracterización del Consumo Residencial en Chile	64
3.3	Metodología general de proyección energética en el sector residencial.....	66
3.4	Escenarios de Consumo de Energía Eléctrica	69
3.5	Antecedentes, supuestos y definición de escenarios.....	70

3.5.1	Definición de escenarios	70
3.5.2	Calefacción	71
3.5.3	Agua caliente sanitaria	75
3.5.4	Cocción	75
3.6	Resultados de Consumo de energía	76
3.7	Emisiones de Gases Efecto Invernadero.....	79
3.8	Beneficios de contaminación local en Temuco- Padre las Casas.....	80
4	Anexos	86
4.1	Supuestos de Modelación.....	86
4.2	ANEXO: Metodología de Estimación de Beneficios Ambientales Locales	87
4.2.1	Metodología de Evaluación de Impactos	87

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES

Las fuentes energéticas que la sociedad utiliza tienen consecuencias directas y relevantes en el desarrollo económico y en el bienestar social. Se espera que Chile experimente aumentos importantes de consumo de energía- y particularmente de energía eléctrica- como consecuencia del crecimiento económico y la adopción de nuevas tecnologías eléctricas. En este estudio se construyen y analizan escenarios futuros de consumo de energía en que el desarrollo de la matriz de usos finales incorpora gradualmente más energía eléctrica. Los resultados revelan que los beneficios son mayores que los costos lo que justifica una transición hacia un consumo final de electricidad mayor al actual. Como consecuencia, el Estado, sector eléctrico y consumidores deben prepararse para facilitar la adopción tecnológica asociada a mayor electrificación considerando los beneficios netos que más consumo eléctrico le significarían a nuestra sociedad.

En este estudio se caracterizan posibles escenarios futuros de electrificación de los usos finales de la energía. La naturaleza del análisis de escenarios es exploratoria ya que permite identificar y cuantificar costos y beneficios que se desprenden de mayor consumo eléctrico, pero en ningún caso existe un afán predictivo¹. No obstante, en cada sector de consumo final se analizan condiciones tecnológicas, de mercado, económicas y regulatorias que permitan fundamentar distintos niveles de penetración de la energía eléctrica en los distintos usos energéticos. En efecto, la construcción de estos escenarios de largo plazo requiere considerar aspectos clave como innovación y adopción de la tecnología, su relación con los precios de largo plazo de los commodities, la infraestructura, los paradigmas regulatorios, las restricciones ambientales, de sustentabilidad y las preferencias de los usuarios: todos asuntos complejos de analizar. Lo importante es recordar que la función de los escenarios es ayudar a explorar las incertidumbres principales asociadas a los sistemas energéticos futuros y explicitarlas.

El objetivo principal de este estudio es examinar cuánto y cómo crecerá el consumo eléctrico, e identificar los beneficios y costos asociados a mayor participación de consumo eléctrico en los sectores de consumo final. En particular se identifican beneficios de eficiencia energética, beneficios de mejor calidad ambiental y salud, y de gases efecto invernadero. Para esto este capítulo presenta un marco conceptual que se refiere a determinantes del consumo, la estructura del consumo de energía en Chile, se presenta la metodología general y herramienta con que se construyen los escenarios, y posteriormente una primera presentación a los escenarios de consumo eléctrico. El capítulo 2 presenta los supuestos de construcción de escenarios y resultados del sector transporte. El capítulo 3 aborda el sector residencial. El capítulo 4 hace referencia los sectores industriales y mineros. El capítulo 5 presenta los resultados agregados de consumo y emisiones junto con otros indicadores relevantes.

¹ En general, los escenarios exploratorios están diseñados para explorar configuraciones posibles del mundo en el futuro. El propósito es la identificación de las estrategias más robustas en cuanto al propósito de la exploración a través de distintos escenarios. La ventaja del uso de estos escenarios permite analizar desviaciones de las tendencias presentes. Por el contrario, los escenarios normativos pueden diseñarse sobre la base un conjunto de atributos deseables (o “reglas”) que debería tener el mundo en el futuro. Este tipo de escenario se orienta específicamente a propósitos regulatorios y se suelen construir “futuros deseables”. Este tipo de escenario es útil para diseñar mecanismos que permitan alcanzar estos estados deseables desde el presente, por ejemplo, en escenarios de backcasting (donde además incluyen una componente de participación de actores).

1.1 Determinantes del crecimiento del consumo de energía

La experiencia internacional muestra que el consumo de energía aumenta con el crecimiento económico y demográfico. Según el documento de Política Energética Nacional, Energía 2050, en los últimos 40 años, el consumo y la producción energética se han duplicado a nivel mundial. Los principales factores determinantes de este incremento serían el crecimiento económico, el aumento de la productividad, el mayor tamaño del sector transporte y el crecimiento demográfico. El aumento del consumo energético además ha venido acompañado con un incremento en la participación de la electricidad en el consumo energético final. La participación en el mundo del consumo eléctrico ha pasado de 9,4% de la matriz de consumo final a 18,1% en las últimas cuatro décadas. En el mismo periodo- aproximadamente entre 1970 y 2010- se ha producido una disminución en la participación de los combustibles fósiles de 75,9% de la matriz a 66%.

Crecimiento Económico y Consumo de Energía

La comprensión del crecimiento económico se basa en gran medida en el modelo neoclásico de Solow y el mismo marco conceptual puede emplearse para relacionar el crecimiento con el consumo de energía. Según el modelo básico, la economía es un sistema cerrado en que los bienes se producen con los factores de producción trabajo y capital. Estudios posteriores han extendido la formulación original e incluido nuevos factores de producción como energía. Para analizar estas relaciones se han asumido, en general, formulaciones de tipo Cobb-Douglas como la siguiente que incluye explícitamente el insumo energía:

$$Y_t = A \cdot K_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma$$

Ecuación 1 Formulación Cobb-Douglas

Donde Y denota el producto, K el capital, L la fuerza laboral, E el consumo de energía y A un parámetro de productividad total de los factores. Al tomar logaritmos de cada variable es posible obtener relaciones en que los parámetros se interpretan directamente como elasticidad revelando la relación entre los factores productivos y el producto:

$$\ln(Y_t) = a + \alpha \ln(K_t) + \beta \ln(L_t) + \gamma \ln(E_t)$$

Ecuación 2 Versión logarítmica de la formulación Cobb-Douglas

Esta simple formulación formaliza la relación directa entre consumo de energía y crecimiento del nivel de actividad (PIB).

Otra relación básica- y que fundamenta parte del trabajo empírico sobre consumo de energía y energía eléctrica- relaciona el consumo de energía (E) con el PIB per cápita (ppc), la población (pob) y la intensidad de consumo por PIB (IE):

$$E = pob \cdot \frac{PIB}{pob} \cdot \frac{E}{PIB} = pob * ppc * IE$$

Ecuación 3 Descomposición del consumo energético

De donde se desprende que:

$$\ln(E) = \ln(pob) + \ln(ppc) + \ln(IE)$$

Ecuación 4 Versión logarítmica de descomposición del consumo energético

Diferenciando con respecto al tiempo:

$$\frac{\dot{E}}{E} = \frac{\dot{pob}}{pob} + \frac{\dot{ppc}}{ppc} + \frac{\dot{IE}}{IE}$$

Ecuación 5 Tasas de cambio de consumo energético

Es decir, el incremento del consumo energético puede aproximarse por suma de la tasa de crecimiento demográfico, de PIB per cápita y la variación de la intensidad de energía.

Esta relación plantea que la población y crecimiento del PIB per cápita no explican completamente el consumo por lo que se requieren variables adicionales que permitan capturar efectos de intensidad.

En general, el crecimiento de la población resulta ser un driver débil de la demanda de energía. El efecto ingreso en términos de PIB y PIB per cápita es positivo especialmente en países en desarrollo. Las intensidades energéticas varían según la región en función de la etapa de crecimiento económico, condiciones geográficas y climáticas, y precios de la energía.

Estudios tanto nacionales como internacionales han intentado documentar empíricamente la relación entre el consumo energético- particularmente eléctrico- y el PIB per cápita². La figura siguiente muestra una estimación de la relación entre consumo eléctrico y PIB per cápita a nivel internacional.

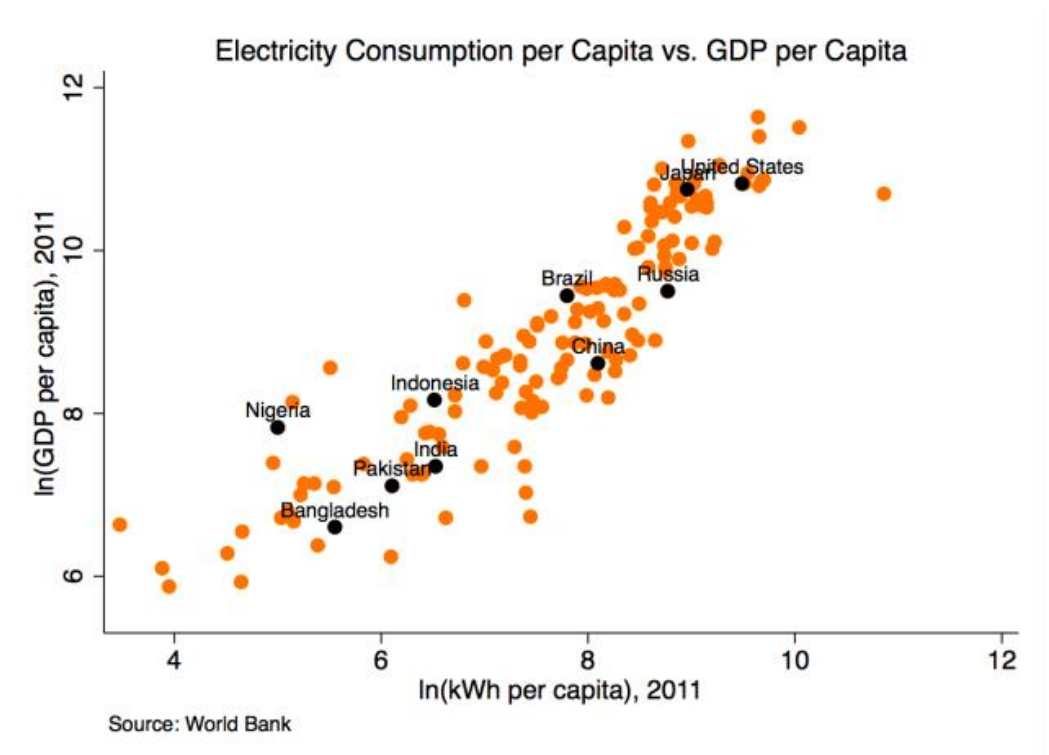


Figura 1.1 Relación entre PIB per cápita y consumo eléctrico per cápita
Fuente: <https://whyelectricitymatters.com/category/developing-countries>

La figura siguiente presenta antecedentes de PIB per cápita y de consumo eléctrico per cápita para distintas regiones del mundo y Chile. Como primera aproximación, la comparación del PIB per cápita y consumo eléctrico per cápita de Chile con el de países desarrollados sugiere que el país debería incrementar significativamente sus niveles de consumo eléctrico los próximos años.

² Este tipo de análisis se ha realizado particularmente para analizar paneles (distintos países a través del tiempo). Para mejorar esta formulación se han realizado estudios que incluyen variables adicionales como desarrollo financiero, capital humano, entre otras.

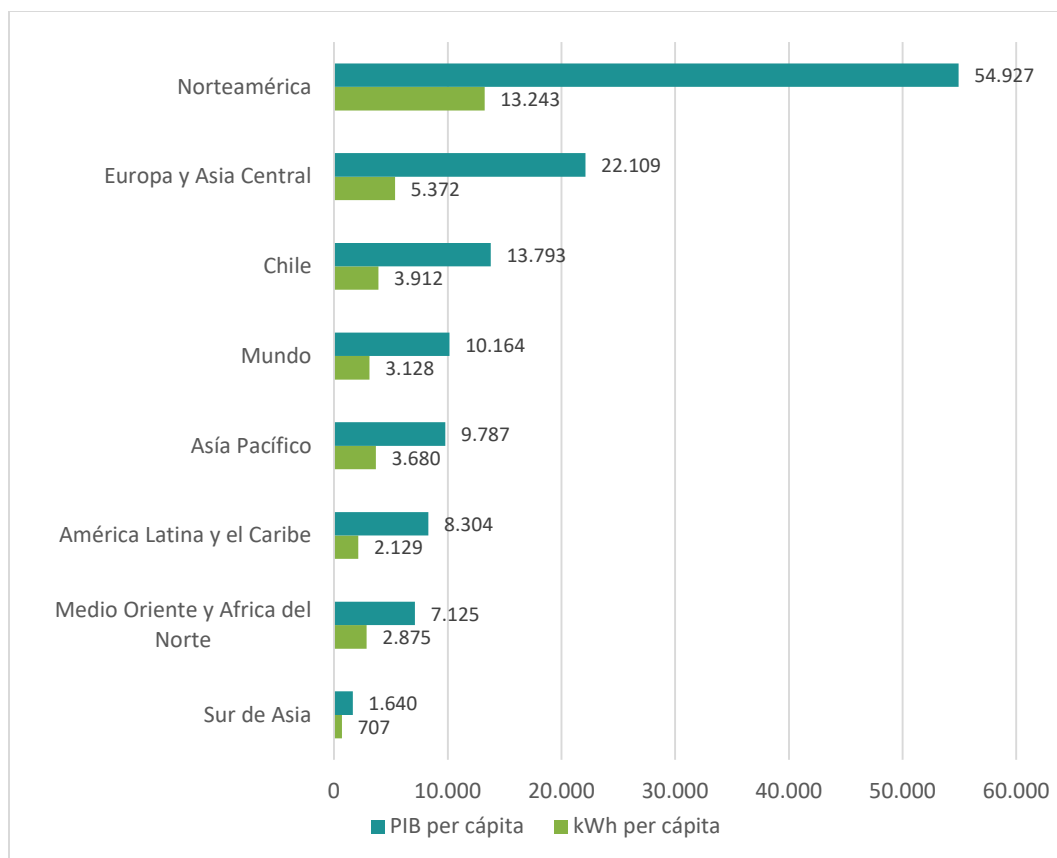


Figura 1.2 PIB per cápita en 2015 (US\$) y Consumo eléctrico per cápita en 2014 (kWh)

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Banco Mundial.

A pesar de que el ingreso (PIB per cápita) y el uso de energía están altamente correlacionados esta relación dista de ser perfecta. En efecto, distintos países con niveles de PIB per cápita similares pueden presentar consumos de energía muy distintos. Factores que pueden explicar estas diferencias son características de la economía (estructura productiva), clima, precios de la energía, políticas de eficiencia energética y otros factores. De la misma manera, un cambio en el PIB per cápita no necesariamente se traduce en cambios importantes en el consumo de energía. Por ejemplo, la reducción de actividades de manufactura o minería intensivas en energía y la expansión de actividades con baja intensidad llevan a desacoplar el crecimiento económico del consumo de energía.

Finalmente, que el incremento de consumo energético sea con mayor participación de energía eléctrica permite satisfacer usos finales con menores requerimientos primarios- particularmente de fósiles- y se asocia a beneficios de seguridad energética, eficiencia energética, eficiencia económica y productividad (derivadas de menor intensidad). La energía eléctrica permite también reducir los niveles de contaminación local en las ciudades y reducir las emisiones de gases efecto invernadero, como se explicará en los capítulos siguientes de este estudio.

1.2 La Estructura de consumo final de energía y emisiones en Chile

En este estudio se analizarán escenarios de consumo final de energía para lo que se utilizará como base principal el Balance Nacional de Energía que anualmente elabora el Ministerio de Energía. Los sectores

de consumo final que define el balance son industria y minería (que se presentan juntos por ser representativos de los clientes libres); comercial, público y residencial (que se presentan juntos por agrupar principalmente clientes regulados); el sector energía (los autoconsumos de los sectores de transformación de energía); y los sectores de transporte. En 2015 el consumo final total alcanzó los 278 mil teracalorías. La figura siguiente presenta como se distribuye el consumo entre los sectores de demanda final.

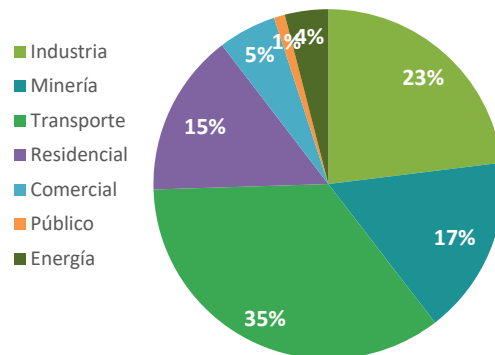


Figura 1.3 Estructura Sectorial del Consumo Final en Chile
 Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía

Respecto del uso de energéticos, los derivados de petróleo- diesel, gasolina, petróleo diesel, gas natural licuado, kerosene, entre otros- representan 57% del consumo. Le sigue el consumo de energía eléctrica con un 22% y leña con 13%.

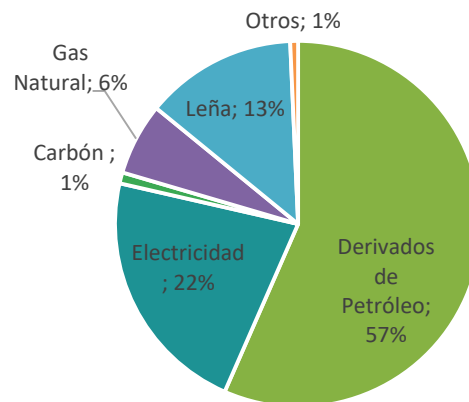


Figura 1.4 Composición de energéticos en consumo final
 Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía

La figura siguiente presenta el inventario oficial de emisiones de gases efecto invernadero de Chile estimado para el año 2013. Se distingue el sector energía que incluye los sectores de calor y electricidad- principalmente generación eléctrica- y los sectores de consumo final. Las a emisiones del sector energía fueron 85,1 millones de tCO₂e, lo que equivale a cerca del 77% de las emisiones nacionales, excluyendo el sector forestal. Como se presenta en la figura siguiente, la combustión en los sectores eléctricos y de transporte representa la mayor proporción de emisiones, alrededor de un 70% de las emisiones totales del sector energético. Los sectores industriales y mineros también presentan niveles importantes de emisiones. El resto de las emisiones proviene de los sectores comercial, público y residencial, principalmente asociados a calefacción de hogares, oficinas y edificios públicos.

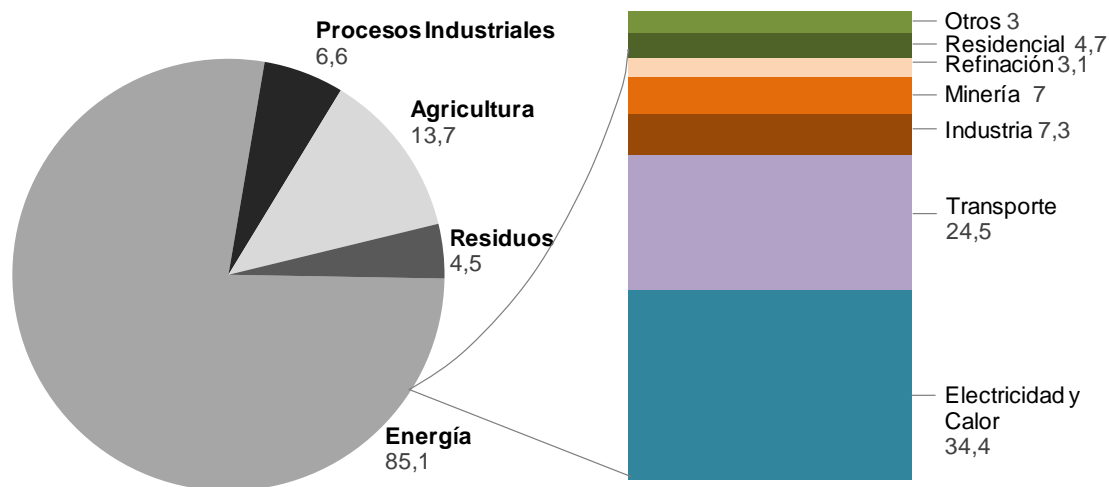


Figura 1.5 Emisiones GEI de Chile por sector en 2013 con detalle del sector Energía, MtCO₂
 Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1990-2013 (SNI Chile, 2016)

1.3 Metodología de proyección energética y de emisiones

El proceso de modelación utiliza como base la herramienta de análisis prospectivo, desarrollado por la División de Prospectiva y Política Energética, en conjunto con la División de Eficiencia Energética del Ministerio de Energía³. La herramienta *Prospectiva E2BIZ*, es un modelo “bottom-up” de proyección del sistema energético con foco en demanda que corresponde a la utilización de modelos de uso final (“accountancy models”), y que consolida y realiza mejoras del desarrollo realizado en el proyecto MAPS⁴. Esta herramienta utiliza el software LEAP⁵, como base para el sistema de cálculo pero extiende sus capacidades mediante interrelaciones con otros programas como excel, visual basic y optimizadores.

³ Proyecto “Elaboración e implementación de herramientas prospectivas”, desarrollado por E2BIZ

⁴ MAPS (que corresponde a las siglas de *Mitigation Action Plans and Scenarios*) Chile es un proyecto que busca estudiar y entregar las mejores opciones que tiene el país para la mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), esto

La herramienta cuenta con métodos y sub-modelos específicos para los sectores de demanda final que define el Balance Nacional de Energía del Ministerio de Energía. Se desarrollan modelaciones para cada uno de los sectores:

- Residencial
- Comercial
- Público
- Industria y Minería
- Transporte

La herramienta además considera la oferta primaria y detalle del sector de generación eléctrica cerrando el balance de energía. En particular, el modelo de generación eléctrica empleado es uninodal y de largo plazo, el cual permite modelar múltiples bloques temporales, despachar según costo marginal y expandir el parque óptimamente bajo restricciones (incluyendo metas de generación por tipos agregados de capacidad, como se realiza para las ERNC).

La herramienta permite proyectar y estudiar cambios en los diferentes usos energéticos para cada sector de la economía y de consumo de los distintos combustibles, lo que permite considerar eficiencias relativas entre energéticos por uso, y, por tanto, también caracterizar en forma directa la eficiencia energética de cada uno de ellos. Este enfoque se asocia a una modelación “bottom up” que es compatible con la evaluación de programas de EE, por ejemplo. La modelación por usos permite un nivel de parametrización importante, lo que hace posible analizar un sinnúmero de escenarios exploratorios

Respecto de la desagregación geográfica, los consumos sectoriales de demanda final se estiman a nivel regional y de acuerdo a las estimaciones del Balance Nacional de Energía (BNE) en sus versiones nacional y regional. El sector generación modela la oferta para los sistemas SING, SIC, Aysén y Magallanes. La expansión y operación del sistema (resultados del modelo) se hace considerando explícitamente la interconexión de los sistemas interconectados SING y SIC. Finalmente, el cierre del balance se estima a nivel nacional.

El modelo es utilizado para evaluar impactos en la estructura de consumo, eficiencia y emisiones de distintos escenarios de penetración de electricidad en los consumos de los sectores de demanda final, lo que permite evaluar distintos indicadores, particularmente costos y beneficios asociados.

con el fin de poder ayudar en la toma de decisiones sobre la política de cambio climático y también en los procesos de negociación internacional. El proyecto comenzó en el 2011 y se desarrolló en tres fases, concluyendo la última en diciembre de 2015. Todos los resultados se pueden encontrar en el sitio web del proyecto. (<http://www.mapschile.cl/el-proyecto/>; Resumen Ejecutivo Fase 3)

⁵ <https://www.energycommunity.org/default.asp>

1.4 Escenarios de Consumo Eléctrico

El desarrollo del proyecto contempla la construcción de distintos escenarios de consumo energético y, en particular, de alto consumo eléctrico consistente con mayores niveles de ingreso esperados para el país y desarrollo tecnológico. La modelación se realiza considerando todos los combustibles que actualmente se utilizan y que podrían usarse para satisfacer los distintos usos de consumo en el futuro. El propósito es poder analizar explícitamente la sustitución entre energéticos en un contexto de alta competitividad de la electricidad (tanto por costos de inversión en tecnología y costos de la propia energía eléctrica) y estudiar los cambios asociados en eficiencia desde una perspectiva agregada, además de impactos en la emisión de contaminantes locales y de Gases de Efecto Invernadero.

Los escenarios serán construidos con base al análisis sectorial. En las secciones posteriores se justificará por qué estos usos son los que presentan mayor potencial para adoptar tecnologías eléctricas en cada sector. En particular, se analiza a través de los escenarios la evolución y estructura de consumo para los sectores:

- Residencial: aumento del consumo eléctrico en usos como cocción, agua caliente sanitaria, y especialmente calefacción.
- Transporte: aumento de la penetración de tecnologías eléctricas, híbridas, etc. en las distintas categorías vehiculares (de pasajeros). En el proyecto no se analiza transporte aéreo, marítimo o internacional.
- Industria y Minería. Para usos térmicos y motrices se analizarán mayores niveles de penetración de la electricidad para los principales sectores productivos.

Para cada uno de estos sectores, se modelan tres escenarios de participación de consumo eléctrico.

- **Escenario conservador (base):** se asocia a proyección de tipo tendencial del consumo de energía y de emisiones de gases efecto invernadero y sin grandes quiebres. Bajo este escenario se incluyen todas aquellas políticas implementadas y comprometidas por el Gobierno.
- **Escenario moderado:** para cada sector se examina un caso con mayor electrificación que el escenario base. En cada sector el escenario de mayor electrificación está relacionado con la competitividad de la tecnología, es decir a los costos de inversión, costo de ciclo de vida, payback, precios relativos de los combustibles, preferencias de los consumidores, aspectos regulatorios, incentivos, entre otros.
- **Escenario optimista:** se construye para lograr una incorporación aún mayor de electricidad. Este escenario se asocia a un cambio de paradigma importante, especialmente en los consumos de calefacción y de transporte, según se detallará más adelante

En los capítulos referentes a cada uno de los sectores se entregan mayores antecedentes respecto de los supuestos y consideraciones de cada uno de estos escenarios.

2 EL SECTOR TRANSPORTE

2.1 Antecedentes del sector transporte

El transporte juega un rol crucial en la vida moderna y su servicio está directamente relacionado con el bienestar social: nos transportamos para trabajar, estudiar, ir al hospital, visitar familiares y amigos. Es también un catalizador indispensable de desarrollo y crecimiento económico. Sin embargo, se asocia a externalidades- o costos que su actividad impone en otros- que hacen que su actividad y crecimiento esté sujeto a políticas y regulación que debieran apuntar al bienestar y desarrollo sustentable. Muchos de estos costos se relacionan con el consumo de combustibles fósiles.

En efecto, uno de los principales problemas del transporte es la intensidad de su consumo de energía: el transporte es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial, representando más del 25% del consumo total de energía (IEA, 2012). Este consumo es especial porque, a diferencia de lo que ocurre con otros sectores de demanda final, éste se realiza en movimiento y no en una ubicación específica. Como consecuencia, la mayor parte, por sobre el 90%, se satisface tradicionalmente con derivados de petróleo fáciles de transportar, relativamente económicos; pero que contaminan nuestras ciudades y contribuyen significativamente al fenómeno del cambio climático.

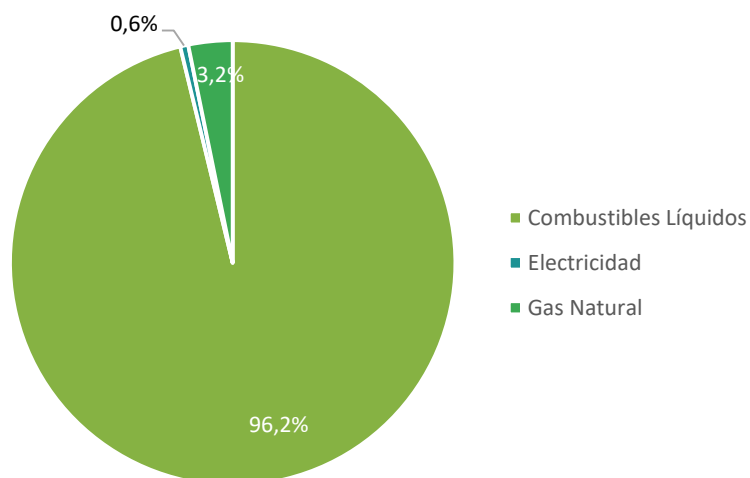


Figura 2.1 Composición del consumo de energía del sector transporte a nivel mundial
Fuente: EIA World Energy Outlook 2016.

En efecto, a nivel global, el sector transporte es una de las principales fuentes de gases efecto invernadero (GEI). Según antecedentes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el sector es responsable del 14% del total de estas emisiones

En Chile, las cifras revelan una estructura de consumo similar a la del mundo, e incluso son más preocupantes: el consumo del sector transporte es importante y se satisface principalmente con derivados del petróleo, el cual se importa desde los países productores. De acuerdo al Balance Nacional

de Energía de 2015, este sector totalizó un consumo energético de 97 mil Teracalorías (Tcal) representando un 35% del consumo final de energía en el país. Por su lado, el 98% de la energía usada en transporte provino de derivados del petróleo.

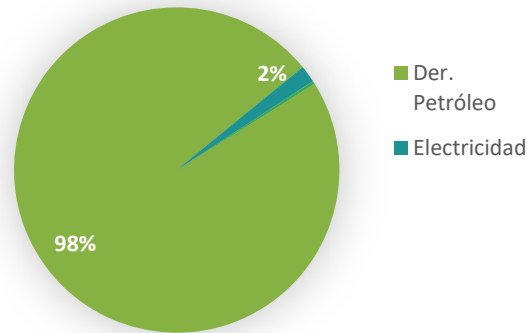
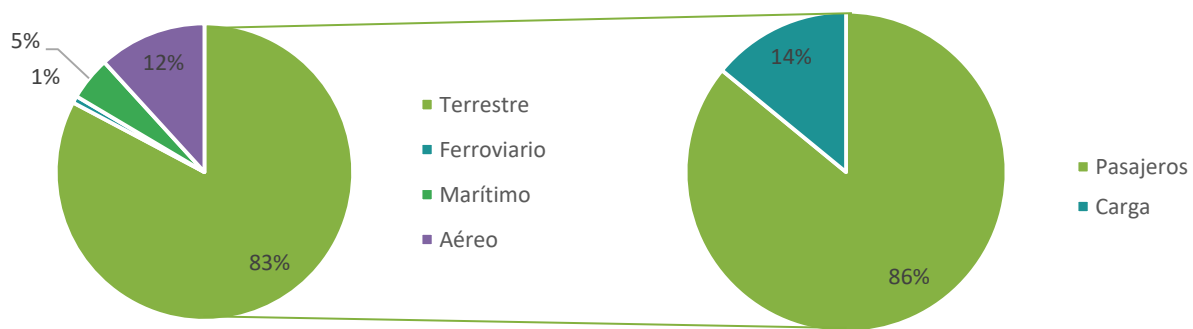


Figura 2.2 Consumo de energía por sector y por fuente de Chile (BNE, 2015)
 Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía

Al desagregar el consumo energético del sector transporte nacional, se aprecia que el transporte terrestre es responsable de la mayor parte de este consumo (83%) seguido por el transporte aéreo (12%) y marítimo (12%). Por otra parte, el principal consumo del transporte terrestre está asociado al transporte de pasajeros (86%): vehículos livianos y medianos, tanto particulares como comerciales, y buses. El restante 14% del consumo energético del sub-sector transporte terrestre corresponde a transporte de carga. De acuerdo a esto, en Chile el transporte de pasajeros es responsable del 71% del consumo de energía total del sector transporte.



Composición del consumo del sector transporte 2015 **Desagregación del consumo terrestre 2015**
Figura 2.3 Consumo de energía por sub-sector y del consumo terrestre de Chile (BNE, 2015)
 Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía

2.1.1 Evolución reciente y perspectivas del transporte de pasajeros

Por décadas muchos estudios han intentado explicar la evolución de la demanda por transporte y del número de vehículos de países y ciudades. Estos estudios han concluido que el ingreso económico de las personas y el crecimiento del país son los determinantes fundamentales del tamaño de la flota vehicular. La evidencia empírica internacional sugiere que los países en crecimiento tenderán a aumentar la tenencia de vehículos- principalmente particulares- en desmedro del uso del transporte público. La figura siguiente revela el alto nivel de correlación entre la tasa de motorización (vehículos por cada 1000 habitantes) de vehículos livianos y medianos y una métrica de ingreso (en este caso el consumo per cápita)⁶. El estudio del Banco Mundial muestra un nivel de correlación lineal $r=0,79$ entre el consumo per cápita y la tasa de motorización, lo que indica una relación lineal fuerte.

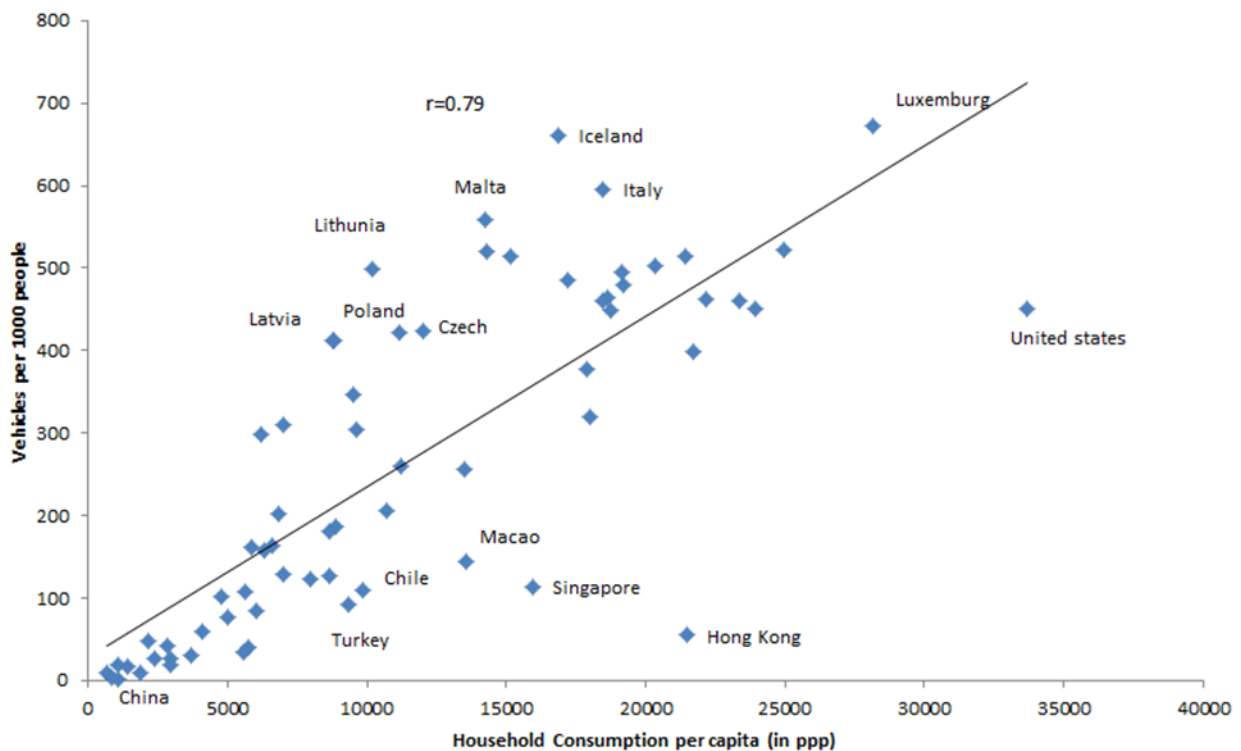


Figura 2.4 Consumo per cápita (PPP) versus vehículos
Fuente: Banco Mundial

En Chile, los antecedentes históricos revelan que el crecimiento de las ventas en el parque automotriz ha sido especialmente relevante para los vehículos livianos y medianos. En efecto, el crecimiento económico de Chile ha llevado a que las ventas, parque de vehículos y tasa de motorización aumenten. La figura siguiente muestra la evolución de las ventas de vehículos livianos y medianos. Se observa que las ventas se han más que duplicado entre 2004 y 2014.

⁶ El consumo per cápita es una métrica del ingreso de las personas y superior al PIB per cápita.

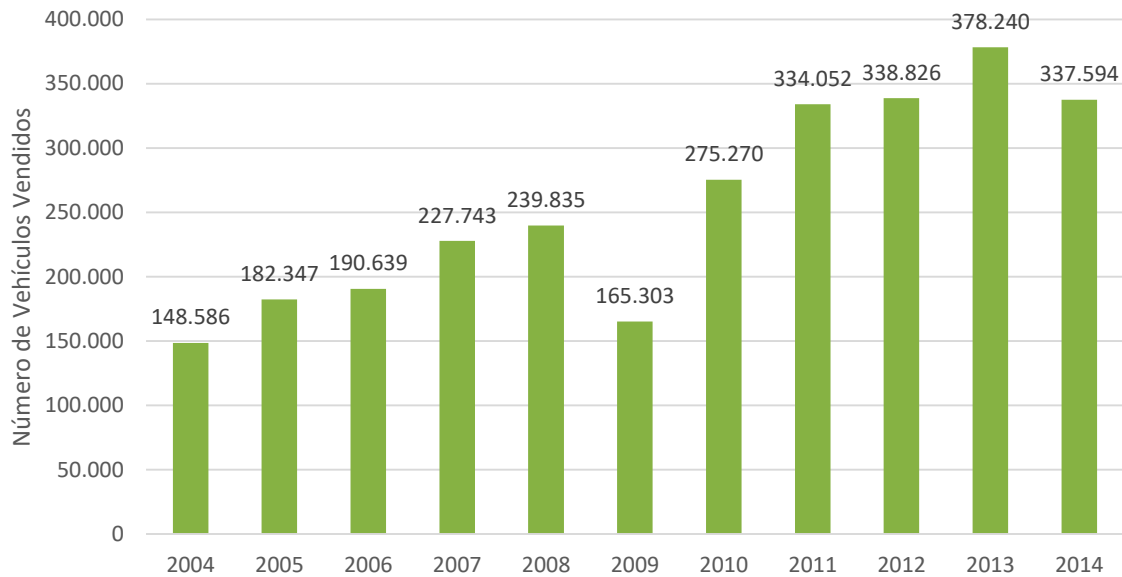


Figura 2.5 Ventas de vehículos livianos y medianos (ANAC, 2016)

Como consecuencia del aumento de las ventas, el parque y tasa de motorización también han crecido significativamente. Según antecedentes de la Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G. (ANAC), en la década entre 2004 y 2014, el parque de vehículos livianos y medianos de un nivel de 2,1 millones en 2004 creció a más de 4 millones en 2014, lo que representa un crecimiento mayor al 90%. Algo similar ocurre con la tasa de motorización donde ésta aumenta de 130 en 2004 a 226 vehículos por mil personas en 2014 (74% de crecimiento).

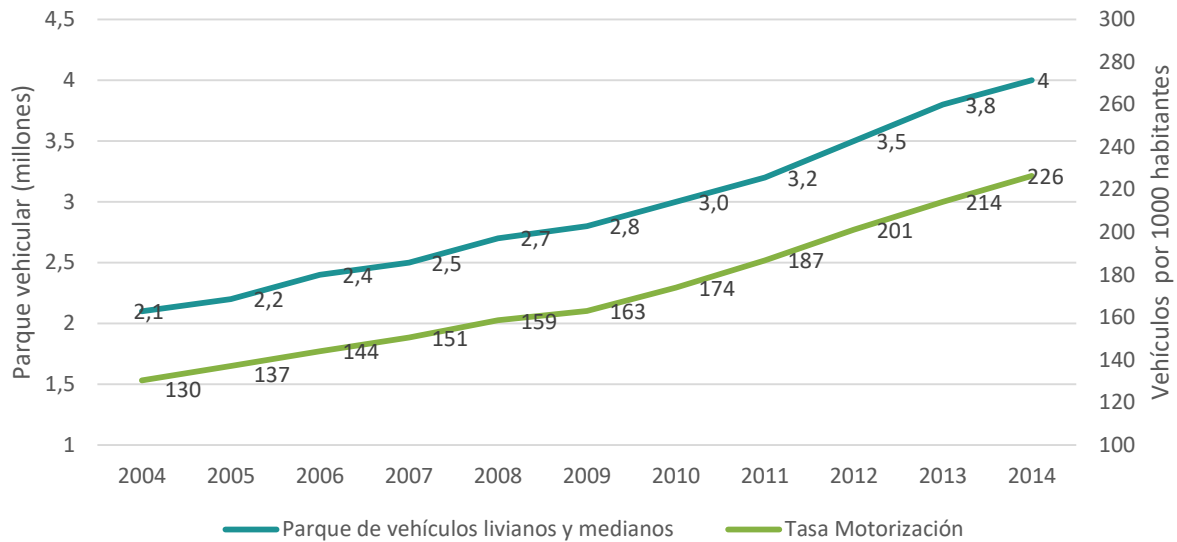


Figura 2.6 Parque versus tasa de motorización (ANAC, 2016)

Por otro lado, de acuerdo a ANAC, el parque de camiones y buses también presenta niveles de crecimiento importantes, pero proporcionalmente menor al de vehículos livianos. El parque de camiones pasa de 131 mil vehículos en 2004 a prácticamente 190 mil en 2014, es decir un incremento de 45%. En el mismo periodo el parque de buses crece casi 20%, desde 41 mil a 49 mil buses.

La economía chilena seguirá creciendo, lo que se asociará a una demanda cada vez mayor por movilidad y particularmente asociada a la tenencia de vehículos particulares. Con relación a esto, la figura siguiente muestra la partición modal de viajes en vehículos particulares para distintas ciudades del mundo caracterizadas por su PIB per cápita. Suponiendo que el largo de los viajes en automovil es igual o mayor en promedio que en cualquier otro modo (tren, buses, etc), la participación equivalente en pasajero-kilómetros (PKM) también debiera ser igual o mayor. Se distinguen tres trayectorias definidas, una trayectoria con mayor nivel de automoviles particulares en la partición modal, denominado modelo norteamericano; un modelo europeo en donde la participación de los automoviles es considerablemente más baja, y un modelo denominado eficiente donde la participación de automoviles se mantiene en torno al 30%, ejemplo de esto serian ciudades como Tokyo, Amsterdam y Hong Kong.

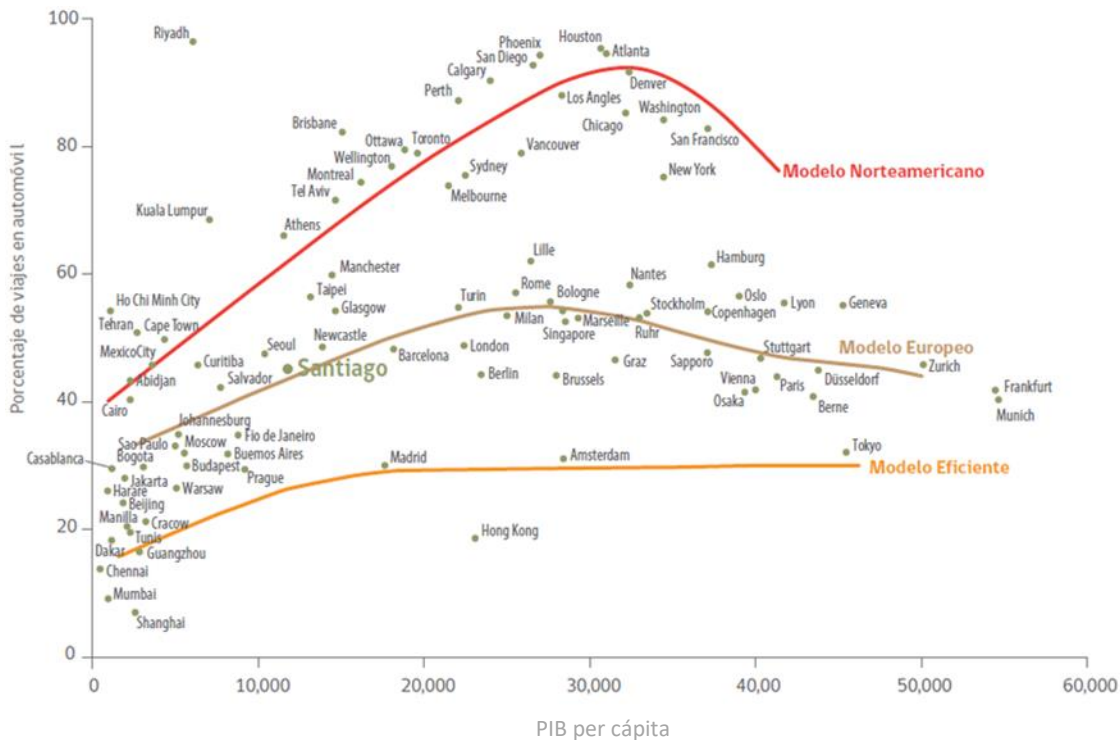


Figura 2.7 Partición modal de viajes en automóvil de distintas ciudades del mundo vs PIB per cápita
 Fuente: Plan Maestro de Transporte de Santiago 2025, sobre la base de UNEP y SYSTRA

Una característica de estos modelos o trayectorias esperadas es que se relacionan a la densidad poblacional de las ciudades. Se observa que ciudades menos densas tienden a seguir el modelo norteamericano, mientras la participación del automóvil desciende hacia ciudades mas densas. Estos antecedentes permiten validar que en Chile algunas ciudades podrían seguir el modelo norteamericano hacia el año 2030-2050, mientras que otras se encontrarían en un nivel intermedio entre el modelo europeo y norteamericano (MAPS 2014)⁷.

Este crecimiento esperado de la actividad de transporte nos permite inferir que este sector es relevante frente al desafío que nos debiéramos imponer para mejorar la calidad de vida de las ciudades y su desarrollo sostenible. La energía eléctrica en el sector transporte puede ser una oportunidad hacia la sustentabilidad dado que ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales. Se pueden esperar no sólo ahorros para el operador de los vehículos, sino también un importante impacto en la calidad de vida de las ciudades. Menor contaminación acústica y la reducción de la contaminación del aire mejoran

⁷ Estos niveles de partición modal implican requerimientos de inversión que mitiguen los efectos de congestión que implicaría este escenario. Estos requerimientos de inversión disminuirían junto con las participación modal de automoviles en caso de ejecutarse opciones o políticas que apunten a una partición modal mas eficiente.

la calidad de vida y permite reducir los costos de salud asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

2.1.2 La alternativa de vehículos eléctricos

En la experiencia internacional, el uso de vehículos eléctricos en el transporte ha pasado a ser una estrategia fundamental para conseguir sistemas de transporte sustentables. Por supuesto, esto junto con otras políticas que buscan aumentar la participación modal del transporte público o bicicletas, incrementar las tasas de ocupación, optimizar la planificación de las ciudades, entre otras que buscan revertir el crecimiento del transporte de vehículos particulares.

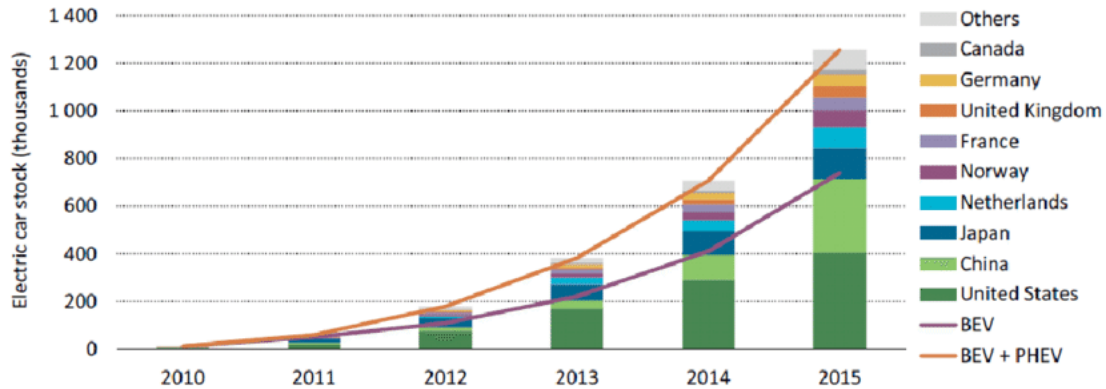
Barreras tradicionales a la adopción de vehículos eléctricos han sido su mayor costo- respecto de tecnologías convencionales- y baja autonomía; además del requerimiento de instalaciones para carga (rápida) y la confianza por la tecnología. El costo de las baterías tiene una estrecha relación con el costo inicial de los vehículos, pero además se debe considerar que esta componente debe ser sustituida, en promedio, cada 160 mil kilómetros -a pesar de que la vida útil de las baterías va en aumento.

Los beneficios de la electricidad en cuanto a contaminación local, seguridad energética y mitigación de emisiones de gases efecto invernadero han motivado e incentivado el desarrollo y adopción de vehículos eléctricos. Los apoyos han sido en investigación, en facilitar condiciones habilitantes para la tecnología (instalación de puntos de carga), distintos incentivos económicos (subsídios, reducción de impuestos), e incentivos de uso y acceso. Esto ha reducido de manera importante las barreras y la tecnología ya está mostrando ser competitiva frente a las tecnologías convencionales.

El resultado es que en los últimos años el desarrollo de la tecnología de vehículos eléctricos ha sido vertiginoso. El aumento de las ventas está directamente ligado a la disminución del precio de estos vehículos -consecuencia del desarrollo tecnológico- y del impacto sobre éstas de una mayor participación en el mercado como es usual de un proceso de adopción tecnológica. Países avanzados son Noruega y Alemania que ya tienen fecha para la prohibición de ventas de vehículos propulsados con motores diésel y gasolina (2025 y 2030 respectivamente), y se espera que Holanda se una pronto a este desafío. China aceleró sustantivamente su avance y ha definido metas a distintos plazos -como por ejemplo contar con un parque de 5 millones de vehículos eléctricos en el 2020. En Latinoamérica recién operan proyectos pilotos de buses o taxis eléctricos en Uruguay, Brasil, Colombia, Ecuador, Argentina y Chile. Aunque en la mayoría de los casos son pilotos de presentación tecnológica con muy pocas unidades circulando.

La figura siguiente presenta la evolución del parque internacional de vehículos eléctricos entre 2010 y 2015, destacándose en el 2015 la relevancia de Estados Unidos y China. Se distingue entre la categoría vehículo híbrido eléctrico enchufable o PHEV (del inglés plug-in hybrid electric vehicle) de la de vehículo eléctrico a batería o BEV (del inglés battery electric vehicle)⁸.

⁸ El vehículo híbrido enchufable comparte las características de un vehículo híbrido eléctrico tradicional y de un vehículo eléctrico, ya que está dotado de un motor de combustión interna (gasolina, diésel o flex-fuel) y de un motor eléctrico acompañado de un paquete de baterías, pero con la diferencia que éstas pueden recargarse enchufando el vehículo en el sistema de suministro eléctrico.



Note: the EV stock shown here is primarily estimated on the basis of cumulative sales since 2005.

Sources: IEA analysis based on EVI country submissions, complemented by EAFO (2016), IHS Polk (2014), MarkLines (2016), ACEA (2016a), EEA (2015) and IA-HEV (2015).

Figura 2.8 Parque de autos eléctricos por país (IEA)

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía

El precio de los vehículos eléctricos será uno de los principales determinantes de la rapidez en su adopción futura. En este sentido, uno de los componentes tecnológicos claves son las baterías. A pesar que distintas fuentes presentan cifras diferentes, el precio de las baterías ha caído de valores en torno a US\$ 1.000/ kWh en 2009 a valores cercanos a los US\$ 200/ kWh en la actualidad. Se espera que esta tendencia a la baja continúe. De acuerdo a General Motors y Tesla es posible que este costo baje del umbral de los US\$100/kWh⁹ en los próximos 5 años. La figura siguiente muestra la evolución al 2015, y las proyecciones de General Motors y Tesla, de precio y densidad de las baterías.

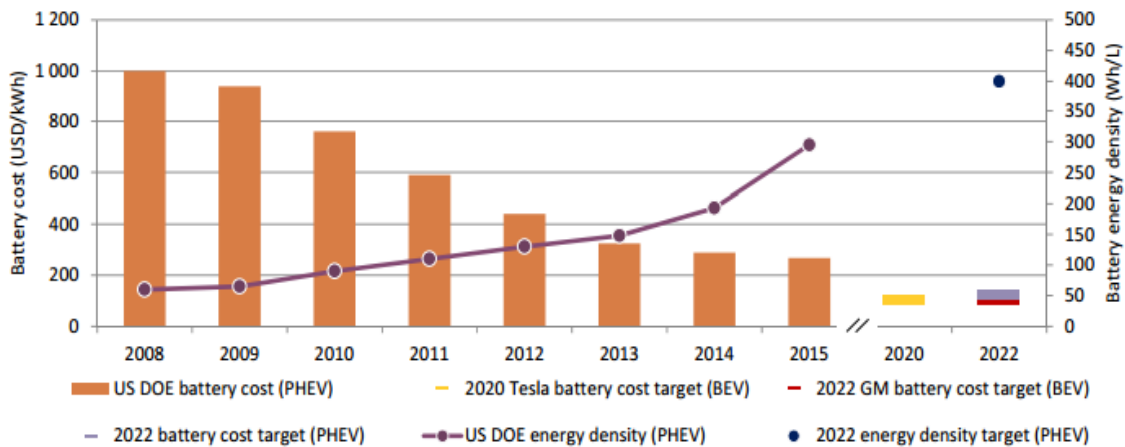


Figura 2.9 Costo y densidad energética de las baterías de ion-litio (IEA,2016¹⁰)

⁹ Expertos e instituciones- como McKinley- identifican el nivel de precio de US\$100/kWh como el punto de indiferencia para que los vehículos eléctricos ya sean más competitivos que los convencionales.

¹⁰ Global EV Outlook2016, Beyond one million electric cars

La figura siguiente presenta la evolución de los precios de las baterías y directamente su relación con las ventas de vehículos eléctricos en Europa, Estados Unidos y China entre 2010 y 2016, en cuyo periodo las ventas habrían crecido a una tasa promedio anual de 160%. La estimación de McKinsey es más cautelosa que la de Tesla y General Motors respecto del precio futuro de la batería y pronostica un nivel bajo US\$200/kWh en 2020 y bajo los US\$100/kWh en 2030.

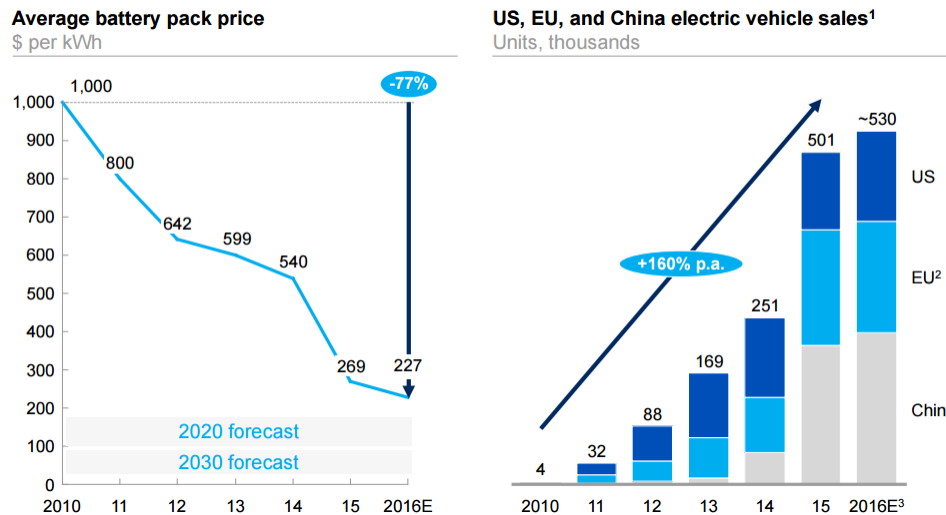


Figura 2.10 Evolución de precio de baterías y ventas de vehículos eléctricos (McKinsey & Company, 2017¹¹)

Por otra parte, los niveles de autonomía de los vehículos se han incrementado progresivamente y los sistemas de carga son cada vez más rápidos. Modelos como Nissan Leaf y Tesla Modelo S aumentaron su autonomía de 120 y 330 kilómetros por carga en 2013 a 170 y 400 kilómetros por carga en 2017, respectivamente¹². Actualmente el Nissan Leaf permitiría una carga- en estaciones de carga rápida- de 97-153 kilómetros en 30 minutos mientras que el Tesla unos 274 kilómetros en 30 minutos.

En concordancia con estas tendencias, en el mercado ya existen alternativas de vehículos eléctricos con precios bastante competitivos. Se destacan a modo de ejemplo y en moneda local, el Hyundai Ioniq (\$24 millones¹³), el Renault Zoe (\$25 millones¹⁴), el Mitsubishi I-MIEV HatchBack (\$ 31 millones) o el BMW i3 HatchBack (\$ 43 millones¹⁵).

¹¹ Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability

¹² Según Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability, McKinsey & Company 2017.

¹³ <http://hyundai.cl/modelos/ioniq-electrico/37>. Revisada el 5 de mayo de 2017.

¹⁴ <https://www.renault.cl/modelos/pasajeros/zoe.html>. Revisada el 5 de mayo de 2017.

¹⁵ <https://top-ten.cl/vehiculos/electricos>. Revisada el 5 de mayo de 2017.

Sobre la base de la tendencia en el desarrollo tecnológico en términos de costos y prestaciones, y el crecimiento progresivo de las ventas, se sostiene que los vehículos eléctricos serán cada día más competitivos y podrían, incluso, llegar a dominar el mercado automotriz. La pregunta es cuando esto podría ocurrir: se espera que al año 2030 el costo de un vehículo eléctrico podría ser similar al de los vehículos convencionales más económicos.

En el caso de los buses el análisis no es distinto. El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA, analizó los costos de distintas tecnologías de buses de transporte público en Santiago de Chile y otras ciudades, sugiriendo que los buses eléctricos ya serían más competitivos que los convencionales. La figura siguiente presenta los costos de ciclo de vida para las distintas tecnologías de buses: el bus diesel- con un costo de ciclo de vida en torno a US\$1,7 millones- resultaría más caro que uno eléctrico- con un costo de ciclo de vida en torno a US\$1,3 millones. Los menores costos de energía, mantenimiento y revisiones del bus eléctrico permitirían rentabilizar las inversiones adicionales.

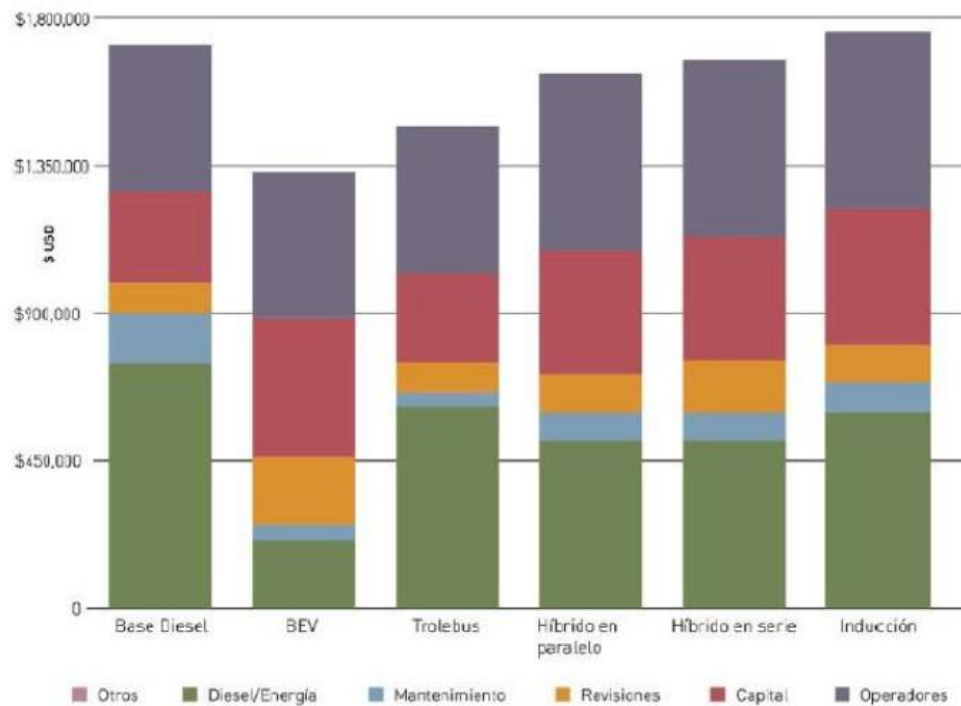


Figura 2.11 Costo de ciclo de vida para distintas tecnologías de buses en Santiago, miles de dólares- valor presente neto a 10 años (PNUMA, 2016)

2.2 Escenarios de consumo futuro de energía

Las fuentes energéticas actualmente en uso y la transición hacia otras tienen consecuencias relevantes para el desarrollo económico y social. Es importante examinar qué costos y beneficios se perciben entonces por satisfacer los requerimientos de transporte con un combustible alternativo a los derivados de petróleo. Estos costos y beneficios dependerán de condiciones tecnológicas, de mercado y económicas que permitan fundamentar distintos niveles de penetración de la electricidad.

En Chile, la participación de vehículos eléctricos en las ventas de vehículos livianos ha sido marginal durante los últimos años, alcanzando un parque de 32 vehículos eléctricos al año 2015. En el caso de los vehículos híbridos estos suman 1.912 vehículos vendidos hasta el año 2015 según las cifras de ANAC. La principal razón para el lento crecimiento de estos vehículos en el mercado nacional es el alto costo de inversión que se debe incurrir en relación al valor de un vehículo convencional. Además, la baja autonomía y la escasez de puntos de carga forman una barrera adicional para la expansión de esta tecnología. Sin embargo, las tendencias recientes sugieren que los costos de las tecnologías eléctricas seguirán trayectorias decrecientes y que serían competitivas frente a tecnologías tradicionales antes de lo esperado.

En base a estas tendencias, para Chile se han definido algunos escenarios futuros respecto de la penetración de la movilización eléctrica, a modo de dimensionar sus efectos en la matriz energética, identificar las posibles brechas que se requieren enfrentar y los beneficios medioambientales y de salud de la población que se podrían internalizar.

Existen múltiples definiciones de escenarios, pero existe un acuerdo respecto de que no son predicciones, sino que ilustraciones de distintos futuros alternativos. En este caso compararemos un caso donde la penetración de la electricidad es baja -escenario conservador- y uno donde ésta es más alta-escenario optimista. La comparación de indicadores de los dos escenarios permite inferir costos y beneficios de mayor electrificación en el transporte. Por ejemplo, indicadores de ahorro de consumo de combustible fósil, ahorro de costos de combustible, reducción de emisiones de gases contaminantes y de gases efectos invernadero- tanto directas como indirectas-, reducción de admisiones hospitalarias de adultos mayores o niños, entre varios otros.

La construcción de escenarios de largo plazo en este sector requiere considerar aspectos clave como innovación y adopción de la tecnología, y su relación con los precios de largo plazo de los *commodities*, la infraestructura, los paradigmas regulatorios, las restricciones ambientales y de sustentabilidad y las preferencias de los usuarios: todos asuntos complejos de analizar. La contribución fundamental de los escenarios es ayudar a explorar las incertidumbres principales asociadas a los sistemas energéticos futuros y explicitarlas.

Escenarios de consumo energético analizados

Los tres escenarios de consumo energético para el sector transporte considerados son:

- *Escenario conservador* que da cuenta de condiciones históricas y que proyectan niveles de consumo y cambios en su estructura consistentes con las tendencias de crecimiento del consumo. Este es un escenario de referencia- o base- contra el cual se evalúan costos y beneficios de los escenarios de mayor consumo eléctrico.
- *Escenario moderado* contempla mayores porcentajes de adopción de tecnologías eléctricas consistentes con supuestos de expectativas tecnológicas, crecimiento económico, condiciones de mercado y regulatorias
- *Escenario optimista* contempla incluso mayores niveles de penetración eléctrica consistentes con expectativas tecnológicas, crecimiento económico, condiciones de mercado y regulatorias.

En los tres escenarios, para la proyección energética del sector, se incorporan explícitamente fenómenos como la disminución de la tasa de ocupación o el incremento de la participación modal de vehículos particulares. En general estos fenómenos son tendenciales, y responden a factores culturales, económicos, tecnológicos y también regulatorios. Por otra parte, se asume que el rendimiento de los vehículos convencionales crece gradualmente- de manera proporcional- a la entrada de vehículos nuevos más eficientes.

Por otra parte, la construcción de los escenarios indicados considera la aplicación y continuación de las siguientes políticas:

- Políticas que fomenten una partición modal más eficiente: Se considera el desarrollo de infraestructura vial para el transporte público, infraestructura para bicicletas, peatonización de áreas públicas. Además, se considera un crecimiento tendencial de la participación de trenes urbanos, crecimiento que incluye los actuales proyectos en construcción.
- Políticas de eficiencia energética: Se consideran programas de conducción eficiente y definición de estándares de rendimiento mínimo para vehículos nuevos.

Se espera que en el largo plazo el crecimiento del consumo energético del sector se modere por los cambios tecnológicos que afectarán al parque y por fenómenos de saturación que contengan el uso, principalmente de vehículos particulares. Las proyecciones de parque (número de vehículos), o supuestos de expansión de metro o construcción de infraestructura no cambian respecto del escenario conservador.

La diferencia entre escenarios será la participación de la electricidad en cada categoría vehicular: buses, taxis y vehículos particulares. Esta diferencia depende fundamentalmente de la competitividad de las tecnologías eléctricas versus las convencionales. Los beneficios y costos de tener más o menos electricidad se deprenen de la comparación de cada escenario con el escenario conservador. En la sección siguiente se detallan los supuestos de costos y modelación asociados a la entrada de vehículos eléctricos en las distintas categorías y escenarios.

2.3 Metodología general de proyección energética en transporte

La metodología utilizada para estimar consumos de energía y emisiones del sector transporte se basa en las empleadas recientemente en los proyectos Mitigation Action Plans and Scenarios (MAPS) Fase 2 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), y Actualización Metodológica del Modelo STEP desarrollado por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA) del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile. Esta metodología utiliza como variables fundamentales de demanda de transporte a la actividad de transporte de pasajeros, expresada en pasajero-kilómetro (PKM) y la actividad de transporte de carga expresada en tonelada-kilómetros (TKM). Este enfoque permite una modelación explícita de los cambios de modo. Se requiere proyección de PKM urbano e interurbano para el transporte de pasajeros y de proyección de TKM urbano e interurbano para el transporte de carga, lo que se lleva a cabo para cada región del país.

En cada caso, se estima econométricamente el requerimiento de transporte, por ejemplo, PKM para transporte de pasajeros, o TKM para el transporte de carga. En general, se plantean relaciones que dependen del nivel de ingreso per cápita, para el caso del PKM, y del nivel de actividad regional, para el caso del TKM. Estas relaciones se estiman para transporte urbano e interurbano para cada una de las regiones del país. Para estimar los consumos el nivel de actividad se desagrega en modos mediante antecedentes de partición modal (PKM por modo), tasas de ocupación de los modos y rendimientos.

La figura siguiente resume la metodología de proyección de uso energético del sector de transporte:

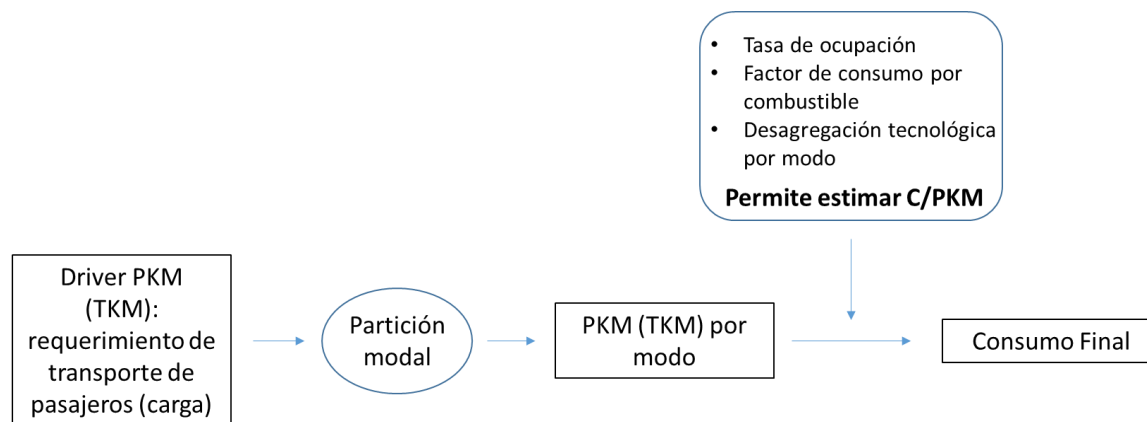


Figura 2.12 Metodología de estimación de consumo en sector transporte
Fuente: Elaboración propia

Pasajero-kilómetro (PKM) y Pasajero-kilómetro totales (PKMT)

En el caso del transporte de pasajeros el nivel de actividad del consumo energético es pasajero-kilómetros (PKM). Los pasajero-kilómetro totales (PKMT) en un año corresponden a la distancia total recorrida por individuos en viajes urbanos. Los PKMT pueden obtenerse teóricamente como:

$$PKMT = \sum_j d_j = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_j} d_{ij}$$

Ecuación 6 Pasajeros-Kilómetro Totales

Donde:

J: el número de habitantes de la ciudad.

n_j : el número de viajes que cada individuo realiza.

d_{ij} : la distancia en kilómetros que recorre el individuo j en el viaje i

d_j : la distancia total en kilómetros que recorre el individuo j al año. Es decir, $d_j = \sum_{i=1}^{n_j} d_{ij}$

Se procede a estimar d_j medio por habitante, o PKM, que permite obtener los PKMT como:

$$PKMT = PKM * J$$

Ecuación 7 Pasajeros-Kilómetro Totales

En cada región se estiman relaciones econométricas para estimar la demanda de transporte (PKM) de un pasajero promedio (PKM). Los antecedentes históricos corresponden a datos proporcionados por SECTRA en el contexto del proyecto MAPS y se consideran los modos bus, tren (metro), taxi, auto y bicicleta. A modo de ejemplo, El PKM urbano medio (por habitante) de la Región Metropolitana queda definida por el PIB per cápita regional (PPC) y un rezago en la variable dependiente:

$$\ln(PKM_t) = 3,730394 + 0,24277 \ln(PPC) + 0,52286 \ln(PKM_{t-1})$$

Ecuación 8 Estimación de pasajero-kilómetro

En la siguiente figura se aprecia la salida del modelo econométrico y su proyección tendencial hasta el año 2050 en azul, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección (líneas rojas).

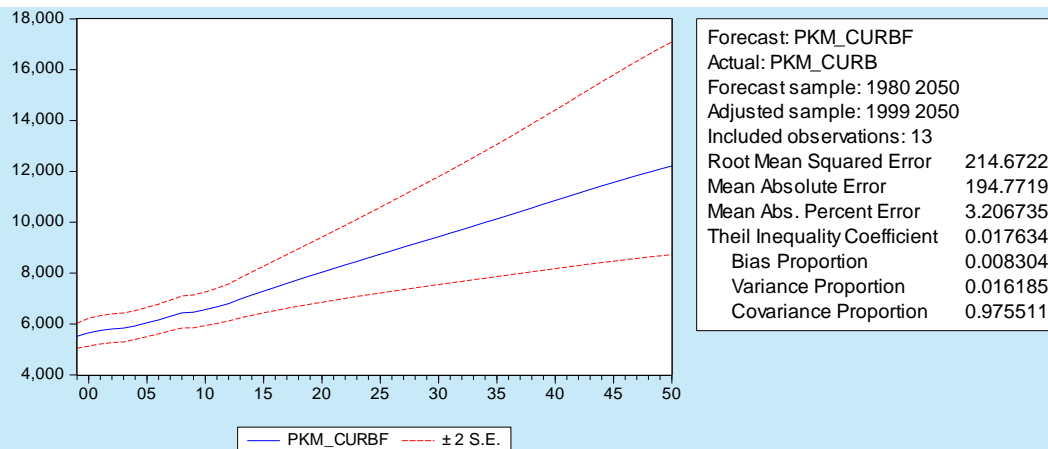


Figura 2.13 Modelo Econométrico

Para calcular el consumo del transporte de cada región se utilizan las series de PKM proyectadas. Esto requiere desagregar la proyección de PKM en modos para poder posteriormente estimar consumos energéticos y emisiones. Para ello se estima un modelo de partición modal para cada región que considera el efecto explícito del ingreso per cápita. En este caso, el crecimiento del ingreso hace que el uso de vehículos particulares desplace a los otros modos. Por tanto, la partición es consistente con la trayectoria de crecimiento utilizada en este estudio.

Consumo Energético

Se calcula el consumo energético (CE) para la región dada según la siguiente ecuación:

$$CC_i \left[\frac{TJ}{año} \right] = M_i [\%] * \frac{PKM[km/año] * Pobl[per]}{TO_i \left[\frac{per}{veh} \right] * FdC_i \left[\frac{km-veh}{TJ} \right]}$$

Ecuación 9 Consumo Energético

Donde:

CCi : Consumo energético para tipo de transporte de pasajeros i

Mi : Partición modal para tipo de transporte de pasajeros i

PKM : Demanda per cápita regional de transporte de pasajeros

Pob : Población regional

TOi : Tasa de ocupación de tipo de transporte de pasajeros i

FdCi : Factor de consumo (rendimiento) de tipo de transporte de pasajero i

Para considerar distintas categorías vehiculares, la partición modal se desagrega en éstas. Por ejemplo, la partición modal de vehículos privados puede desagregarse en vehículos eléctricos, diésel y gasolina.

Metodología de penetración de vehículos eléctricos para cada escenario

El parque total de vehículos, en número total, será idéntico en todos los escenarios, y su crecimiento se estimará indirectamente a partir de los consumos de energía resultantes. Interesa determinar qué fracción de las ventas corresponderá a vehículos eléctricos para definir cada escenario. La ecuación que rige la evolución del parque vehicular es:

$$s_t = v_t + s_{t-1} - \delta \cdot s_{t-1}.$$

Ecuación 10 Evolución parque vehicular

Donde s_t es el stock de vehículos en un año t , v_t las ventas de nuevos vehículos y δ la tasa de obsolescencia. En esta sección se presentan los supuestos y metodología para estimar la penetración de las ventas de vehículos eléctricos en los tres escenarios.

Para construir escenarios de ventas- y posteriormente parque de vehículos- se desarrolla un modelo de adopción tecnológica: una curva tipo S. Por lo tanto, la penetración de las tecnologías eléctricas en transporte dependerá de la competitividad de las tecnologías. Una métrica para ello es el periodo de recuperación del capital o *payback*. Actualmente comprar un vehículo eléctrico es más caro que comprar uno convencional (sea ΔI la diferencia de precios o de la inversión adicional); pero su uso conlleva ahorros de costos en la operación anual (Δc) que se asumen constantes en el tiempo. De esta manera, un indicador simplificado del periodo de recuperación del capital es:

$$P = \frac{\Delta I}{\Delta c}$$

Ecuación 11 Recuperación del capital

Por su lado, la curva S -participación de los vehículos eléctricos de las ventas cada año- depende del periodo de retorno, el que variará en el tiempo según la inversión adicional. La metodología requiere entonces: (1) los pronósticos de la inversión adicional, para luego obtener (2) el periodo de retorno cada año, y finalmente (3) la curva de adopción- representada por la fracción de las ventas de la tecnología eléctrica cada año. El modelo considera en los escenarios el recambio de baterías y una tasa social de descuento de 6% definida por el Ministerio de Desarrollo Social.

Participación de ventas de vehículos eléctricos

Para proyectar la participación de las ventas de vehículos eléctricos se utiliza un modelo de difusión tecnológica basado en el periodo de retorno de los costos adicionales necesarios respecto de un vehículo convencional.

$$S(P, t) = A(t) * M(P)$$

Ecuación 12 Modelo de difusión

En donde

P : Periodo de retorno (“*payback*”) en el año t . P varía en el tiempo y depende de ΔI .

$S(P, t)$: Participación en las ventas totales en el año t dado el periodo de retorno P .

$A(t)$: Tasa de adopción de la tecnología al año t .

$M(P)$: Participación máxima en las ventas dado el periodo de retorno P

La tasa de adopción se calcula utilizando un modelo de difusión de Bass que se expresa como:

$$A(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)(t-t_0)}}{1 + \frac{p}{q} e^{-(p+q)(t-t_0)}}$$

Ecuación 13 Tasa de adopción

Donde t_0 representa el año que se considera inicial para el ingreso de la tecnología, p representa el coeficiente de innovación caracterizando los usuarios que adoptan la tecnología tempranamente y q un coeficiente de imitación que caracteriza los usuarios que adoptan la tecnología más tarde.

La participación máxima de mercado se estima como:

$$M(P) = e^{-\Delta p \cdot P}$$

Ecuación 14 Participación máxima

Donde, Δp es una medida de la sensibilidad del *payback*.

La estimación del modelo de difusión requiere entonces estimar distintas trayectorias de *payback* que dependen de la proyección de inversión incremental. Estas varían según la categoría vehicular: vehículos privados y taxis. Los valores de p , q y Δp se toman de la literatura internacional.

2.3.1 Estimación del *payback* en condiciones actuales

El *payback* o recuperación del capital será un insumo fundamental para poder estimar las trayectorias de penetración de vehículos eléctricos en las distintas categorías. El *payback* dependerá de cada categoría vehicular: vehículos particulares; taxis; buses. El propósito de esta sección es comprender por qué el *payback* es un indicador de la competitividad de la tecnología.

A continuación, se estima, simplificada, el *payback* para cada uno de estos modos, los que representan condiciones generales del mercado actual. La tabla siguiente muestra precios de referencia de los vehículos actualmente, donde los vehículos particulares y taxis convencionales se asume que operan con gasolina, mientras que para el caso de los buses convencionales se asume que utilizan diésel.

Categoría	Convencional	Eléctrico
Particular	12.000.000	24.000.000
Taxi	10.500.000	24.000.000
Bus	124.800.000	280.800.000

Tabla 1. Precios de referencia actuales de vehículos (en \$)
Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla, presenta los supuestos que permiten estimar los costos operacionales de cada categoría vehicular y tecnología.

Variable	Valor	Unidad
Precio gasolina	750	\$/L
Precio diesel	500	\$/L
Precio electricidad	100	\$/kWh
Nivel de actividad taxis	90.000	km/año
Nivel de actividad livianos	15.000	km/año
Nivel de actividad buses	115.000	km/año
Mantenimiento convencional	4,5	cUS\$/km
Mantenimiento eléctricos	3	cUS\$/km
Rendimiento gasolina	12	km/L
Rendimiento Veh. eléctrico	6	km/kWh
Rendimiento bus diesel	2,5	km/L
Rendimiento bus eléctrico	1	km/kWh
Precio dólar	650	\$/US\$

Tabla 2. Antecedentes relevantes para el cálculo
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de estimación de *payback* revelan que actualmente la tecnología resulta rentable para taxis, pero no así para vehículos privados dado que los ahorros operacionales no permiten compensar el costo incremental de inversión en un plazo menor al de la vida útil¹⁶.

Categoría	Inversión adicional (\$)	Ahorro de costos operacionales (\$)	Payback (años)
Privados	12.000.000	828.875	14
Taxis	13.500.000	4.973.250	3
Buses	156.000.000	14.000.000	11

Tabla 3. *Payback tecnologías*
Fuente: Elaboración propia

En términos de reducción de costos de combustibles, las ventajas de la electromovilidad son considerables. Asumiendo los mismos precios de electricidad y combustible del ejercicio anterior, el costo de combustible por kilómetro de un vehículo liviano es en promedio 63\$/km para un vehículo a gasolina, y de 17\$/km para un vehículo eléctrico. En el caso de los buses, el costo por kilómetro de un bus diésel es 200\$/km, mientras que un bus eléctrico gasta aproximadamente 100 \$/km.

El sistema de transporte Transantiago también reduciría de manera importante sus costos operacionales incluso si el 100% de la flota fuera eléctrica. En este caso, los ahorros anuales por consumo de combustible serían de aproximadamente US\$ 140 millones por año, mientras que la inversión adicional (respecto de una flota convencional) estaría en torno a los US\$1500 millones lo que permitiría recuperar la inversión en un periodo aproximado de 11 años¹⁷.

¹⁶ La estimación del *payback* presentada no considera reemplazos por baterías lo que sí se realiza en el modelo de flujo de caja descontado que afina estas estimaciones. De todas maneras es una buena aproximación y dentro del nivel de error: por ejemplo, al incluir el reemplazo de baterías y descontando al 6%, el *payback* aumenta a 4 años en el caso de los taxis y a 17 años en el de los vehículos particulares.

¹⁷ Cálculos se basan en antecedentes encontrados en http://www.dtpm.cl/descargas/estudios/lanzamiento/Memoria%20MT_TS.pdf, y <http://www.latercera.com/noticia/la-apuesta-de-chiletra-por-el-transantiago/>

2.3.2 Supuestos de estimación de escenarios

En esta sección se presentan los principales supuestos que permiten construir los distintos escenarios de penetración de vehículos eléctricos. Algunos supuestos son transversales a los escenarios mientras que otros dependen de cada uno de ellos. Estos antecedentes permitirán modificar los *payback* en el tiempo y a través de escenarios para construir las curvas de penetración de autos eléctricos en base al modelo de difusión.

Precio de las baterías

En base a los antecedentes revisados, se considera para los tres escenarios y de forma conservadora una trayectoria para el precio de las baterías como en la siguiente figura. El costo de las baterías tiene una estrecha relación con el costo inicial de los vehículos, pero además se debe considerar que esta componente debe ser sustituida, en promedio de acuerdo a los modelos existentes, cada 8 años o cada 160.000 kilómetros. La duración o ciclos de carga que son capaz de soportar las baterías es otro factor que ha evolucionado, expertos señalan que la duración de las baterías podría llegar a 300.000 kilómetros o hasta 15 años en el mediano plazo¹⁸.

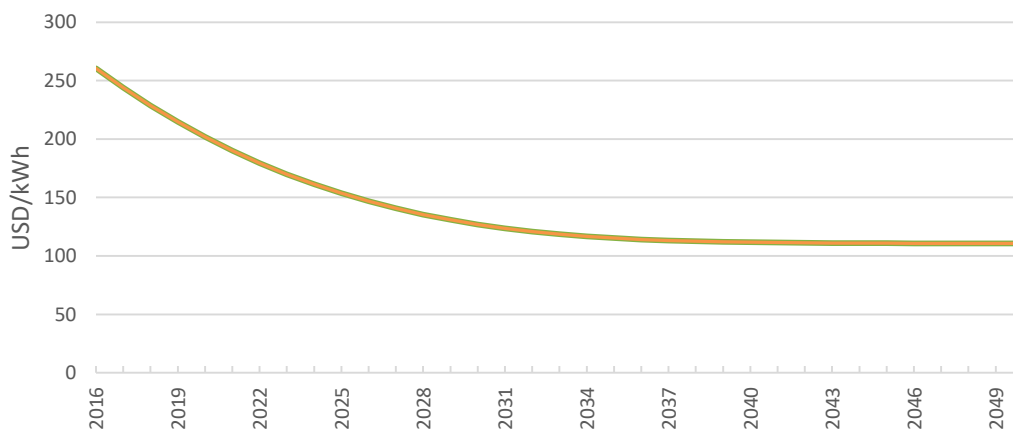


Figura 2.14 Proyección de costo de las baterías de ion-litio
Fuente: Elaboración propia

¹⁸ <http://www.dw.com/es/autos-el%C3%A9ctricos-ahora-s%C3%AD-hay-bater%C3%ADas-baratas-y-durables/a-37937143>

Evolución de inversión incremental de los vehículos eléctricos

La definición de la trayectoria del costo adicional (ΔI) de los vehículos eléctricos está sujeta a mucha incertidumbre y año a año se han ido redefiniendo supuestos respecto de su adopción. Para poder modificar el *payback* se asumen trayectorias decrecientes del monto de inversión adicional asociado a la compra de un vehículo eléctrico.

Escenario Conservador	Escenarios alternativos- moderado y optimista
<p>En el escenario conservador se asume que el costo adicional cae (ΔI) junto con el de las baterías hasta 2030.</p> <p>Desde 2030 se espera el mayor incremento porcentual en las ventas de estos vehículos reduciendo drásticamente su costo adicional versus un vehículo de combustión interna en un 50% respecto del costo actual.</p> <p>Posteriormente la inversión adicional tiende asintóticamente hacia \$ 500 mil. Esta definición permite que el resultado del modelo de participación de mercado se aproxime a los resultados que presentan las publicaciones internacionales.</p>	<p>En los dos escenarios alternativos- moderado y optimista- se asume que el costo adicional de la inversión cae anticipadamente.</p> <p>Además, se asume que la tecnología dominante en el largo plazo será la eléctrica permitiendo así que su adopción siga creciendo y no limitándose como en los modelos convencionales de difusión tecnológica. Esto es consistente con las proyecciones internacionales dado que se espera que en el largo plazo no exista una competencia real entre las tecnologías convencionales y los vehículos eléctricos, sino que directamente los vehículos a combustión interna pasen a una etapa de obsolescencia.</p>

Evolución del costo incremental

Matemáticamente, en cada caso, la caída del costo incremental de inversión se ajusta una curva logística (sigmoide) de ecuación:

$$f(t) = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

Ecuación 15 Curva logística

Donde L representa el supremo de la curva (en este caso el costo incremental actual), t_0 el punto medio de la sigmoide, y k la pendiente de la curva. La gráfica de esta función es una típica curva S.

La inversión incremental en cada periodo es $L - f(t)$.

La figura siguiente presenta la estimación de la evolución de la inversión adicional de escenario para vehículos livianos. Se aprecia que de un valor inicial de \$12 millones la inversión incremental cae a distintas tasas en los tres escenarios.

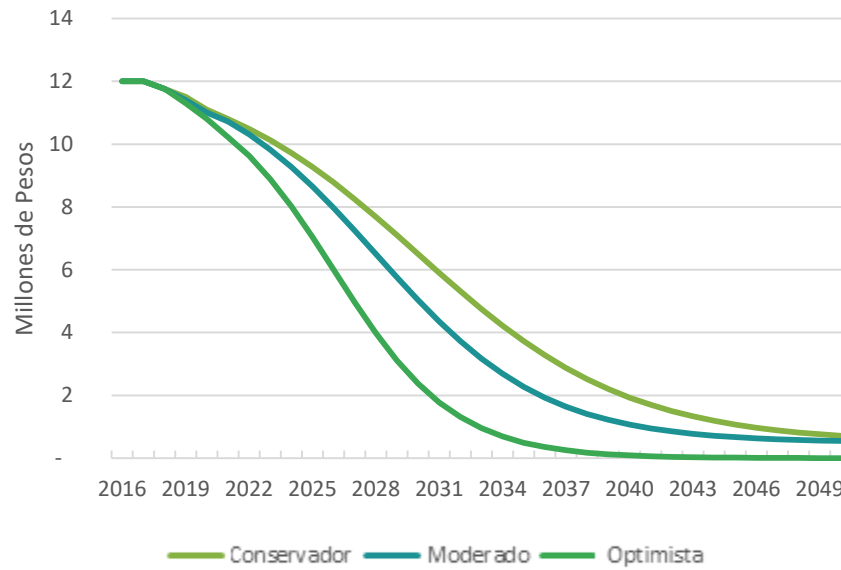


Figura 2.15 Inversión adicional en millones de pesos (CLP)
Fuente: elaboración propia.

La modelación del costo adicional de taxis es análoga salvo por desplazarse verticalmente hacia arriba en \$1,5 millones las tres curvas en el año 2016. Para el modo buses se no se elaboran curvas de difusión, pero se definen escenarios que responden a consideraciones regulatorias motivadas por beneficios ambientales.

2.4 Resultados de ventas y parque

A continuación, se presentan los resultados de ventas y parque resultante por modo de transporte y escenario.

2.4.1 Vehículos particulares

La figura siguiente presenta el porcentaje de ventas que representa la tecnología eléctrica en las ventas de vehículos particulares. Estos corresponden a los resultados de la modelación de la adopción de la tecnología.

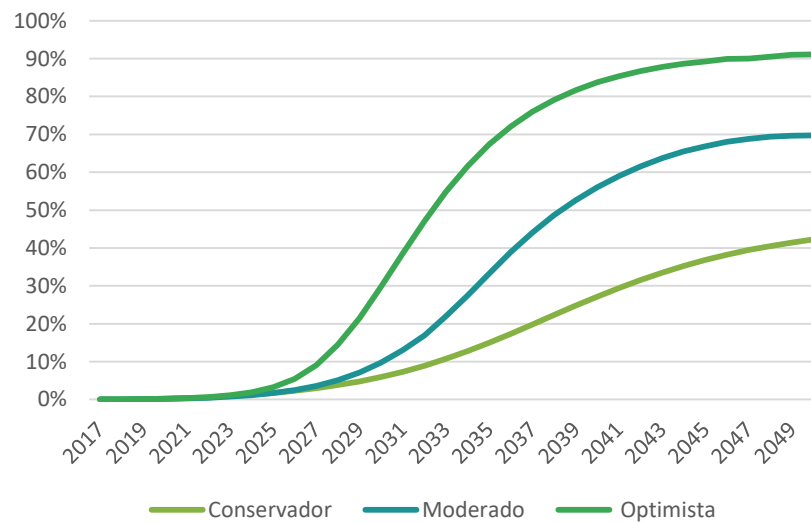


Figura 2.16 Porcentaje de ventas de autos particulares eléctricos
Fuente: Elaboración propia.

De estas curvas es posible estimar el parque de vehículos livianos en cada año y escenario. Los resultados de parque se resumen en el cuadro siguiente.

Escenario	2017	2020	2030	2050
Conservador	97	1.147	128.502	2.950.548
Moderado	97	1.158	170.843	5.536.556
Optimista	97	1.259	462.778	7.836.368

Tabla 4. Parque de vehículos eléctricos particulares en cada escenario (número de vehículos)
Fuente: Elaboración propia

Las figuras siguientes presentan la evolución de la composición del parque para cada uno de los escenarios.

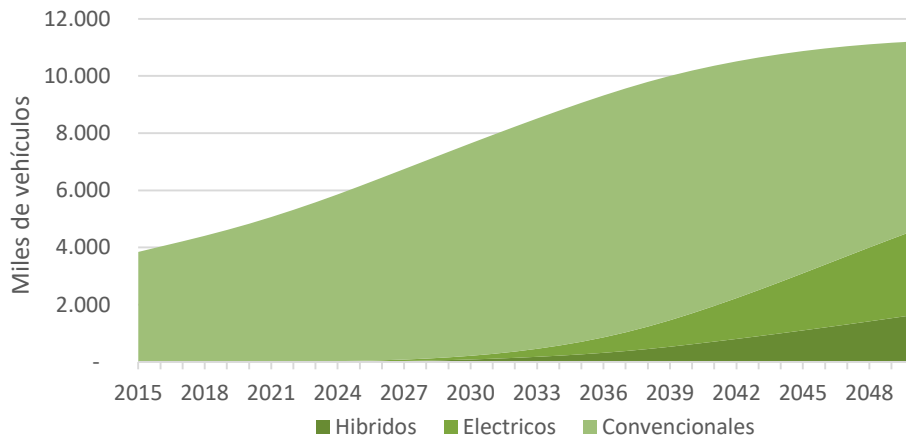


Figura 2.17 Parque de vehículos livianos: Escenario Conservador
Fuente: Elaboración propia

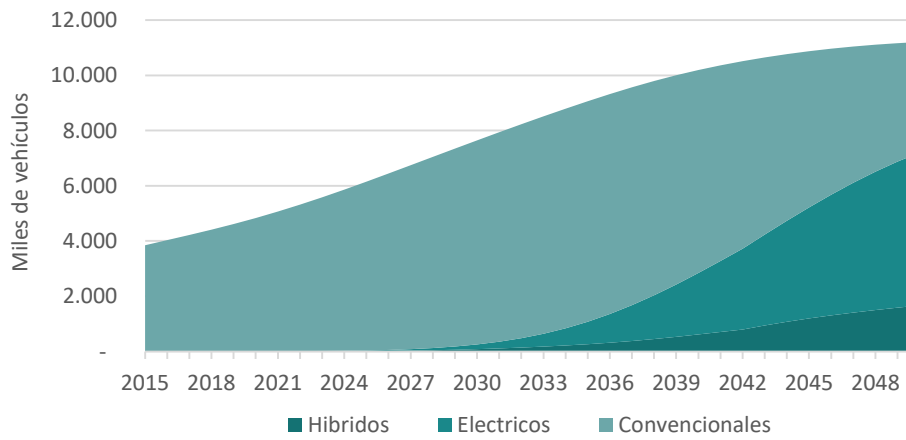


Figura 2.18 Parque de vehículos livianos: Escenario Moderado
Fuente: Elaboración propia

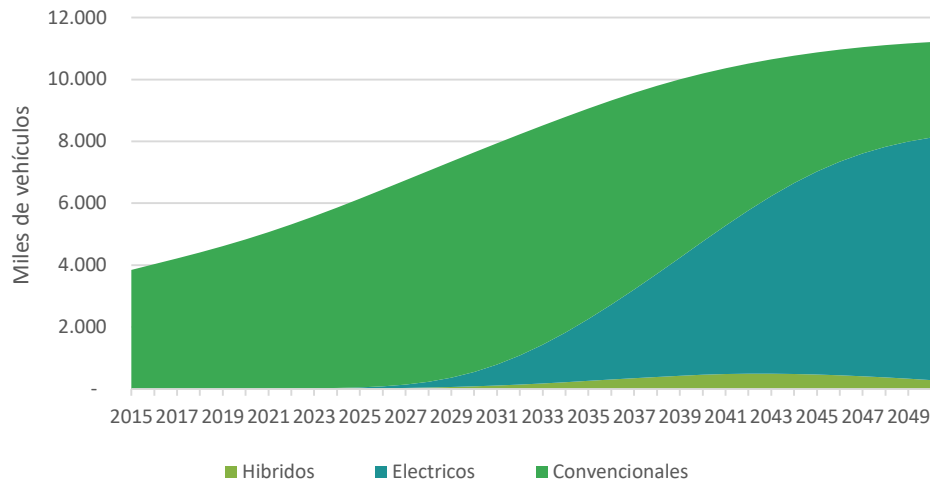


Figura 2.19 Parque de vehículos livianos: Escenario Optimista
Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Taxis

El análisis para taxis es similar al de vehículos particulares, sin embargo, el mayor nivel de actividad resulta en una evaluación más favorable para los vehículos eléctricos. En este caso, se considera un recambio del parque que se asume constante en concordancia con la obtención de permisos para taxis y colectivos. El hecho de tener una actividad ampliamente superior a los vehículos particulares (se estima que un taxi recorre sobre 90.000 anuales versus un vehículo particular que ronda los 15.000 km), produce más ahorros en términos de combustibles. Según la evaluación, si se considera una tasa de descuento de 6% la adquisición de vehículos eléctricos es más económica, con un costo de ciclo de vida 17% menor que el de un vehículo a gasolina. Esta evaluación contempla además un recambio de la batería del vehículo cada 2 a 3 años.

Los resultados de parque se resumen en el cuadro siguiente.

Escenario	2017	2020	2030	2050
Conservador	27	714	28.057	62.081
Moderado	27	728	33.775	98.417
Optimista	27	745	53.007	89.417

Tabla 5. Parque de vehículos taxis en cada escenario (número de vehículos)
Fuente: Elaboración propia

Las figuras siguientes presentan la evolución de la composición del parque para cada uno de los escenarios.

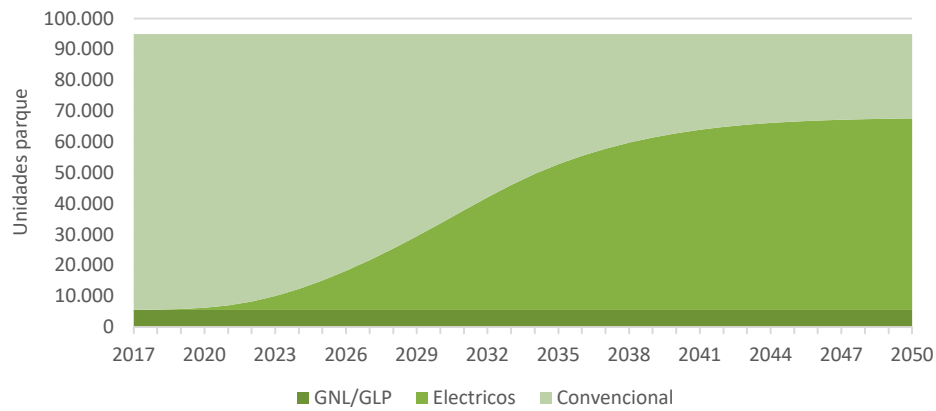


Figura 2.20 Parque de taxis: Escenario Conservador
Fuente: Elaboración propia

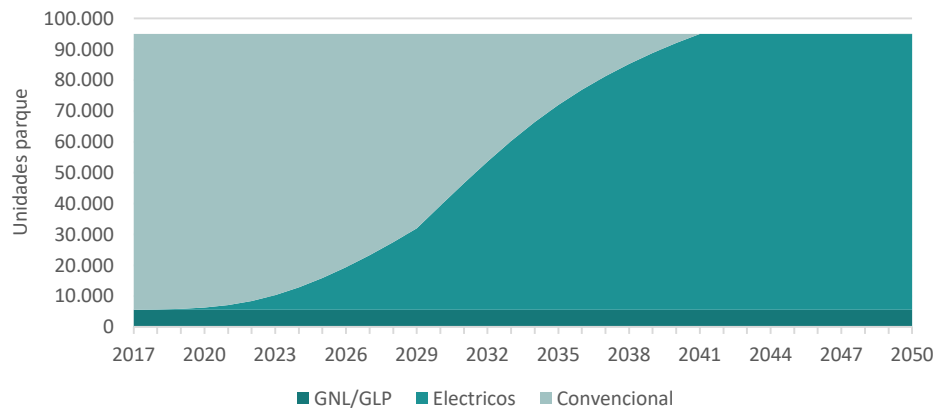


Figura 2.21 Parque de taxis: Escenario Moderado
Fuente: Elaboración propia

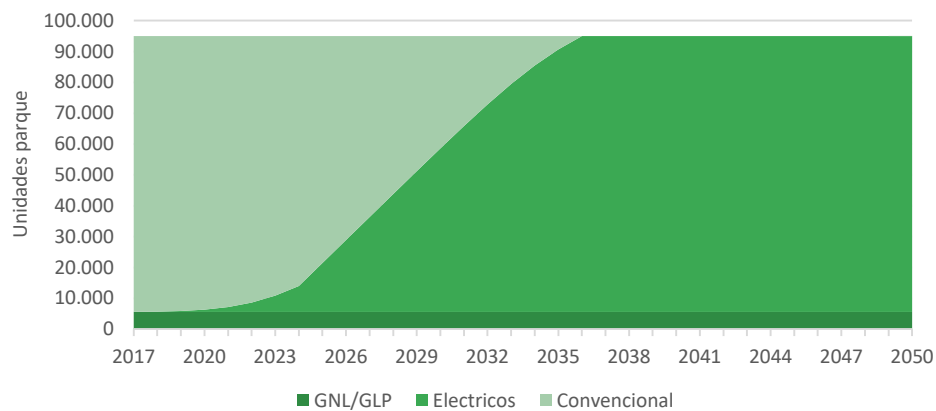


Figura 2.22 Parque de taxis: Escenario Optimista
Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Buses

Los escenarios de penetración de buses eléctricos no se asocian a modelación de adopción tecnológica, sino que, más bien a escenarios definidos por consideraciones normativas: la exigencia de contar con buses libres de emisiones. En el escenario conservador se considera una participación marginal de buses eléctricos en el parque de buses de la Región Metropolitana hasta el año 2030 desde donde crece hasta representar el 28% del parque al año 2050. Este escenario busca reflejar condiciones actuales sin la adopción de vehículos eléctricos en el corto y mediano plazo.

En el escenario moderado se considera sólo la incorporación acelerada de buses eléctricos al sistema de transporte público de la ciudad de Santiago mientras que en el escenario optimista se considera una penetración aún más intensiva de buses eléctricos en el Transantiago la que se refleja posterior al año 2020. Por otra parte, se incluyen buses eléctricos en los sistemas de transporte público de las demás regiones del país excepto la región de Magallanes. Esta proyección implica un crecimiento progresivo a contar del año 2027 hasta llegar a casi 90% de penetración al año 2050.

Finalmente, en el escenario optimista se asume que en la próxima licitación (aproximadamente en 2021) entrarán 300 buses eléctricos adicionales. En las licitaciones posteriores todo el parque se renueva con buses eléctricos por lo que desde 2031 toda la flota sería eléctrica.

Escenario	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Conservador	90	90	180	360	1.197	1.950
Moderado	90	90	314	695	2.340	5.460
Optimista	90	90	390	3.550	6.500	6.500

Tabla 6. Parque de Buses Eléctricos en Transantiago
Fuente: Elaboración propia

La figura siguiente presenta la evolución del parque de buses eléctricos del sistema de Transantiago para los distintos escenarios.

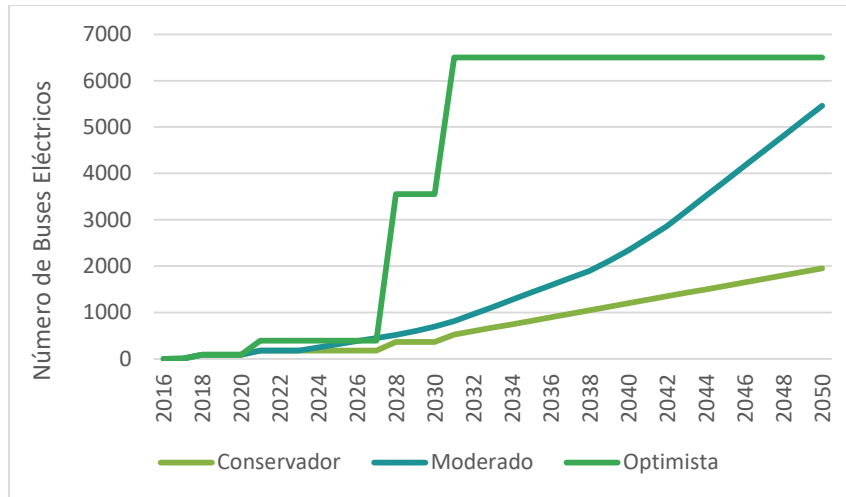


Figura 2.23 Parque de buses eléctricos de Transantiago: Escenario
Fuente: Elaboración propia

2.5 Análisis de Valor Presente

De forma adicional al modelo de participación de mercado basado en el periodo de retorno, se realiza un análisis de valor presente para levantar otros indicadores relevantes a la hora de analizar las ventajas que ofrecen los vehículos eléctricos.

Utilizando los mismos supuestos del modelo de *payback* del escenario conservador y utilizando una tasa de descuento de 6%, se calcula el valor presente de los costos de inversión, operación y mantenimiento, según el año de adquisición del vehículo. La siguiente figura refleja el valor presente de los costos para vehículos particulares y taxis, según sean eléctricos (VAN e) o convencionales (VAN).

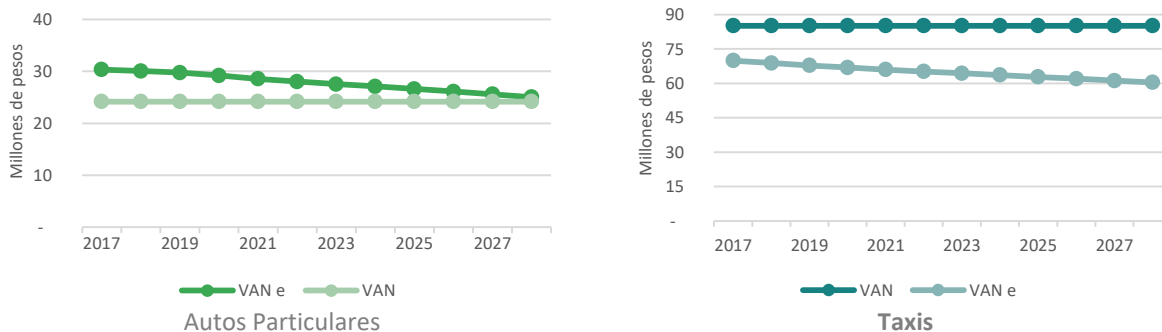


Figura 2.24 Valor presente de los costos de vehículos eléctricos versus convencional según año de compra
Tasa de descuento 6%
Fuente: Elaboración propia

En el caso de los vehículos particulares el análisis señala que los costos asociados a vehículos eléctricos resultan más altos que los vehículos convencionales. La baja actividad de este segmento hace que los ahorros operacionales no alcancen a cubrir la inversión inicial. Esta situación se revierte a contar del año 2028 donde se iguala el valor presente de ambas tecnologías.

El caso de los taxis es diferente ya que un taxi eléctrico permite generar importantes ahorros operaciones por sobre un vehículo de combustión interna a los precios actuales, lo que se explica por el significativamente mayor nivel de actividad. Considerando todos los costos de ciclo de vida asociados a ambas tecnologías, la compra del taxi eléctrico en el año 2017 significa un ahorro de un 18% respecto de los costos asociados al vehículo convencional. Dada la tendencia de precios, hacia el futuro esta ventaja económica será mayor, por ejemplo, comprar un taxi eléctrico el año 2025 sería un 26% más económico que uno convencional, esto se refleja en la tabla a continuación.

Año de compra	2017	2020	2025
VAN Auto	24.187.238	24.187.238	24.187.238
VAN Auto e	30.354.326	29.194.389	26.617.007
Ahorro %	-25%	-21%	-10%
VAN Taxi	85.123.426	85.123.426	85.123.426
VAN Taxi e	69.896.727	66.873.834	62.790.296
Ahorro %	18%	21%	26%

Tabla 7. Resultados del análisis de valor presente de los costos (CL\$)

Fuente: Elaboración propia

Este análisis entrega resultados muy disímiles según la actividad o distancia anual recorrida por los vehículos, esto conduce a preguntarse ¿qué actividad anual mínima debe tener un vehículo para que sea rentable la opción eléctrica? El resultado es 50.000 kilómetros aproximadamente considerando los precios *actuales* de los vehículos, ya que con ese nivel de actividad el VAN de los costos de ambas tecnologías se iguala. Esto quiere decir que, si un vehículo liviano recorre más de 50 mil kilómetros anuales, se vería beneficiado económicamente si optara por la tecnología eléctrica.

2.6 Consumo de energía

En el escenario conservador se espera que el crecimiento económico y demográfico haga crecer el consumo de energía del sector transporte. A pesar de un crecimiento de la actividad de transporte (pasajeros y carga) superior al 100%, el consumo energético crece solamente un 52% entre los años 2016 y 2050, esto debido a la renovación de estándares de eficiencia de las flotas convencionales, y a la mayor eficiencia de los vehículos eléctricos los que en términos de energía consumen aproximadamente entre un 20% y un 30% del consumo de un vehículo convencional¹⁹.

La figura siguiente presenta la evolución del consumo de energía del transporte terrestre para el escenario conservador. El consumo total de energía crece a una tasa anual promedio de 1,2% entre

¹⁹ Por ejemplo, un vehículo eléctrico con rendimiento de 6 km/kWh es más eficiente que uno convencional con rendimiento de 12 km/L (o 1,1 km/kWh): el consumo del vehículo eléctrico representa en términos energéticos 19% de consumo del vehículo a gasolina. Un bus eléctrico con rendimiento 1 km/kWh es más eficiente que uno diésel con rendimiento 2,5 km/l (0,25 km/kWh), lo que significa que el bus eléctrico consume solo 25% lo que consume el bus convencional.

2017 y 2050 mientras que la electricidad a 29% anual en el mismo periodo, lo que se explica por considerar la entrada sistemática de vehículos eléctricos desde niveles iniciales muy bajos.

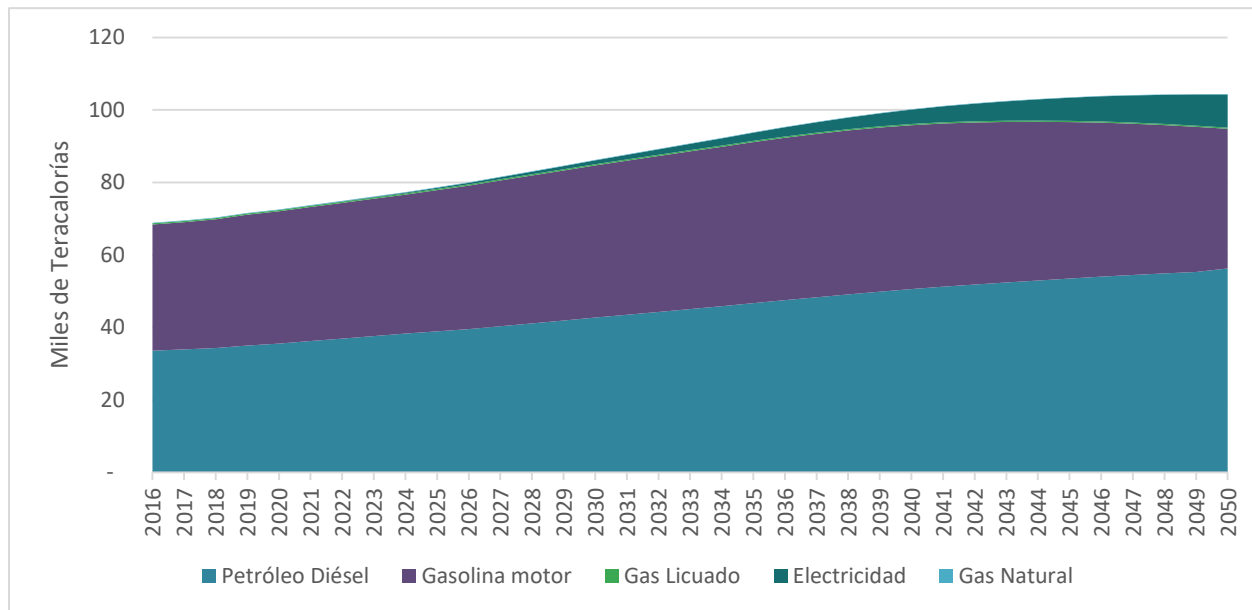


Figura 2.25 Consumo de Energía por combustible del Transporte Terrestre: Escenario Conservador

Fuente: Elaboración propia

La electromovilidad ofrece claras ganancias de eficiencia desde el punto de vista del consumo final de energía. Los motores eléctricos reducen drásticamente las pérdidas térmicas disminuyendo el requerimiento total de energía. Al comparar la demanda energética total entre escenarios se aprecia que la electrificación del transporte terrestre resulta en mayores niveles de eficiencia. En el año 2030 el escenario moderado reduce 1% del consumo energético total respecto del escenario base mientras que al 2050 esta cifra alcanza a 14%. Al considerar el escenario optimista los ahorros respecto del conservador llegan a 5% en 2030 y 30% en 2050.

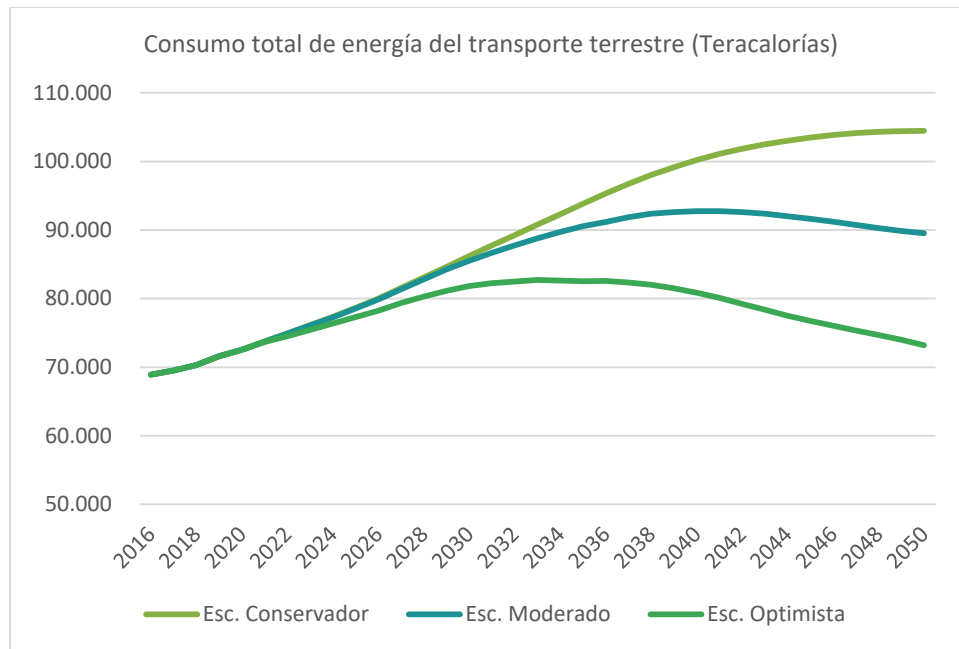


Figura 2.26 Consumo total de energía del transporte terrestre
Fuente: Elaboración propia

La figura siguiente presenta el consumo eléctrico de los distintos escenarios. Las tasas de crecimiento promedio de los escenarios conservador, moderado y optimista son 29%, 31% y 33% respectivamente en el periodo 2017-2050.

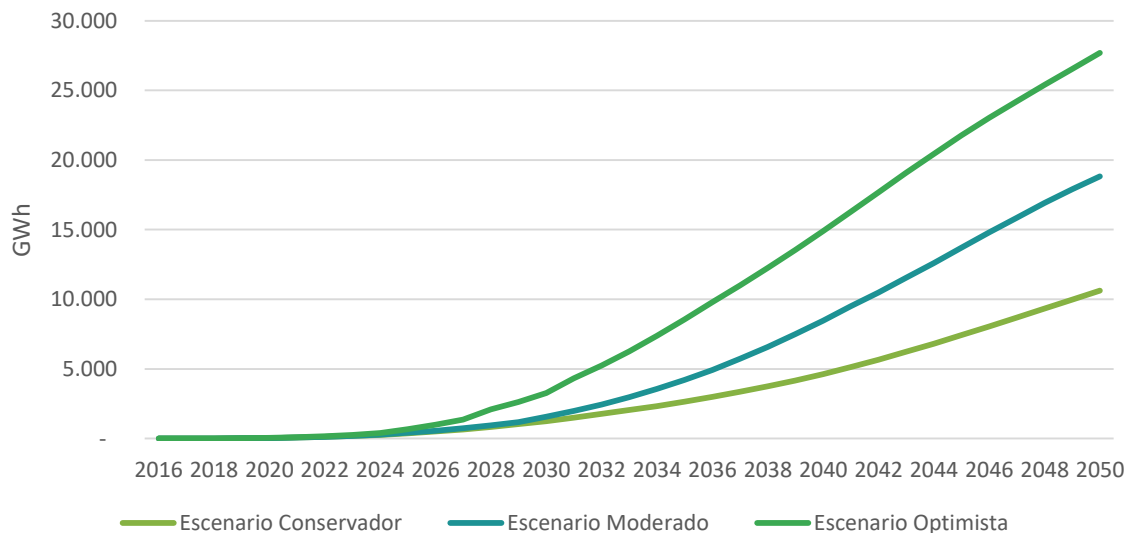


Figura 2.27 Consumo de energía eléctrica del transporte terrestre
Fuente: Elaboración propia

En el escenario moderado respecto del conservador, al año 2030 se consumen casi 300 Tcal adicionales de electricidad pero que se compensan con la caída del consumo de combustibles fósiles en casi 1.000 TCal. En el año 2050, el consumo adicional de electricidad alcanza las 7.000 Tcal, pero se reduce el consumo de combustibles fósiles en más de 22.000 Tcal. Los vehículos livianos son los que más contribuyen a esta ganancia de eficiencia por ser significativos los ahorros de consumo de gasolina (y por ser los ahorros de diesel asociados a buses significativamente menores).

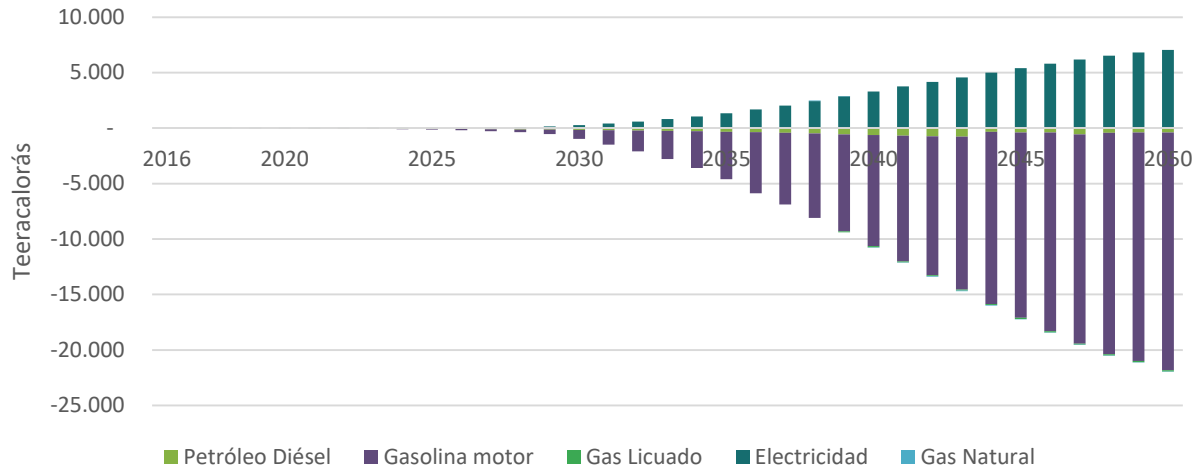


Figura 2.28 Variación de consumo de energía: Escenario moderado versus Conservador
 Fuente: Elaboración propia

En el escenario optimista al año 2030, se consumen 1.700 Tcal adicionales de electricidad pero que se compensan holgadamente con la caída de consumo de combustibles fósiles en casi 6.600 TCal. En el año 2050, el consumo adicional de electricidad alcanza las 14.700 Tcal pero se reduce el consumo de combustibles fósiles en más de 46.000 TCal.

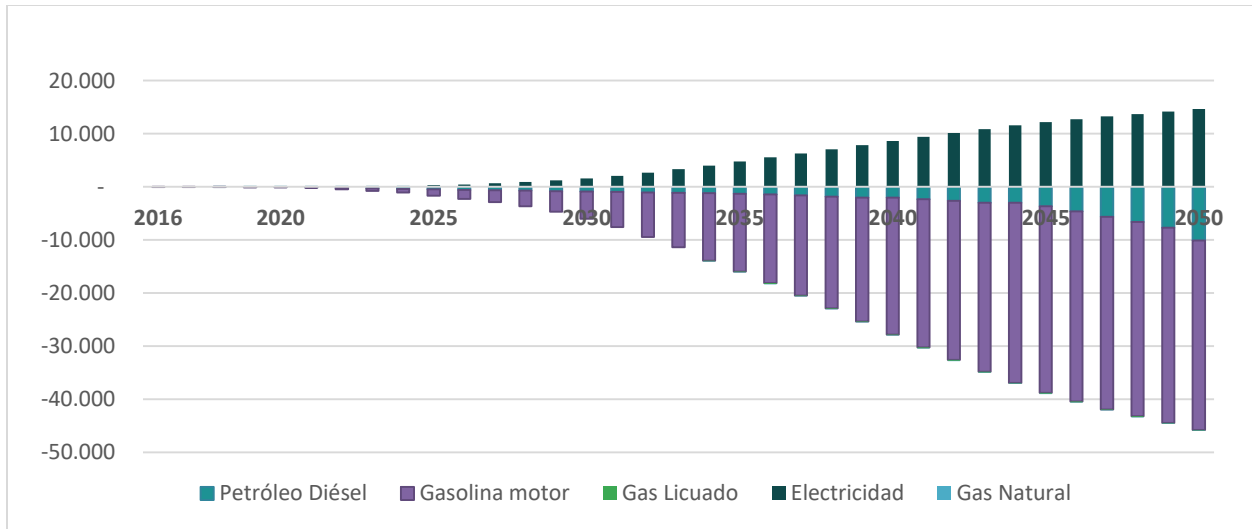


Figura 2.29 Variación de consumo de energía: Escenario Optimista versus Conservador
 Fuente: Elaboración propia

2.7 Reducción de gases efecto invernadero

El transporte es uno de los principales sectores emisores de gases efecto invernadero representando el 22% del total según el inventario de emisiones y la electromovilidad ofrece la oportunidad de revertir una tendencia al alza. La siguiente figura muestra las emisiones anuales de gases de efecto invernadero de los escenarios conservador, moderado y optimista para el transporte terrestre.

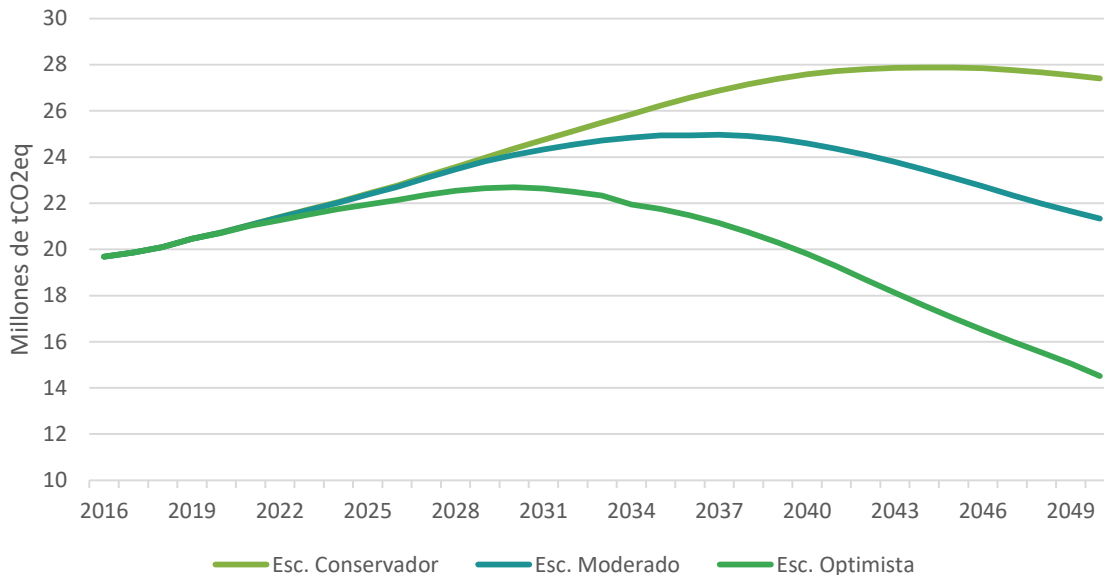


Figura 2.30 Emisiones de gases efecto invernadero (Millones de toneladas de CO₂eq)
Fuente: Elaboración propia

Las emisiones crecen en términos absolutos entre 2017 y 2050 un 38% en el escenario conservador; 7% en el moderado, pero *caen* casi 27% en el escenario optimista. Con esto se evidencia la oportunidad de la electromovilidad de revertir la tendencia y reducir emisiones en el transporte terrestre. Esto incluso sin considerar cambios en el transporte de carga- como en este ejercicio.

Las emisiones unitarias por vehículo de cada categoría permiten dimensionar el potencial de mitigación del transporte eléctrico. Bajo los supuestos utilizados, un vehículo particular emite aproximadamente 2,9 ton CO₂e al año; un taxi 17,3 toneladas; y un bus Transantiago, considerando una actividad de 115 mil Km, aproximadamente 119 toneladas anuales. Esto implica que un Transantiago completamente eléctrico evitaría al año aproximadamente 800 mil toneladas de CO₂e; 20 mil taxis evitarían 350 mil toneladas de CO₂e/año, y un 10% del parque particular (aproximadamente 400.000 vehículos) evitarían casi 1,2 millones de toneladas de CO₂e al año.

2.8 Beneficios de contaminación local en Santiago

En promedio, en Santiago un vehículo particular nuevo emite 0,075 kg de MP2,5 año, un taxi 0,45 kg de MP2,5 año mientras que un bus 10 kg de MP 2,5 al año. La mayor participación de vehículos eléctricos en el parque vehicular reduce de manera significativa las emisiones de contaminantes que afectan la calidad del aire lo que se traduce en importantes beneficios de salud. En particular, cada año morirían menos personas y habría menos casos de enfermedad, esto cuantificado en los escenarios moderado y optimista respecto del conservador.

La siguiente tabla muestra las variaciones en las emisiones de MP2,5 y NOx de los escenarios moderado y optimista respecto del conservador.

Escenario	Unidad	2020	2030	2040	2050	Media anual 2017-2050
Escenario moderado	MP2,5 [ton/año]	0,2	9	93	190	60
	NOX [ton/año]	4	116	1201	2420	764
Escenario optimista	MP2,5 [ton/año]	1	53	244	405	151
	NOX [ton/año]	8	702	3156	5513	1992

Tabla 8. Reducción de emisiones respecto de escenario conservador
Fuente: Elaboración propia

Las variaciones en las emisiones impactarán la calidad del aire medida a través de las concentraciones de contaminantes. En este caso se considera sólo MP2,5 por ser el más dañino y relevante. La estimación de estas concentraciones se realiza utilizando relaciones empíricas respecto de su relación-los factores de emisión -concentración. Se considera para la estimación de estas concentraciones tanto el aporte primario como secundario: el material particulado en el aire está compuesto por partículas primarias emitidas directamente por las fuentes, y por partículas secundarias (en este caso NOx), formadas a partir de gases en la atmósfera. El detalle de la metodología de esta sección se encuentra en anexo del documento y corresponde a la oficial recomendada y utilizada por el Ministerio de Medio Ambiente.

De manera sistemática en cada año de los dos escenarios de electrificación, la contribución primaria de concentraciones es responsable del 75% de las concentraciones totales de MP 2,5. A continuación, se presentan los resultados de concentraciones de los dos escenarios de electrificación.

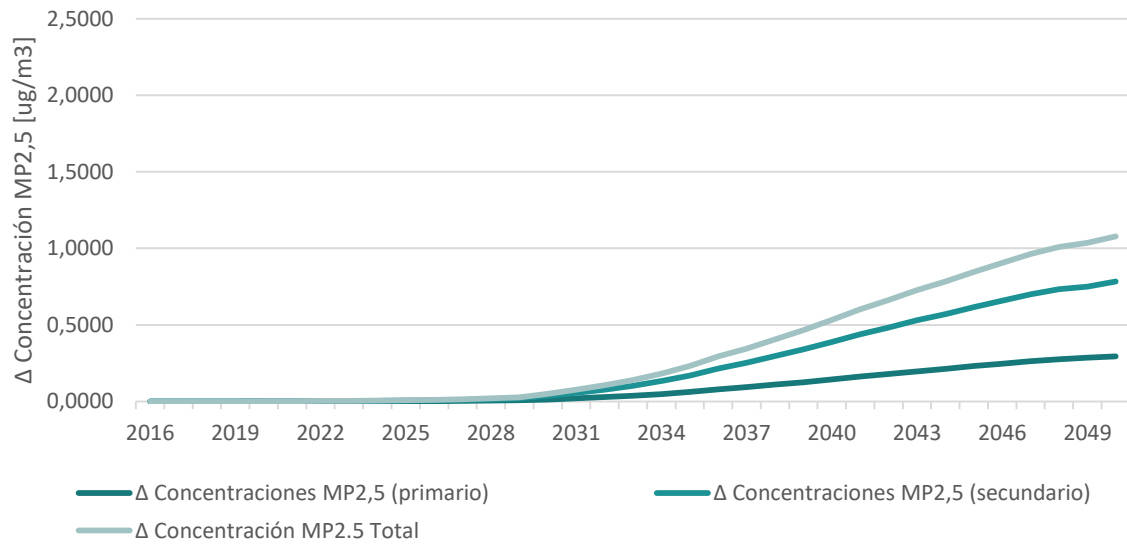


Figura 2.31 Reducción de concentraciones de escenario moderado
Fuente: Elaboración propia

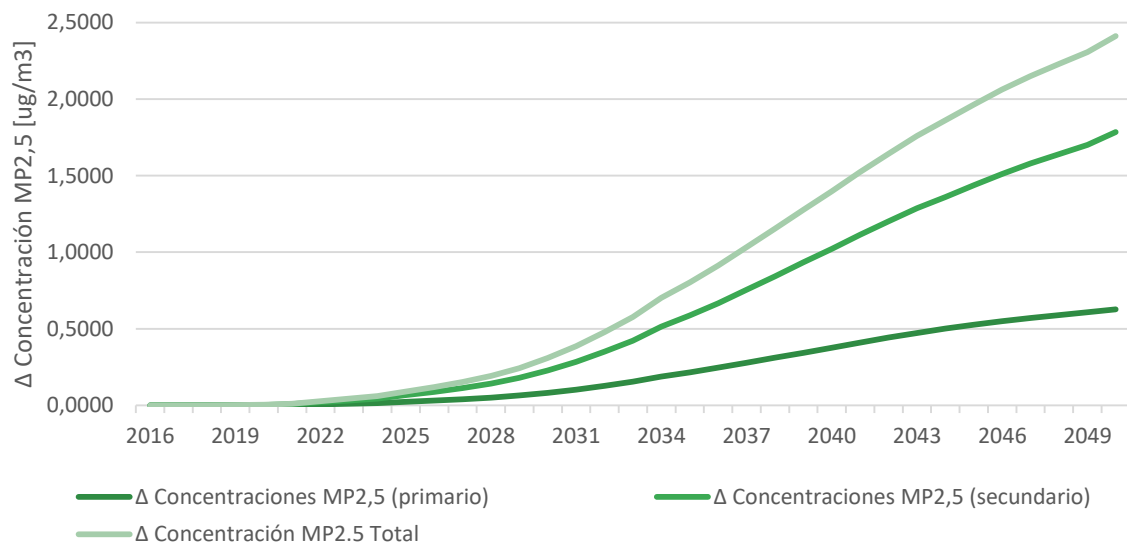


Figura 2.32 Reducción de concentraciones de escenario optimista
Fuente: Elaboración propia

Los mejores niveles de calidad del aire- asociados a menores concentraciones de MP2,5- resultarían en un menor número de casos de salud adversas ya sea por casos de muerte, admisiones hospitalarias u otras condiciones de salud²⁰.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050	Total
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	0	1	10	23	230
	Cardiopulmonar largo plazo	0	9	114	275	2.649
	Todas las causas largo plazo	0	6	70	160	1.584
Admisiones	Asma	0	0	2	3	36
	Cardiovascular	0	3	40	94	915
	Respiratorias crónicas	0	1	6	14	142
	Neumonía	0	3	38	91	874
	Bronquitis	0	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	0	0	0	0	5
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	40	1.314	14.900	32.420	331.558
	Días de actividad restringida	197	6.414	72.785	158.443	1.619.931
	Días de actividad restringida menor	372	12.085	137.072	298.255	3.050.203

Tabla 9. Casos de salud evitados en escenario moderado respecto del conservador

Fuente: Elaboración propia

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050	Total
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	0	5	27	52	586
	Cardiopulmonar largo plazo	0	54	300	616	6.714
	Todas las causas largo plazo	0	35	183	357	4.039
Admisiones	Asma	0	1	4	8	93
	Cardiovascular	0	19	105	210	2.325
	Respiratorias crónicas	0	3	16	32	362
	Neumonía	0	18	99	204	2.214
	Bronquitis	0	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	0	0	1	1	12
	Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	83	7.985	39.107	72.502	850.942
	Días de actividad restringida	404	38.987	191.038	354.329	4.157.322
	Días de actividad restringida menor	762	73.460	359.768	666.993	7.828.334

Tabla 10. Casos de salud evitados en escenario optimista respecto del conservador

²⁰ Es importante destacar que en la agregación final de impactos se considera solamente la mortalidad de largo plazo asociada a condiciones cardiopulmonares para evitar doble conteos.

Fuente: Elaboración propia

La metodología permite también estimar el beneficio económico de mejorar la calidad del aire: se dará valor monetario a los casos evitados. Para ello se utilizan valores unitarios: aproximadamente US\$630 mil por cada caso de muerte y US\$1.400 por admisión hospitalaria (ver anexo para detalles).

Los impactos en mortalidad y morbilidad son relevantes en ambos escenarios. En el optimista los beneficios por reducción de particulado fino pasan de US\$ 300 mil en 2020 a casi de US\$ 400 millones en 2050, por lo que, en promedio, se perciben del orden de US\$ 138 millones cada año. En el moderado las cifras son menores pero significativas, con unos US\$ 54 millones anuales en promedio.

Las tablas siguientes presentan los beneficios anuales para cada escenario y para cada uno de los efectos considerados²¹. En valor presente, y utilizando la tasa social de descuento de 6%, el escenario moderado arroja beneficios- respecto del escenario conservador- de US\$340 millones y el optimista de US \$940 millones.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	14.887	523.958	6.333.799	14.513.275
	Cardiopulmonar largo plazo	142.698	5.543.871	71.652.338	172.324.846
	Todas las causas largo plazo	103.086	3.619.936	43.685.562	99.971.977
Admisiones	Asma	6	172	1.865	3.900
	Cardiovascular	204	7.538	94.315	221.723
	Respiratorias crónicas	22	780	9.558	22.133
	Neumonía	123	4.837	63.014	152.360
	Bronquitis	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	1	26	305	680
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	1.484	48.201	546.706	1.189.577
	Días de actividad restringida	2.414	78.447	890.222	1.937.879
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0
Total		146.952	5.683.871	73.258.323	175.853.098

Tabla 11. Beneficios monetarios en escenario moderado respecto del conservador (US\$)

Fuente: Elaboración propia

²¹ Para el cálculo de beneficios total se considera sólo mortalidad de largo plazo cardiopulmonar como es habitual y para evitar doble conteos.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	30.466	3.184.926	16.624.135	32.456.310
	Cardiopulmonar largo plazo	292.033	33.698.910	188.063.761	385.373.306
	Todas las causas largo plazo	210.967	22.004.099	114.660.196	223.569.220
Admisiones	Asma	11	1.045	4.895	8.721
	Cardiovascular	417	45.819	247.546	495.844
	Respiratorias crónicas	44	4.740	25.087	49.497
	Neumonía	252	29.404	165.391	340.725
	Bronquitis	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	2	159	801	1.521
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	3.038	292.991	1.434.922	2.660.274
	Días de actividad restringida	4.941	476.847	2.336.538	4.333.715
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0
Total	Total	300.739	34.549.916	192.278.942	393.263.603

Tabla 12. Beneficios monetarios en escenario optimista respecto del conservador (US\$)

Fuente: Elaboración propia

3 EL SECTOR RESIDENCIAL

3.1 Los Sectores Residencial, Público y Comercial

El sector residencial se incluye de acuerdo a la clasificación del Balance Nacional de Energía en el sector Comercial, Público y Residencial (CPR). La agrupación reúne estos tres subsectores por incluir principalmente a clientes consumidores de energía con tarifa regulada y a actividades de consumo de energía relacionadas con hogares y servicios tanto públicos como privados. Este sector representa el 21% del consumo final de la energía total y el 33% de la del consumo final de energía eléctrica del país, esto según el último Balance Nacional de Energía (Ministerio de Energía 2015).

La distribución de consumo entre los tres subsectores al interior del sector se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual se aprecia que el sector residencial es el predominante (72%). El sector comercial, sin embargo, tiene una importante participación del consumo eléctrico (41%). El sector público es el menor en ambos casos (6% y 9% respectivamente).

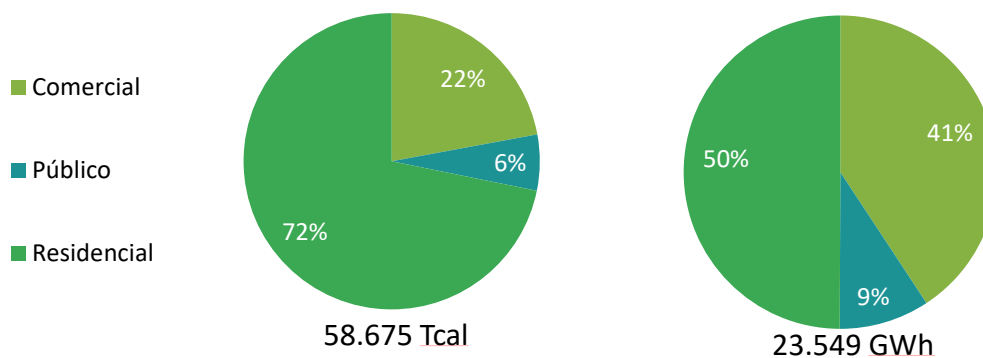


Figura 3.1 Consumo relativo de subsectores en energía final total y energía eléctrica final
Fuente: Balance Nacional de Energía 2015. Ministerio de Energía.

Los sectores de servicios- comercial y público- ya cuentan con niveles importantes de participación de consumo eléctrico alcanzando en 2015 el 57% del consumo total de energía.

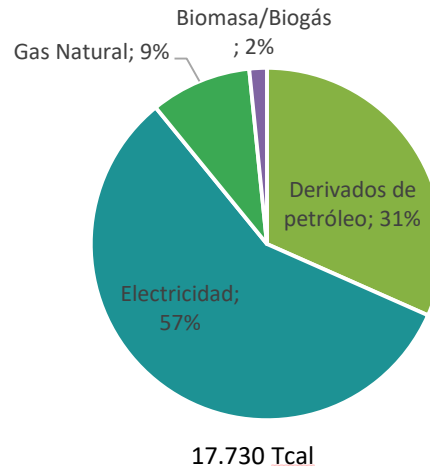


Figura 3.2 Composición del Consumo de sectores comercial y público
Fuente: Balance Nacional de Energía 2015. Ministerio de Energía.

El consumo del subsector residencial utiliza de manera principal energía térmica de la biomasa como fuente de energía final, la que representa un 42% del consumo total, con una participación de electricidad relativamente menor respecto a los otros subsectores (24%). La siguiente figura muestra la distribución de los principales consumos en unidades energéticas en este subsector:

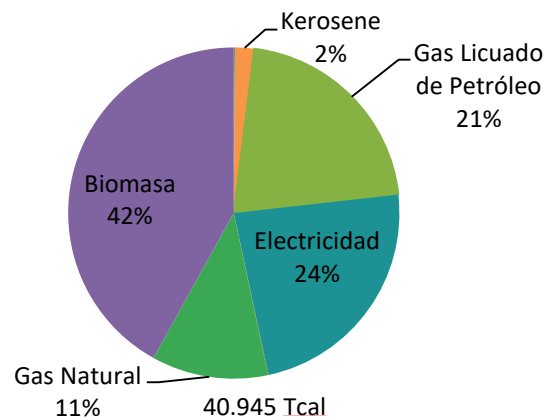


Figura 3.3 Composición del Consumo del sector residencial
Fuente: Balance Nacional de Energía 2015. Ministerio de Energía.

La evidencia empírica y distintos estudios sostienen que el nivel de consumo eléctrico del sector residencial de Chile- como el de otros países en desarrollo- debería crecer con el crecimiento económico. La figura siguiente muestra el nivel de consumo medio de hogares para Chile, otros países y el mundo. Los países con mayores ingresos presentan los mayores niveles de consumo de electricidad. Esto revela que el tránsito hacia el desarrollo viene acompañado de mayor consumo eléctrico porque permite satisfacer nuevos servicios y usos y reducir el uso de combustibles fósiles o leña como se evidenciará más adelante.

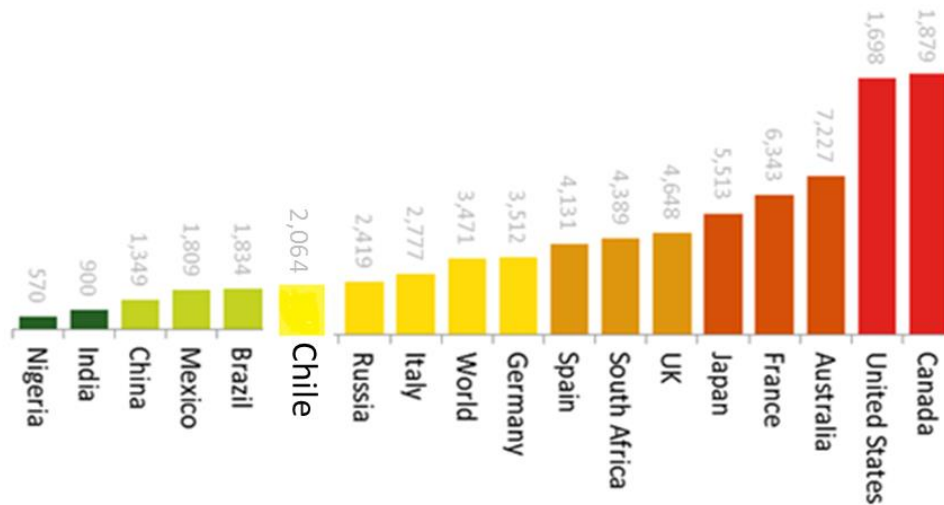


Figura 3.4 Consumo Promedio de Hogares

Fuente: Enerdata via World Energy Council²². Para Chile es estima a partir de BNE y Censo 2012.

La Administración de Información Energética de Estados Unidos o EIA por sus siglas en inglés- el organismo de estadística y de análisis en el Departamento de Energía de ese país- proyectan para Chile (junto con México) altos niveles de crecimiento de consumo de energía. En promedio el consumo residencial de los países OCDE crecería 0,6% anualmente entre 2012 y 2040 mientras que Chile y México 1,9%. Respecto del consumo eléctrico, el crecimiento anual promedio de los países OCDE sería de 1%, y aunque no se desagrega esta cifra por país, asumiendo homogeneidad entre el crecimiento de consumo de energía agregado, Chile debería presentar tasas de crecimiento de consumo eléctrico mayores que 1,9%.

²² <http://shrinkthatfootprint.com/average-household-electricity-consumption>

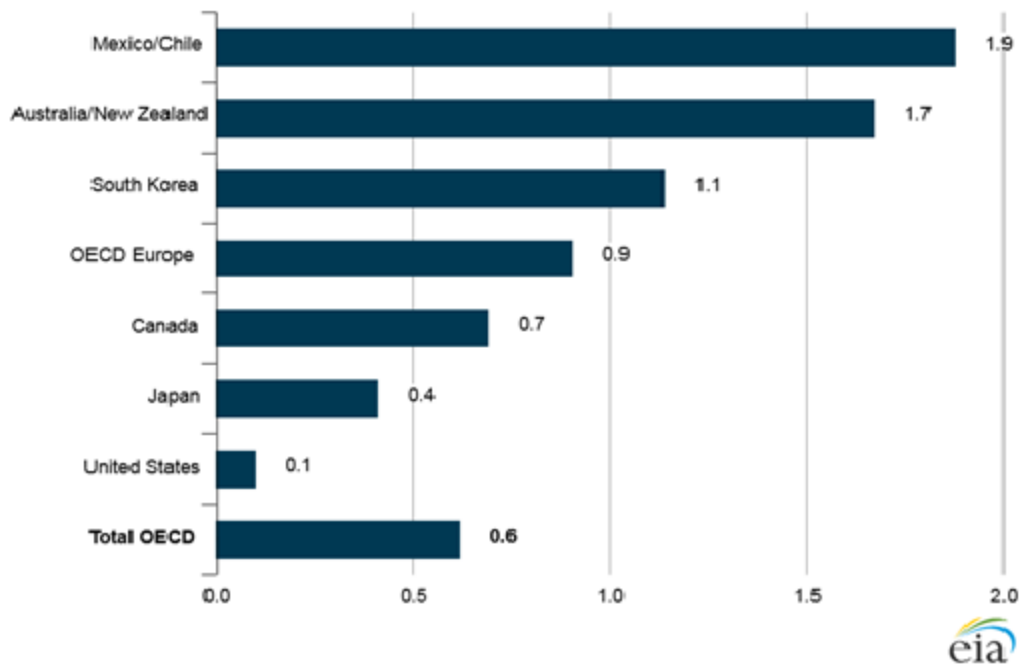


Figura 3.5 Tasa de crecimiento medio anual del consumo de energía del sector residencial 2012-2040
Fuente: EIA; International Energy Outlook 2016

Por el potencial de expansión de consumo eléctrico en el futuro y su tamaño relativo se examinará sólo el sector residencial.

3.2 Caracterización del Consumo Residencial en Chile

De acuerdo a antecedentes del “Estudio de usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile” desarrollado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT) en el año 2010, a solicitud del Ministerio de Energía, los principales usos finales de la energía del sector corresponden a calefacción, con más del 50% del consumo final de la energía, seguido de agua caliente sanitaria (ACS), cocina, refrigerador e iluminación, los que en conjunto contribuyen a casi el 90% del consumo de energía final de la vivienda, de acuerdo a lo que se observa en la siguiente figura:

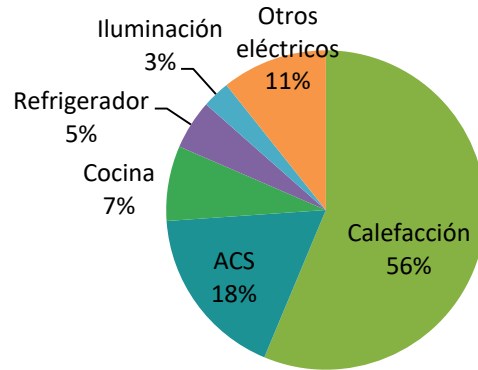


Figura 3.6 Distribución de consumos energéticos por uso final, en el subsector Residencial
Fuente: (CDT, 2010)

La alta presencia de calefacción se explica principalmente por el uso de leña y en mucho menor medida por gas natural (principalmente XII región). Esto produce que la participación de los distintos usos de energía final difiera de manera significativa en distintas zonas geográficas del país debido a la diferencia climática y de disponibilidad de recursos. La figura siguiente presenta los consumos por hogar para las distintas regiones del país.

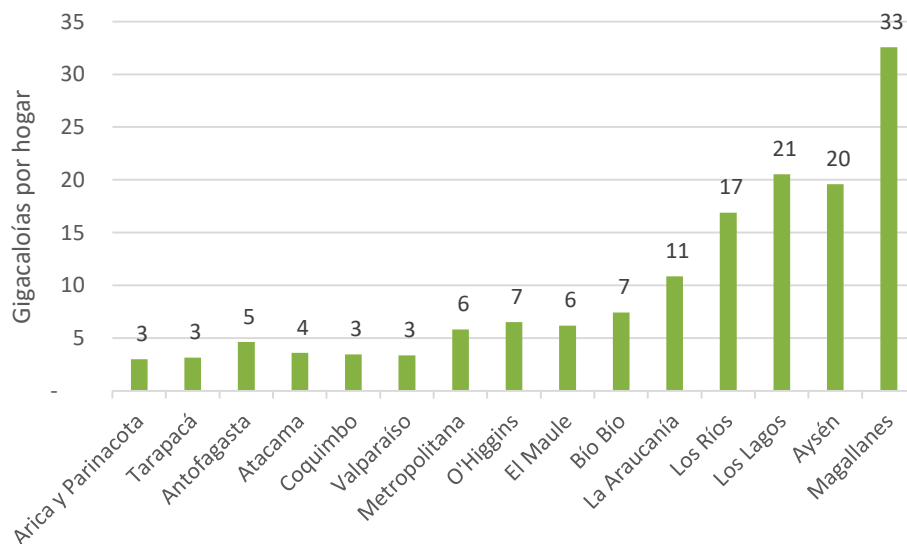


Figura 3.7 Consumo medio de energía por hogar
Fuente: Elaboración propia en base a Balance Nacional de Energía 2015 y Censo 2012.

En particular, si se analiza el uso final de energía para las zonas térmicas 1 y 2 (zonas costeras desde la I región a la V región); zonas térmicas 3, 4 y 5 (zonas costera y centro desde Santiago hasta Osorno); y zonas térmicas 6 y 7 (zonas cordilleranas y australes de Frutillar al sur), se aprecia variaciones en la relevancia relativa de los usos, llegando la calefacción a tener una participación de un 85% en la zona sur.

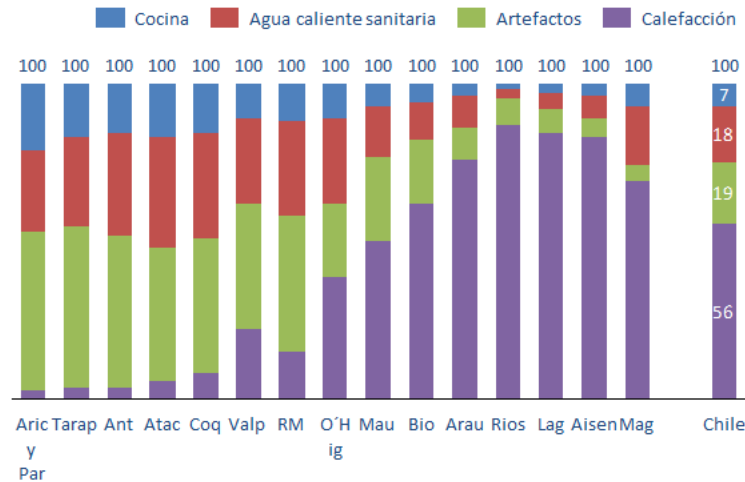


Figura 3.8 Distribución de consumo energético total por uso final Residencial, por región.

Respecto de las emisiones de gases efecto invernadero y de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones, el sector residencial es responsable del 4% del total de emisiones catastradas y 5,5% del total del sector energía. El consumo de leña y biomasa no se asocia a emisiones de gases efecto invernadero a pesar que sí a importantes problemas de contaminación local como se discutirá más adelante.

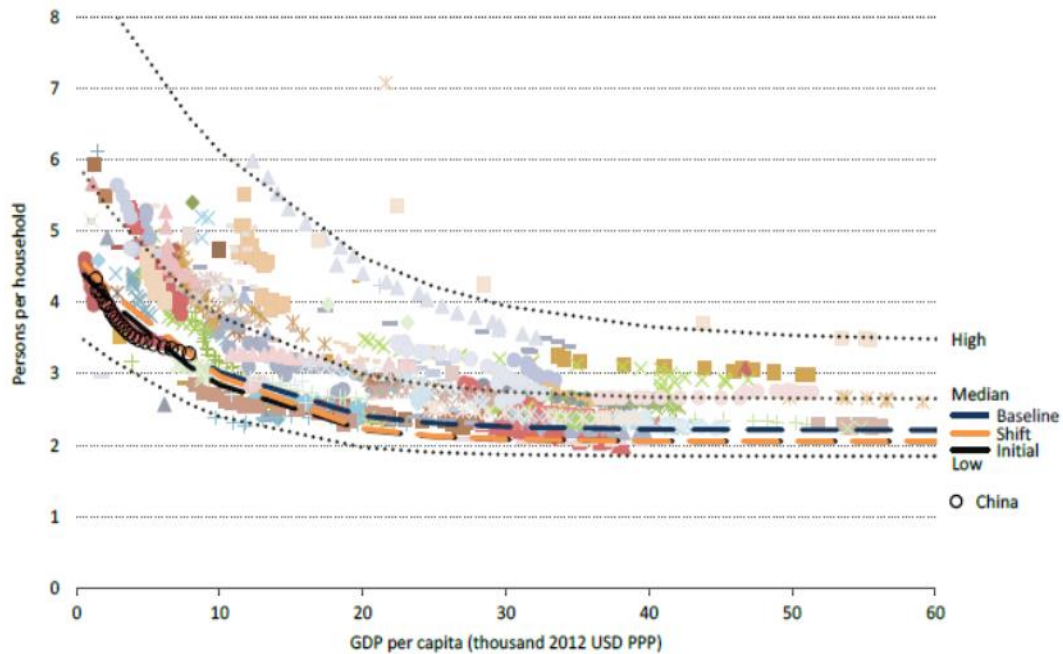
3.3 Metodología general de proyección energética en el sector residencial

La proyección del consumo energético se lleva a cabo mediante un enfoque “bottom-up” que permite desagregar el consumo en usos, combustibles y regiones. La metodología se base en la desarrollada en el estudio para el Ministerio de Energía “Elaboración e implementación de herramientas prospectivas de Largo Plazo” en 2016. La proyección del consumo energético deberá considerar, en términos simples, dos indicadores a ser analizados durante el horizonte de evaluación:

- El aumento del parque de viviendas en el país.
- El comportamiento del consumo energético.

La estimación de crecimiento del parque de viviendas regional utiliza como insumo base las proyecciones de habitantes por regiones hasta el 2050. Sin embargo, es necesario además estimar la disminución del número de habitantes por vivienda, tendencia que se aprecia en la experiencia internacional y que se comprueba con los censos (1992 y 2002). De acuerdo a esto, entre los años 1992 y 2002, disminuyó de 4,23 a 3,8 el número de habitantes por vivienda, y se espera la tendencia siga

hasta llegar a niveles de países de mayor desarrollo y densificación, cuya ocupación tiende a estabilizarse en valores en torno a 2,1 – 2,5 habitantes por viviendas²³.



Notes: PPP = purchasing power parity. Data shown have not been labelled due to the large number of countries displayed. Country data points (by colour and shape for each country) are intended to show historical trends used to derive the model functions described here.
Key point: As income levels increase, the average number of persons per household typically decreases, with most developed countries having between two and three persons per household.

Figura 3.9 Relación entre PIB per cápita y tamaño de los hogares
 Fuente: OCDE/IEA (2016)²⁴

La metodología en este caso utiliza intensidades de energía final por uso para llevar a cabo la proyección. Para el caso de la calefacción, se estima el consumo teórico que permitiría alcanzar el confort térmico utilizando un enfoque de energía útil.

Energía útil e intensidad

Intensidad energética: es un indicador que corresponde a la energía necesaria para satisfacer cierto servicio. Por ejemplo, en Chile la intensidad de consumo medio eléctrico residencial está en torno a 170-180 KWh/hogar-mes. Estas intensidades pueden estimarse por uso, combustible, etc. y suelen

²³ Es importante considerar la forma en que decrece el número de habitantes por vivienda, y su relación con otras variables explicativas. Para esto, inicialmente se procedió a comparar la situación de Chile, con países que experimentaron decrecimiento en esta variable, y aumento del PIB per cápita. De acuerdo a esto, se procedió a estimar una expresión econométrica que describe el comportamiento futuro de Chile, en base al crecimiento de su PIB per cápita.

²⁴ https://www.iea.org/media/etp/etp2016/AnnexE_UrbanBuildingsEnergyEstimationMethodology_web.pdf

presentarse como cifras anuales.

Energía útil: es aquella energía transformada en calor o trabajo útil correspondientes a algún uso final. Por ejemplo: luz de una ampolleta, calor de calefacción que se entrega a un ambiente, etc. Otra forma de entenderla es como la energía de que dispone el consumidor luego de su última conversión (es decir tras las pérdidas).

El foco metodológico general se presenta en la figura siguiente:

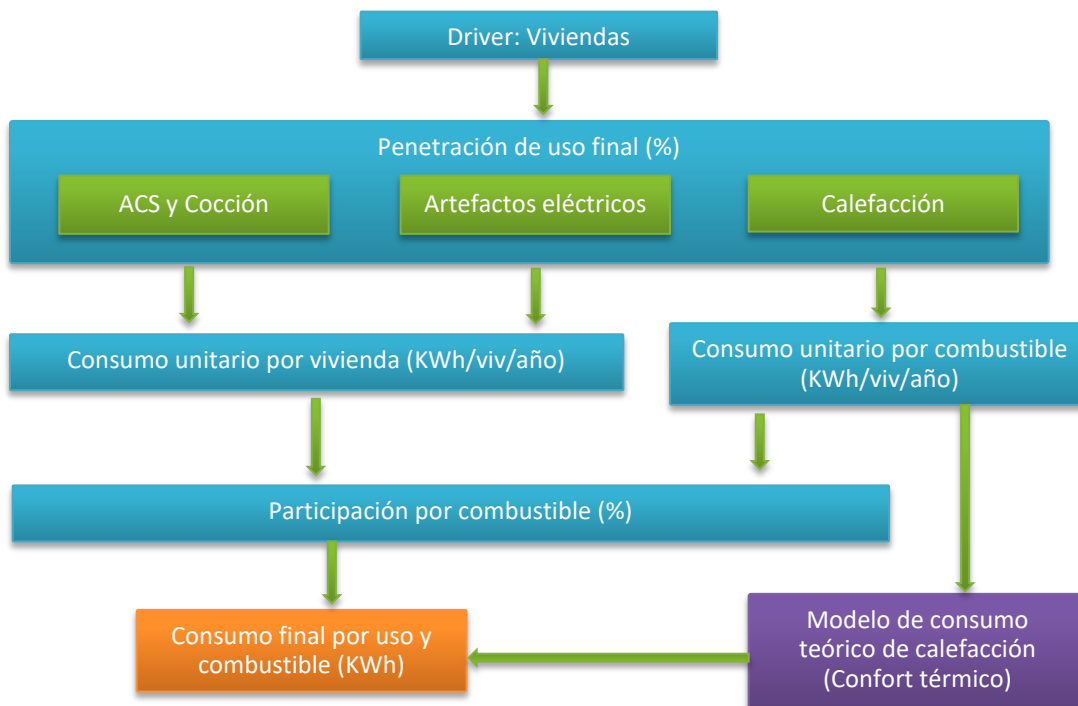


Figura 3.10 Enfoque Metodológico Sector Residencial

Fuente: Estudio “Desarrollo de una Herramienta Prospectiva de Largo Plazo”. Ministerio de Energía. 2016

Es importante mencionar, que para estimar el consumo de calefacción se distingue entre un **consumo real** y un **consumo teórico**. El consumo real corresponde al consumo efectivo de los hogares y cuyos valores actuales se obtienen de encuestas (como CDT 2010) o se infieren del Balance Nacional de Energía. El consumo teórico es aquella estimación de la cantidad de energía que permitiría que los hogares estén en confort térmico. El confort térmico se obtiene de un modelo teórico, generado específicamente para este efecto por el equipo consultor en el desarrollo de la herramienta prospectiva.

No se espera que coincida el consumo real con el teórico, ya que el consumo teórico considera que las viviendas están en confort térmico, cuando en la práctica no lo están. Por tanto, la diferencia entre el consumo real y el teórico corresponde a la cantidad de energía adicional que es necesario utilizar en el parque de viviendas, para alcanzar aproximadamente el confort térmico. En la proyección esta brecha

cae junto con el crecimiento del ingreso de los hogares de acuerdo a los supuestos de crecimiento de la actividad económica (PIB).

3.4 Escenarios de Consumo de Energía Eléctrica

En concordancia con la estructura de consumo del sector residencial, en esta sección se presentan escenarios con distintos niveles de penetración de consumo eléctrico para los usos de calefacción, y agua caliente sanitaria (ACS) y cocción. En su conjunto estos tres usos representan el 81% del consumo de energía del sector residencial y actualmente se asocian principalmente a consumos de leña y biomasa, gas natural y derivados de petróleo (gas licuado y kerosene). El resto corresponde a distintos usos eléctricos de los hogares donde la energía eléctrica no tiene sustitutos.

En la definición de los escenarios futuros destaca la expansión de la calefacción. A diferencia de los usos cocción y ACS, la calefacción es un uso del cual se espera un incremento importante, debido a que, en la actualidad, gran parte de las viviendas del país se encuentran lejos de confort térmico -temperatura en invierno entre 19 y 21 °C en el interior de las viviendas. Por lo tanto, y de acuerdo a la evidencia empírica internacional, se espera que junto con el crecimiento de los ingresos de los hogares aumente la demanda efectiva de calefacción de forma progresiva de forma de ir reduciendo la brecha entre el nivel de calefacción que experimentan los hogares y el confort térmico.

Escenarios de consumo energético analizados

Los tres escenarios de consumo energético para el sector transporte considerados son:

- *Escenario conservador* que da cuenta de condiciones históricas y que proyectan niveles de consumo y cambios en su estructura consistentes con las tendencias de crecimiento del consumo. Este es un escenario de referencia- o base- contra el cual se evalúan costos y beneficios de los escenarios de mayor consumo eléctrico.
- *Escenario moderado* contempla mayores porcentajes de adopción de tecnologías eléctricas consistentes con supuestos de expectativas tecnológicas, crecimiento económico, condiciones de mercado y regulatorias
- *Escenario optimista* contempla niveles de penetración eléctrica incluso mayores.

De estos escenarios, el escenario conservador resulta de una proyección de las tendencias actuales de electrificación, considerando que no existen políticas adicionales que incrementen el uso eléctrico residencial. Los otros dos escenarios consideran aplicación adicional de políticas e incentivos a la adopción de tecnologías de calefacción sustentable en las viviendas. En el escenario moderado se asume que la electricidad compite con el gas licuado y la parafina y que prácticamente no se reemplaza leña. El gas natural tendría mayores costos de recambio dada la naturaleza de las tecnologías. En el escenario optimista- y para poder llegar a las metas de penetración definidas- es necesario también permitir la sustitución por leña.

En los tres escenarios, para la proyección energética del sector, se incorporan explícitamente fenómenos como el crecimiento demográfico y económico, disminución del tamaño de las viviendas-número de habitantes por hogar- y niveles crecientes de regulación ambiental. Respecto de las políticas, la construcción de los tres escenarios indicados considera la aplicación y continuación de las siguientes políticas, las que al año 2016 ya estaban siendo aplicadas o se encontraban en una fase avanzada de implementación:

- Políticas de reacondicionamiento térmico: Se considera que continúan las políticas de reacondicionamiento térmico consistentes en subsidios para las familias más desposeídas y créditos para la clase media, con un total de 24.000 viviendas al año reacondionadas. Respecto de viviendas nuevas se asume que se implementa un etiquetado obligatorio de viviendas nuevas.
- Etiquetado de refrigeradores, aires acondicionados y ampolletas.
- Estándar mínimo de eficiencia de ampolletas (prohibición de comercialización de ampolletas incandescentes).
- Estándar mínimo de eficiencia energética para motores (MEPS) bajo 10 HP.
- Subsidios y exención tributaria para fomentar la instalación de sistemas solares térmicos para el calentamiento de agua caliente sanitaria (ACS), resultando en cerca de 15.000 sistemas instalados al año.

La diferencia entre escenarios será la participación de la electricidad en cada uso de consumo residencial considerado: calefacción, agua caliente sanitaria y cocción. Esta diferencia depende de la competitividad de las tecnologías eléctricas versus las convencionales, pero también de regulaciones ambientales-especialmente para el caso de la calefacción. Los beneficios y costos de tener más o menos electricidad se dependen de la comparación de cada escenario con el escenario conservador.

3.5 Antecedentes, supuestos y definición de escenarios

En los distintos escenarios, se asume que las demandas de sector residencial aumentan con el crecimiento del ingreso de los hogares y de la población, según se evidencia en las experiencias internacionales y también del país tal como se explica al comienzo de este estudio y se modela en la herramienta prospectiva (Ministerio de Energía 2016). Este efecto es particularmente importante en los consumos de calefacción, donde el aumento de bienestar económico hace que los niveles de confort asociados resulten en demandas de consumo cada vez mayores. Los escenarios se plantean por uso y se definen a partir de la participación (o penetración) que el consumo de electricidad tiene en cada uso.

3.5.1 Definición de escenarios

En esta sección se presenta una visión integrada de la definición de los escenarios por cada uso y de las metodologías de construcción de escenarios. La metodología se refiere a la definición de la penetración de la electricidad en cada uno de los usos del sector. Los escenarios se definen a partir de la fracción que la electricidad representa en el consumo final del sector.

Participación del consumo eléctrico

Al referirse a la *participación* o *penetración* del consumo eléctrico, se refiere al porcentaje de consumo del uso que se satisface con electricidad.

$$p_e = \frac{e}{\sum c_j}$$

Ecuación 16 Participación del consumo de electricidad

Donde p_e representa la participación del consumo de electricidad (e) en el consumo total $C = \sum c_j$, donde los índices j representan los distintos energéticos.

La tabla siguiente presenta la definición de los tres escenarios de consumo eléctrico para el sector residencial:

Uso	Calefacción			ACS			Cocción		
Año	2017	2030	2050	2017	2030	2050	2017	2030	2050
Conservador	2%	10%	15%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
Moderado	2%	20%	30%	1%	20%	30%	1%	10%	20%
Optimista	2%	30%	60%	1%	30%	50%	1%	20%	30%

Tabla 13. Escenarios de consumo eléctrico sector residencial
Fuente: Elaboración propia

En la definición de estos escenarios se incluyen consideraciones económicas y regulatorias de manera general, pero en ningún caso corresponde a predicciones. La justificación de estos escenarios se dará a continuación basándose en antecedentes y tendencias para cada uno de los usos.

3.5.2 Calefacción

La calefacción es el principal consumo del sector residencial y se espera que su participación vaya aumentando junto con el crecimiento económico. La pregunta que cabe resolver es cuál será el energético que permitirá satisfacer la demanda de calefacción en el futuro. Esto dependerá de factores culturales, económicos y regulatorios.

La figura siguiente presenta los costos de capital- precio de compra de equipos:



Calefactor certificado leña	Calefactor no certificado leña	Pellet de madera	Parafina (Prefiera tiro forzado)	Split calefactor A/C reversible	Gas licuado (Prefiera tiro forzado)	Gas natural (Solo en Chillán y Los Angeles)	Oleoeléctrico Termoventilador
\$170.000 a \$400.000	Prohibida su venta	\$500.000 a \$2.270.000	\$50.000 a \$500.000	\$200.000 a \$950.000	\$60.000 a \$110.000	\$133.000 a \$320.000	\$10.000 a \$200.000

Figura 3.11 Precios de equipos de calefacción

Fuente: Calefacción Sustentable. Ministerio de Medio Ambiente. 2016.

Las figuras siguientes- de modo ilustrativo- presentan información oficial respecto del valor de una cuenta mensual utilizando las distintas tecnologías de calefacción para consumos representativos de la Regiones Metropolitana, del Bío-Bío y Los Ríos en 2017. En Santiago y Concepción, la calefacción por bomba de calor (“inverter”) presenta los menores costos mensuales para los hogares mientras que en Valdivia sólo son más económicas las tecnologías a leña y biomasa.



Figura 3.12 Cuenta mensual representativa por tecnología en Santiago.

Fuente: Calefacción Sustentable. Ministerio de Medio Ambiente. 2017.

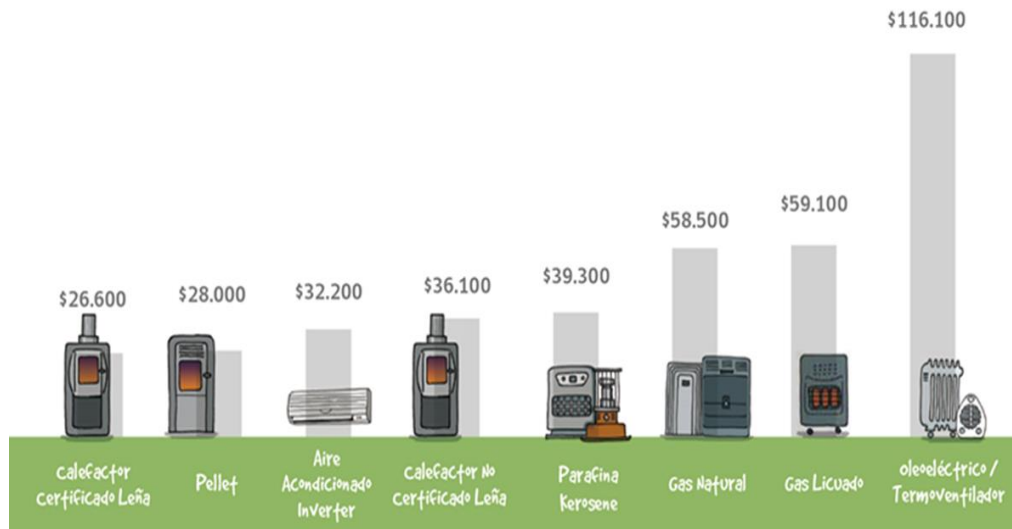


Figura 3.13 Cuenta mensual representativa por tecnología en Concepción.
Fuente: Calefacción Sustentable. Ministerio de Medio Ambiente. 2017.



Figura 3.14 Cuenta mensual representativa por tecnología en Valdivia.
Fuente: Calefacción Sustentable. Ministerio de Medio Ambiente. 2017.

Utilizando estos antecedentes públicos, es posible estimar y comparar el valor presente de los costos para distintos horizontes para cada una de las tecnologías: parafina, gas licuado, gas natural, electricidad convencional y bomba de calor (split). Para el precio de los equipos se utiliza el valor medio del rango presentado en la figura 3.11. La tabla siguiente resume los costos de capital, energía y valor presente asumiendo 6 meses de calefacción anuales, horizontes de 5 y 10 años y la tasa social de

descuento 6% para la ciudad de Concepción. El cuadro también muestra la diferencia entre el valor presente de costos entre las distintas tecnologías y la bomba de calor. En este análisis no se consideran las tecnologías a leña por tratarse mayoritariamente de un mercado informal asociado a costos mucho menores. De todas, maneras como gatillante importante del aumento de consumo eléctrico de calefacción se considerarán regulaciones ambientales crecientes que ya están limitando e incluso prohibiendo el uso de leña para la calefacción.

	Precio equipo	Valor cuenta	Valor presente 5 años	Diferencia	Valor presente 10 años	Diferencia
Gas Natural	226.500	58.500	1.793.752	356.094	2.964.894	1.260.519
Gas Licuado	85.000	59.100	1.668.326	230.668	2.851.480	1.147.106
Kerosene	275.000	39.300	1.327.872	-109.787	2.114.639	410.265
Electricidad	105.000	87.100	3.215.393	1.777.734	4.182.164	2.477.790
Bomba Calor Eléctrica	575.000	24.127	1.437.658	0	1.704.375	0

Tabla 14. Valor presente de costos de calefacción para distintas tecnologías en Concepción
Fuente: Elaboración propia

La bomba de calor resulta ser la tecnología más económica en un horizonte de 10 años y sólo es superada por el kerosene considerando 5 años confirmando la competitividad de este combustible. Los resultados también sugieren que existe fuerte competencia entre las tecnologías a gas natural (GN) y gas licuado (GL) siendo el kerosene resulta más económico que sus competidores convencionales.

La penetración de cada una de estas tecnologías depende de numerosos efectos: preferencias, liquidez, periodo de recuperación del capital (*payback*), entre otras. En efecto, la bomba de calor a pesar de permitir ahorros en el largo plazo se asocia a niveles de inversión iniciales elevados lo que constituye, en general, una barrera a su adquisición.

Dentro de las tecnologías de calefacción eléctricas, se ha diferenciado el uso de calor directo (resistencia eléctrica convección o radiación) de las bombas de calor. La modelación considera primero ajustar curvas de tipo S de acuerdo a la definición de escenarios. Los ingresos de las tecnologías eléctricas- penetraciones- se ajustan a estas curvas para cumplir con las definiciones de los años 2030 y 2050, siguiendo trayectorias representativas de adopción y reemplazo tecnológico, y no se asocian a modelación económica explícita. Estas curvas serán distintas para cada uno de los tres escenarios.

Dentro del consumo eléctrico se hace competir la bomba de calor con la electricidad convencional utilizando consideraciones de un modelo de difusión e indicadores económicos. Este modelo no cambia a través de los escenarios, aunque sí el consumo total. Por ejemplo, si el total del consumo de calefacción aumenta, crece también el consumo de las bombas eléctricas- aunque todos los escenarios presentan las mismas proporciones.

La metodología de adopción de bombas de calor es análoga a la presentada en el capítulo de transporte (modelo de difusión y adopción). Para estimar el modelo de difusión y *payback*, se consideran supuestos

relativamente conservadores: un costo inicial adicional (respecto de un calefactor eléctrico básico) de \$450.000 que decrecerá en un 1% anual, dando cuenta del aumento de competencia y maduración del mercado. Además, se considera un costo anual de mantención de 3% del costo de inversión²⁵ y un ahorro de 60% respecto de los calefactores eléctricos convencionales.

Los resultados arrojan un ingreso de 500.000 bombas de calor al año 2030 en el escenario conservador. Este valor resulta razonable, si se considera que Francia²⁶, que cuenta con una población casi 4 veces mayor a la de Chile y que actualmente se encuentra en un nivel bajo (pero mayor al de Chile) de penetración de esta tecnología de calefacción, proyecta 2.000.000 de hogares calefaccionados con bombas de calor para el año 2020²⁷. Es decir, se asume una penetración similar de los sistemas por habitante, pero con 10 años de retraso, considerando que Francia ya suplía un 1,7% de su demanda de calefacción con bombas de calor el año 2012²⁷, y la penetración actual en Chile es cercana al 0%.

3.5.3 Agua caliente sanitaria

El uso de agua caliente sanitaria se asocia principalmente al crecimiento del ingreso y a la expansión del parque de viviendas. Específicamente, y dada la competitividad de las tecnologías se asume que la electricidad gana espacio especialmente por sobre el GLP. Actualmente la electricidad representa alrededor del 0,5% del consumo de energía asociado a agua caliente en Chile sin embargo de acuerdo a las tendencias internacionales los sistemas eléctricos aumentarán su participación en ACS, por ejemplo, al año 2014 el 36% de las viviendas australianas ya utilizaban sistemas eléctricos para calentar el agua²⁸.

En cada caso se modelan curvas logísticas (curva S) comenzando con una participación de consumo inicial de 1% el año 2014. El nivel de penetración presenta variaciones de región en región alcanzando valores entre 15% y 20% al año 2050, dependiendo de la existencia de redes de gas natural, las que se asumen más difíciles de reemplazar. Además, existen variaciones por las distintas penetraciones de energía solar. Por ejemplo, para el año 2050 se espera un 26% de generación de agua caliente sanitaria con energía solar en la tercera región, pero poco más de un 2% en la región Metropolitana.

3.5.4 Cocción

El uso de cocción es similar al de agua caliente dado que se asocia especialmente al crecimiento a la competitividad de la electricidad especialmente por sobre el GLP. Sin embargo, en éste el recambio de una tecnología (GN, GLP) a la electricidad suele ser costosa (en el caso de cocinas a inducción), o no es bien recibida desde un punto de vista cultural (en el caso de cocinas por resistencia), lo que resulta en

²⁵ Norma EN 15459: Eficiencia energética de los edificios - Procedimiento de evaluación económica de los sistemas energéticos de los edificios, 2008.

²⁶ Se utiliza Francia como referencia, ya que se encuentra en un punto incipiente de adopción de la tecnología de bombas de calor y presenta un clima similar al de Chile. Se descarta otros países que podrían presentar mayor similitud climática, como España o Italia, pues se encuentran más avanzados en la curva de adopción de la tecnología.

²⁷ Heat Pump Implementation Scenarios until 2030 - An analysis of the technology's potential in the building sector of Austria, Belgium, Germany, Spain, France, Italy, Sweden and the United Kingdom, Ecofys, 2013

²⁸ <http://www.energyrating.gov.au/products/water-heaters>

barreras a su mayor penetración. En cada caso se modelan curvas logísticas (curva S) comenzando con una participación de consumo inicial menor a 1% el año 2014. Se proyecta un nivel de penetración de un 20% de las viviendas al año 2050, con una participación en el consumo energético de cocina de un 11% aproximadamente.

3.6 Resultados de Consumo de energía

En el escenario conservador se espera que el crecimiento económico y demográfico haga crecer el consumo de energía del sector residencial. El gráfico siguiente presenta los resultados de consumo de energía final.

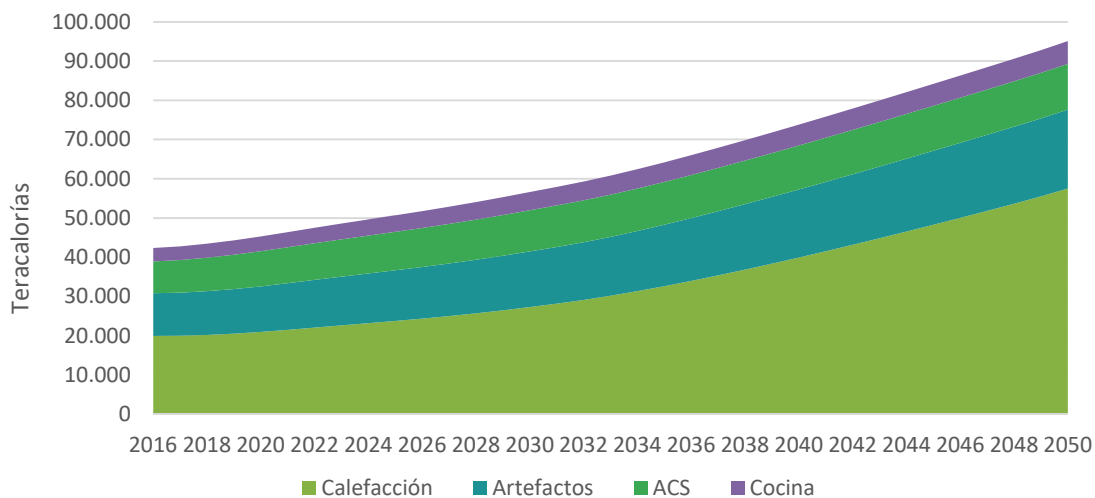


Figura 3.15 Proyección de Consumo de Energía del Sector Residencial por uso en Escenario Base (Teracalorías)

Fuente: Elaboración propia

En este escenario, y como era de esperar, la calefacción es el uso energético que más crece en consistencia con el crecimiento económico esperado. En efecto, de representar alrededor del 47% del consumo residencial en 2016, llega a 60% en 2050. Le sigue el consumo de artefactos eléctricos que en todo el periodo se encuentra entre 21% y 26%.

Respecto al consumo por combustible, la leña representa actualmente la mayor parte del consumo (37%) seguido por electricidad (27%) aunque poco antes del 2030, se espera que el consumo de electricidad supere al de leña. En 2050 se obtiene que el 33% del consumo es eléctrico mientras que 19% leña. En este escenario la participación del gas licuado se mantiene relativamente estable- en torno al 24%, mientras que la del gas natural crece levemente de 12% en 2016 a 16% en 2050.

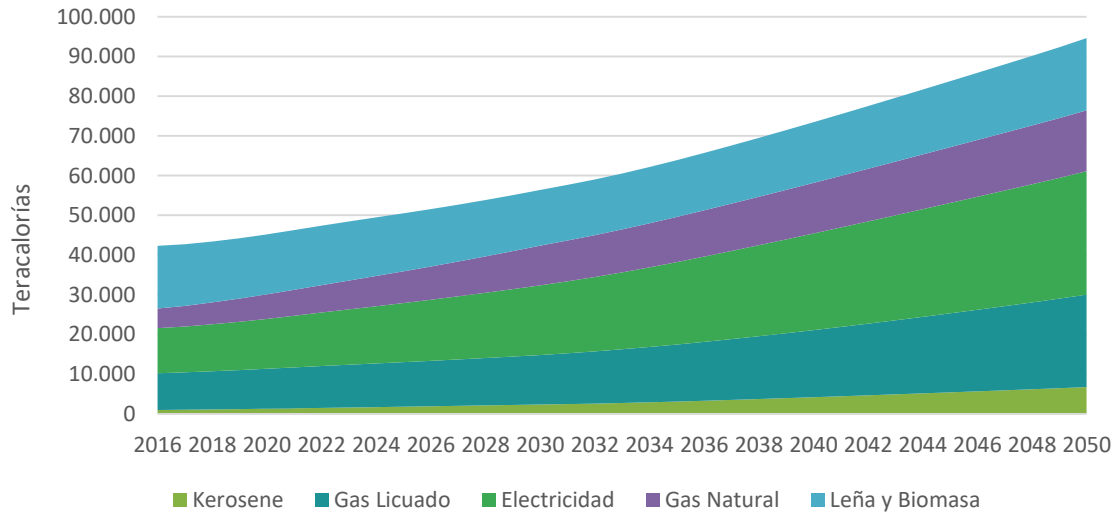


Figura 3.16 Proyección de Consumo de Energía del Sector Residencial por energético en Escenario Base (Teracalorías)

Fuente: Elaboración propia

Al comparar la demanda energética total (todos los usos y energéticos) entre escenarios se aprecia que la mayor participación de la electricidad en los distintos usos de consumo residencial resulta en mayores niveles de eficiencia. La satisfacción de los mismos usos se asocia entonces a menor consumo de energía final. En el año 2030 el escenario moderado permite reducir 1,7% de consumo energético total respecto del escenario base mientras que al 2050 esta cifra alcanza a 2,3%. Al considerar el escenario optimista con incluso mayor electrificación los ahorros respecto del escenario base llegan a 6,3% en 2030 y 6,2% en 2050.

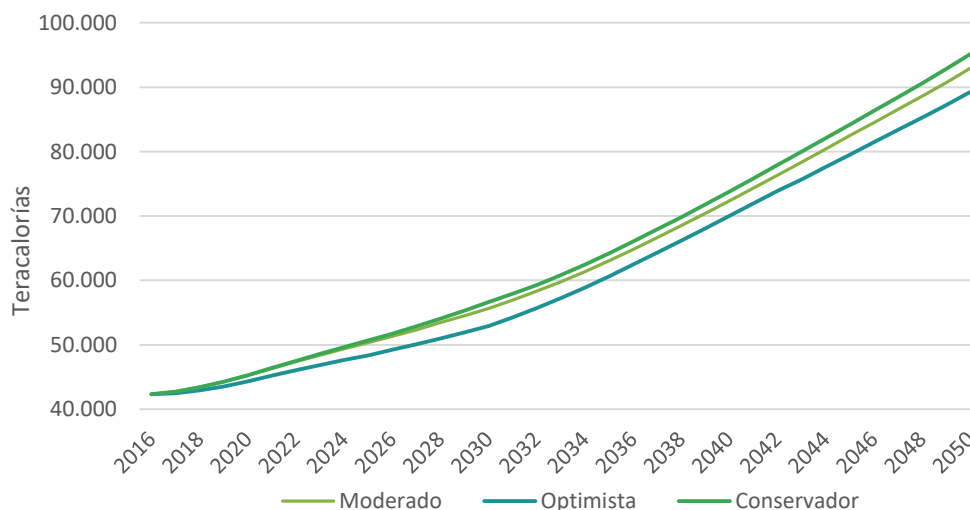


Figura 3.17 Consumo de Energía Residencial (Teracalorías)
Fuente: Elaboración propia

Respecto del consumo eléctrico, y como es de esperar, el escenario base tiene la menor tasa de crecimiento medio anual de electricidad con 3% entre 2017 y 2050. Estas tasas suben a 3,8% y 4,9% en los dos escenarios de mayor electrificación.

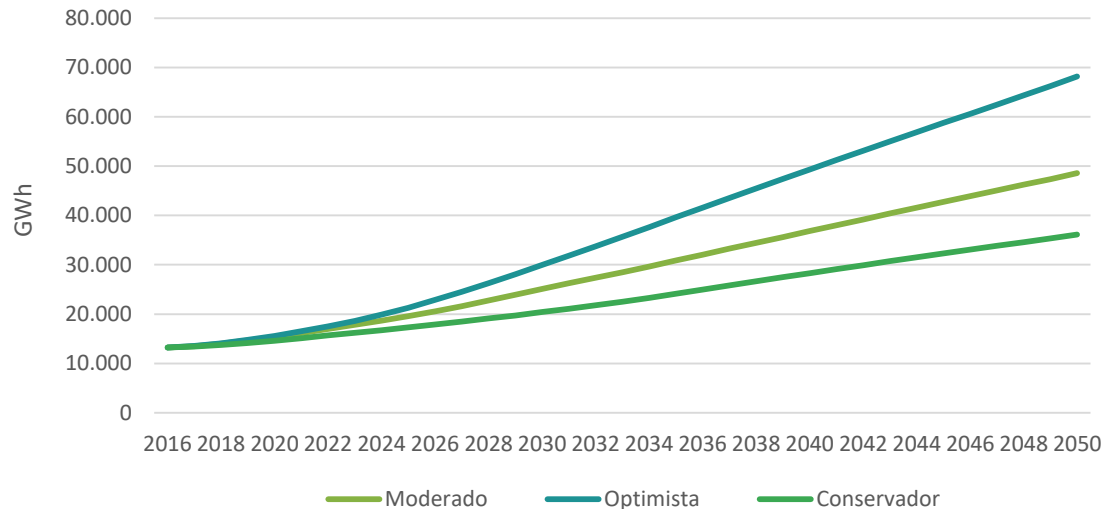


Figura 3.18 Consumo de Energía Eléctrica Residencial (GWh)
Fuente: Elaboración propia

En el primer escenario de electrificación la mayor parte del aumento de consumo se explica por el aumento de consumo eléctrico de calefacción. El incremento de consumo por calefacción explica el 36% del aumento en 2020 y llega a 74% en 2050.

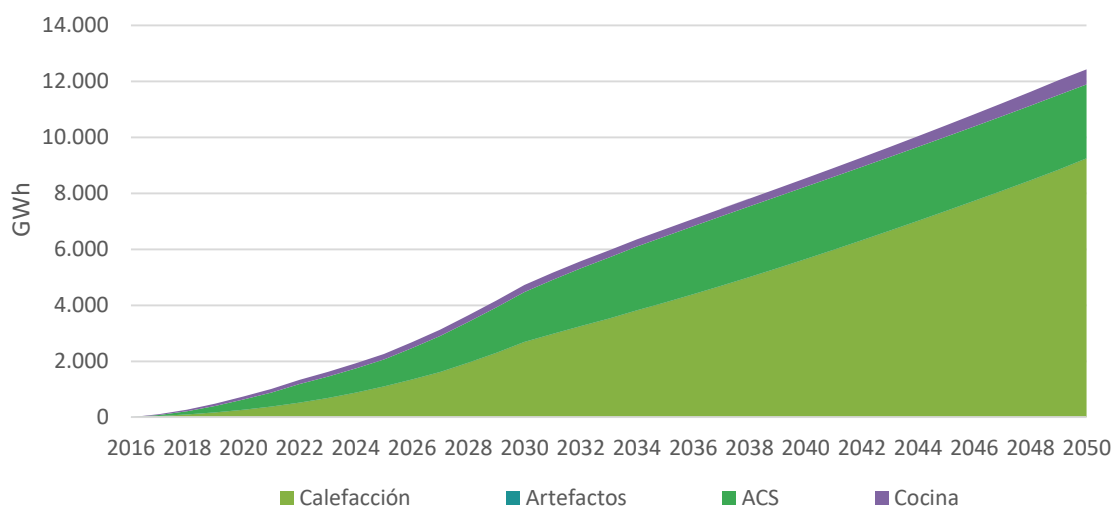


Figura 3.19 Aumento de Consumo Eléctrico por uso en Escenario Moderado (GWh)
Fuente: Elaboración propia

En el segundo escenario de electrificación ocurre algo similar, aunque incluso más pronunciado: nuevamente la mayor parte del aumento de consumo se explica por el aumento de consumo eléctrico de calefacción. El incremento de consumo por calefacción explica casi el 38% del aumento en 2020 y llega a 83% en 2050.

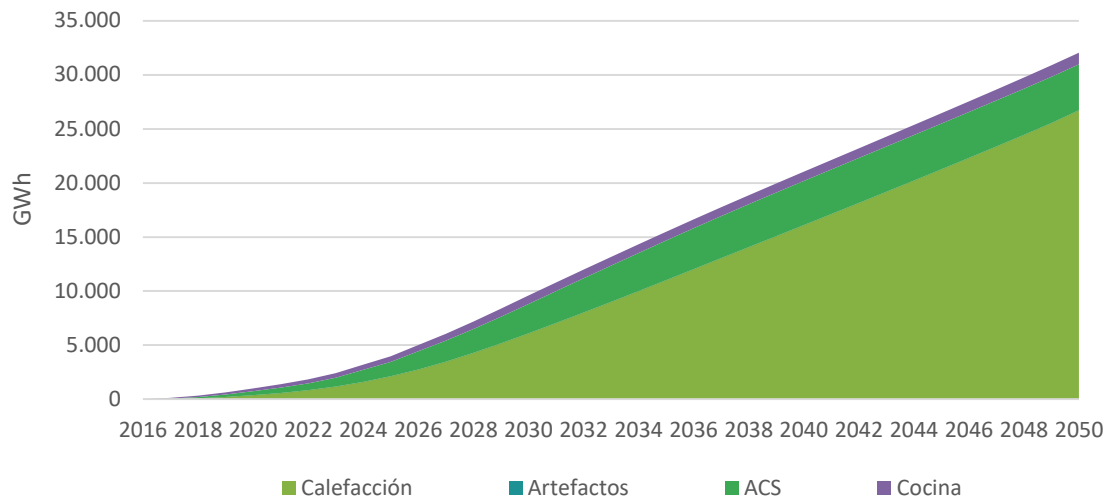


Figura 3.20 Aumento de Consumo Eléctrico por uso en Escenario Optimista (GWh)
 Fuente: Elaboración propia

3.7 Emisiones de Gases Efecto Invernadero

La incorporación de la energía eléctrica en los consumos del sector residencial permitiría reducir de manera significativa las emisiones (directas) del sector. En el escenario base las emisiones suben de poco más de 4 millones en 2016 de toneladas a casi 12 millones en 2050. En los escenarios, las emisiones en 2050 llegan a poco más de 8 millones (Moderado) y 4 millones (Optimista). Como consecuencia, en el primer escenario- en el acumulado 2020-2050- se reducen en 57 millones de toneladas las emisiones de gases efecto. En el segundo, esta cifra prácticamente se duplica alcanzando un ahorro acumulado de 112 millones de toneladas.

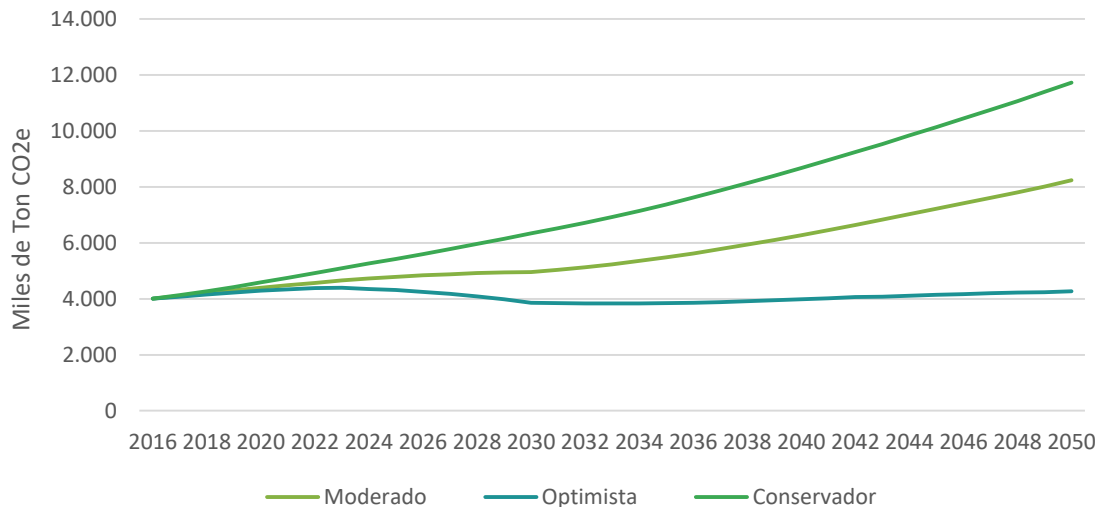


Figura 3.21 Emisiones de gases efecto invernadero en cada escenario (Miles de toneladas de CO₂eq)
 Fuente: Elaboración propia

Las emisiones casi se triplican entre 2017 y 2050 en el escenario conservador; se duplican en el moderado y crecen sólo 5% el escenario optimista. Es relevante destacar que el escenario optimista permite revertir el crecimiento al alza de las emisiones y estabilizarlas. En Chile hay alrededor de 5,5 millones de viviendas y dado el nivel de emisiones de CO₂eq se infiere que una vivienda promedio en Chile emite anualmente alrededor de 0,8 toneladas de CO₂eq.

3.8 Beneficios de contaminación local en Temuco- Padre las Casas

Actualmente las comunas de Temuco y Padres las Casas son zonas saturadas por material particulado fino (MP 2,5). En estas comunas de la Región de La Araucanía, el problema se deriva de la contaminación emitida por los sistemas de calefacción y combustión a base de leña, lo que genera graves problemas de calidad ambiental. Las emisiones anuales de estas comunas se encuentran en torno a 15 mil toneladas de particulado fino y cerca del 96% se explicaría por combustión a leña (MMA, 2016²⁹).

Un calefactor de leña no certificado puede emitir 150 kg de MP_{2,5} al año en la novena región. Uno certificado 36 kg. La mayor participación de electricidad en los usos de calefacción trae consigo importantes beneficios en salud en ciudades saturadas por contaminación por leña.

²⁹ <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/04/Resumen-PDA-Temuco-y-PLC.pdf>

	Calefactor certificado leña	Calefactor no certificado leña	Pellet de madera	Parafina (Prefera tiro forzado)	Split calefactor A/C reversible	Gas licuado (Prefera tiro forzado)	Gas de cañería	Oleoeléctrico Termoventilador
Rango de precio del calefactor	\$170.000 a \$400.000	Prohibida su venta	\$500.000 a \$2.270.000	\$50.000 a \$500.000	\$200.000 a \$950.000	\$60.000 a \$110.000	\$133.000 a \$320.000	\$10.000 a \$200.000
Emissiones kg/vivienda por mes MP2,5	3.0	12.5	0.4	0.03	0	0	0	0

*Considera una casa tipo 2, calefaccionándose durante 8 horas al día a una temperatura de confort de 18°C y una demanda térmica mensual de 997 kWh

Figura 3.22 Rango de precio y emisiones por tipo de calefactor
Fuente: Calefacción Sustentable. Ministerio de Medio Ambiente. 2016.

La siguiente tabla muestra las variaciones en las emisiones de MP2,5 de los escenarios moderado y optimista respecto del conservador.

Escenario	2020	2030	2040	2050	Media anual 2017-2050
Moderado	0,10	3	6	9	4
Optimista	412	1.488	2.359	3.017	1.838

Tabla 15. Reducción de emisiones respecto de escenario conservador (ton MP2,5 por año)
Fuente: Elaboración propia

Las variaciones en las emisiones impactarán la calidad del aire medida a través de las concentraciones de contaminantes. En este caso se considera sólo MP2,5 por ser el más dañino y relevante. La estimación de estas concentraciones se realiza utilizando relaciones empíricas respecto de su relación-los factores de emisión -concentración. A continuación, se presentan los resultados de concentraciones de los dos escenarios analizados.

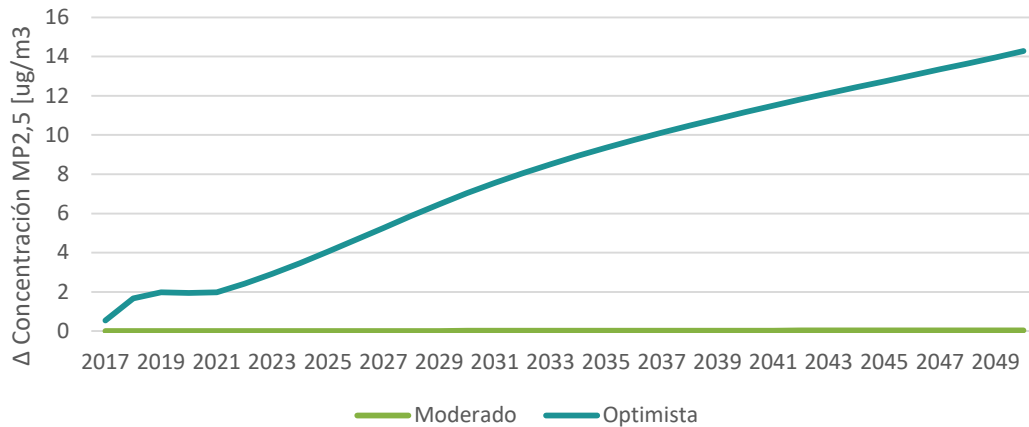


Figura 3.23 Reducción de concentraciones de escenarios moderado y optimista
Fuente: Elaboración propia

Los resultados son elocuentes. El escenario moderado presenta una reducción anual promedio respecto del escenario conservador de 0,2ug/m3 muy por debajo del escenario optimista que reduciría 8 ug/m3 en promedio. La causa de esta diferencia radica en que en el escenario moderado la electricidad reemplaza consumo de gas licuado y kerosene- respecto del escenario conservador. En el escenario optimista el consumo de energía eléctrica reemplaza consumo a leña lo que se traduce en mejoras de calidad del aire significativas.

Los mejores niveles de calidad del aire- asociados a menores concentraciones de MP2,5- resultarían en un menor número de casos de salud adversas ya sea por casos de muerte, admisiones hospitalarias u otras condiciones de salud.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050	Total
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	0	0	0	0	1
	Cardiopulmonar largo plazo	0	0	0	1	8
	Todas las causas largo plazo	0	0	0	1	7
Admisiones	Asma	0	0	0	0	0
	Cardiovascular	0	0	0	0	4
	Respiratorias crónicas	0	0	0	0	2
	Neumonía	0	0	0	0	5
	Bronquitis	0	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	0	0	0	0	0
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	0	27	58	101	1.330
	Días de actividad restringida	2	132	282	491	6.494
	Días de actividad restringida menor	4	248	532	925	12.238

Tabla 16. Casos de salud evitados en escenario moderado respecto del conservador
Fuente: Elaboración propia

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050	Total
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	2	9	16	24	383
	Cardiopulmonar largo plazo	15	71	140	213	3.337
	Todas las causas largo plazo	15	64	120	177	2.883
Admisiones	Asma	1	3	6	8	145
	Cardiovascular	9	39	74	110	1.772
	Respiratorias crónicas	4	20	37	54	885
	Neumonía	10	48	95	145	2.258
	Bronquitis	0	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	0	0	0	1	10
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	3.239	13.222	23.361	32.946	564.961
	Días de actividad restringida	15.794	64.512	114.043	160.901	2.757.807
	Días de actividad restringida menor	29.799	121.636	214.913	303.089	5.197.427

Tabla 17. Casos de salud evitados en escenario optimista respecto del conservador
Fuente: Elaboración propia

La metodología permite también estimar el beneficio económico de mejorar la calidad del aire: se dará valor monetario a los casos evitados. Para ello se utilizan valores unitarios: aproximadamente US\$630 mil por cada caso de muerte y US\$1.400 por admisión hospitalaria (ver anexo para detalles).

Los impactos en mortalidad y morbilidad son relevantes en el escenario optimista donde los beneficios por reducción de particulado fino pasan de US\$ 10 millones en 2020 a US\$ 136 millones en 2050, por lo que, en promedio, se perciben del orden de US\$ 70 millones cada año. En el moderado las cifras son bastante menores, con sólo unos US\$ 200 mil anuales en promedio.

Las tablas siguientes presentan los beneficios anuales para cada escenario y para cada uno de los efectos considerados³⁰. En valor presente, y utilizando la tasa social de descuento de 6%, el escenario moderado arroja beneficios - respecto del escenario conservador- en torno a US\$1 millón y en el escenario optimista de US \$600 millones.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	169	10.903	24.733	44.947
	Cardiopulmonar largo plazo	1.314	91.115	216.489	406.520
	Todas las causas largo plazo	1.273	82.103	185.958	337.554
Admisiones	Asma	0	8	17	29
	Cardiovascular	3	188	433	795
	Respiratorias crónicas	1	61	139	253
	Neumonía	2	164	392	739
	Bronquitis	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	0	1	2	3
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	17	990	2.122	3.690
	Días de actividad restringida	27	1.610	3.452	6.007
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0
Total		2.806	187.143	433.736	800.538

Tabla 18. Beneficios monetarios en escenario moderado respecto del conservador (US\$)

Fuente: Elaboración propia

³⁰ Para el cálculo de beneficios total se considera sólo mortalidad de largo plazo cardiopulmonar como es habitual y para evitar doble conteos.

Tipo de Efecto	Efecto	2020	2030	2040	2050
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	1.212.626	5.343.158	9.992.768	14.726.151
	Cardiopulmonar largo plazo	9.443.060	44.652.648	87.467.139	133.188.670
	Todas las causas largo plazo	9.152.010	40.235.962	75.131.887	110.593.222
Admisiones	Asma	1.023	4.031	6.919	9.525
	Cardiovascular	20.432	92.075	174.862	260.576
	Respiratorias crónicas	6.837	30.129	56.353	83.052
	Neumonía	16.748	80.158	158.182	242.075
	Bronquitis	0	0	0	0
	Bronquitis crónica	82	344	619	886
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	118.853	485.139	857.174	1.208.860
	Días de actividad restringida	193.175	789.028	1.394.830	1.967.943
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0
Total		9.800.210	46.133.553	90.116.079	136.961.587

Tabla 19. Beneficios monetarios en escenario optimista respecto del conservador (US\$)

Fuente: Elaboración propia

4 ANEXOS

4.1 Supuestos de Modelación

Año	Crecimiento PIB (%)	Cobre (Miles de ton)
2016	1.54	5656
2017	2.10	5886
2018	2.70	5912
2019	3.02	6016
2020	3.20	6070
2021	3.40	6090
2022	3.30	6128
2023	3.20	6179
2024	3.10	6204
2025	3.00	6217
2026	3.00	6242
2027	3.00	6274
2028	3.00	6305
2029	3.00	6337
2030	3.00	6368
2031	3.00	6400
2032	3.00	6432
2033	3.00	6463
2034	3.00	6495
2035	3.00	6526
2036	2.90	6558
2037	2.80	6589
2038	2.70	6621
2039	2.60	6653
2040	2.50	6684
2041	2.40	6716
2042	2.30	6747
2043	2.20	6779
2044	2.10	6811
2045	2.00	6842
2046	1.90	6874
2047	1.80	6905
2048	1.70	6937
2049	1.60	6968
2050	1.50	7000

Tabla 20. Supuestos de modelación

4.2 ANEXO: Metodología de Estimación de Beneficios Ambientales Locales

a metodología empleada corresponde a la presentada en el documento “Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto de Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana” (MMA 2015) y en la “Guía Metodológica para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (Agies) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire” del mismo Ministerio (MMA, 2013). Con ello, tanto la metodología y los valores de las variables utilizadas se basan en documentos oficiales, y corresponden a las utilizadas en todos los estudios de valoración de impactos de salud por $MP_{2.5}$ en Chile.

Para realizar la evaluación se estimará la diferencia en daños en salud asociadas a los escenarios que incorporan vehículos a eléctricos y se valorará la reducción de cada efecto de acuerdo a valores oficiales propuestos.

4.2.1 Metodología de Evaluación de Impactos

La experiencia internacional revela que los beneficios de salud dominan holgadamente al resto de categorías de externalidades como visibilidad, materiales o agricultura. En Chile es muy escasa la experiencia en estas últimas externalidades, e incluso en 2013 se recomienda en un estudio de SECTRA³¹ no incluir visibilidad y materiales en evaluaciones urbanas por los bajos beneficios asociados. Sin embargo, varios estudios han confirmado la relevancia de los beneficios en salud de mejor calidad del aire en Santiago y otras ciudades del país lo que ha justificado importantes iniciativas de regulación ambiental. Ver por ejemplo, la definición de norma de termoeléctricas³² o planes de descontaminación para distintas ciudades del país.

La importancia relativa de la categoría de salud en los beneficios justifica en una primera aproximación solo considerar daños a la salud. Por otra parte, el material particulado –en especial el $MP_{2.5}$ – es el contaminante responsable de la mayor parte de los beneficios vinculados a la salud. Por ello en el análisis que se realiza solo se consideran los beneficios a la salud derivados de una reducción a la exposición de $MP_{2.5}$, la que se genera tanto por la reducción en emisiones directas de este contaminante como por la reducción de emisiones de NOx. Por tanto, esta es una estimación conservadora de los beneficios esperados.

Para valorar salud generalmente se distingue entre efectos de mortalidad y morbilidad. Los efectos de mortalidad se centran en causas de muerte mientras que los de morbilidad en enfermedades no mortales o un conjunto de síntomas. Los efectos en salud que se consideran para la evaluación de beneficios se presentan en la Tabla siguiente.

³¹Estudio Actualización MODEC (2003). Disponible en <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/detalle.asp?mfj=3266>.

³²http://www.sinia.cl/1292/articles-44963_resolucion.pdf

Tipo de Efecto	Efecto Específico
Mortalidad	Respiratoria corto plazo
	Cardiopulmonar largo plazo
	Todas las causas largo plazo
Admisiones Hospitalarias	Asma
	Cardiovascular
	Respiratorias crónicas
	Neumonía
	Bronquitis aguda
	Bronquitis crónica
Visitas Salas de Emergencia	Asma
Productividad perdida	Días laborales perdidos
	Días de actividad restringida
	Días de actividad restringida menor

Tabla 21. Resultados Efectos de Salud Considerados en Evaluación

La mortalidad de largo plazo incluye todas las causas de mortalidad (agudas y crónicas), sobrepasa e incluye las estimaciones de corto plazo, por lo que ambas estimaciones no deben agregarse a pesar ser práctica común la estimación de ambas. En los impactos de morbilidad destacan las admisiones hospitalarias por distintas causas, además de las visitas a sala de urgencia de asma. Finalmente, y pesar de no ser impactos en salud, costos de menor productividad se asocian a la morbilidad por tres causas: (1) los días laborales perdidos en los que una persona no puede trabajar; (2) los días de actividad restringida donde la persona trabaja la mitad del día; y (3) los días de actividad restringida menor donde un conjunto de síntomas de salud adversa limita la productividad del trabajador.

La metodología a utilizar en este estudio para valorar los impactos en salud derivados de cambios en los niveles de concentración de distintos contaminantes atmosféricos corresponde al método de la función de daño (o “impact pathway approach”). Este enfoque es utilizado comúnmente tanto a nivel nacional como internacional para estimar los impactos físicos y económicos generados por la contaminación.

La metodología considera la relación entre una cierta “carga” (emisiones) con un “impacto” y su posterior valoración. La Figura siguiente ilustra los pasos principales de esta metodología aplicada. Cada etapa incluye modelos detallados de diversos procesos.

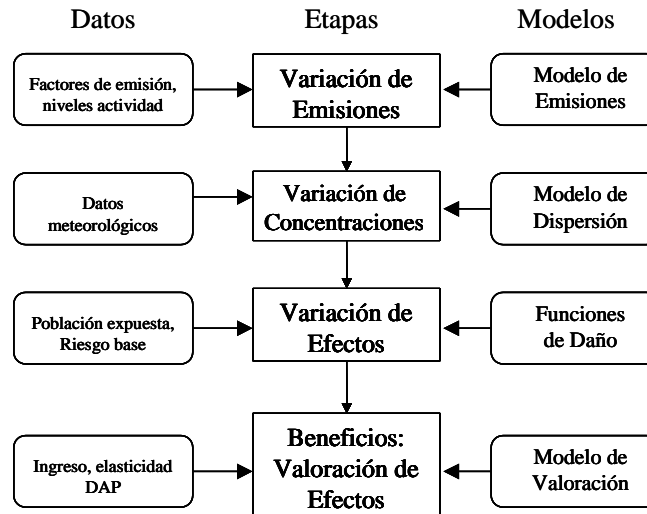


Figura 4.1 Etapas del Método de la Función de Daño, Requerimientos de Datos y Modelos (Cifuentes, Krupnick, O’Ryan, Toman, 2005)

Estimación de impactos

La estimación de los impactos se lleva a cabo utilizando funciones de concentración respuesta. Estas funciones son relaciones empíricas que relacionan cambios en la calidad del aire (de un contaminante en particular) con cambios en una variable de impacto de interés (salud: número de casos de muerte prematura o casos de enfermedades, agricultura: cambios en producción, etc). En particular, el cambio de los efectos evitados se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{ij} = \beta_{ij} * \Delta C * (Pop_j * IR_{ij})$$

Ecuación 17 Cambio de efectos evitados

Dónde:

ΔE_{ij} : Cambio del número de efectos i en la población j debido al cambio de concentraciones de MP2,5

β_{ij} : Coeficiente de relación concentración-respuesta en métrica diaria³³ del efecto i en la población j (por ejemplo, mayores de 65 años o menores de 1 año).

ΔC : Cambio anual de la concentración de MP2,5

Pop_j : Número de personas del grupo j expuesta a MP2,5

IR_{ij} : Tasa de incidencia³⁴ del efecto i en la población j en métrica diaria

³³ El coeficiente de relación concentración-respuesta representa la respuesta biológica del ser humano a determinada concentración de MP2,5, por lo que no cambian al ser aplicados en distintas ciudades. La métrica diaria es equivalente a la métrica aguda que aparece en los estudios consultados.

Relaciones de concentración respuesta

La aplicación de las relaciones de concentración respuesta requiere estimaciones de cambios en la calidad del aire. En este estudio las variaciones en la concentración de MP_{2,5} para un año determinado se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación de acuerdo a la metodología empleada en el AGIES para Chile:

$$\Delta C_{MP2,5} \left[\frac{\mu g}{m^3} \right] = \sum_i \frac{\Delta E_i \left[\frac{ton}{m^3} \right]}{FEC_i \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]}$$

Ecuación 18 Variación de concentración ambiental

Donde el subíndice i corresponde a MP_{2,5} (primario) y NO_x (precursor de MP_{2,5} secundario).

Dónde:

$\Delta C_{MP2,5}$: Variación de la concentración ambiental de MP_{2,5}.

FEC_i : Factor Emisión-Concentración del contaminante i.

ΔE_i : Variación de las emisiones del contaminante i (MP_{2,5} ó NO_x).

Una vez que los impactos han sido cuantificados en términos físicos se procede a su valoración. Algunos de estos efectos pueden ser valorados utilizando precios de mercado; por ejemplo, daños a cultivos pueden medirse a través de la disminución del valor de la producción. Sin embargo, existe una amplia gama de impactos que no poseen valor de mercado. Entre estos destacan aquellos efectos en salud y mortalidad como también el calentamiento global y ecosistemas. En estos casos los beneficios se estiman a través de algún método de costo beneficio, prefiriéndose en lo posible una buena medida de demanda (disposición a pagar).

Valorización de beneficios

Los beneficios valorizados corresponden al impacto en salud producto de la disminución de la concentración ambiental de los contaminantes MP_{2,5} y NO_x (precursor del MP_{2,5}). Los beneficios anuales son calculados de acuerdo a la ecuación presentada a continuación:

$$Beneficio_{año\text{proy}} = \sum_i (\Delta E_i (Población_{año\text{proy}}) * VS_i)$$

Ecuación 19 Variación de beneficios

Dónde:

$Beneficio_{año\text{proy}}$: Beneficio de un año determinado producto de la disminución de los efectos

$\Delta E_i (Población_{año\text{proy}})$: Cambio del número de efectos i de un año determinado

³⁴ Las tasas de incidencia corresponden a la cantidad de personas afectadas del total de población expuesta y es un valor que sí varía de ciudad en ciudad.

VS_i : Valor social del efecto i

Riesgo Etéreo

Tipo de Efecto	Efecto	Coeficientes de Riesgo Unitario por Grupo Etario								
		0-1	1-4	5-12	13-17	18-29	30-44	45-64	65-74	75+
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	-	-	-	-	-	0,39%	0,39%	0,39%	0,39%
	Cardiopulmonar largo plazo	-	-	-	-	-	0,86%	0,86%	0,86%	0,86%
	Todas las causas largo plazo	0,39%	-	-	-	-	0,60%	0,60%	0,60%	0,60%
Admisiones	Asma	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	-	-
	Cardiovascular	-	-	-	-	0,15%	0,15%	0,15%	0,16%	0,16%
	Respiratorias crónicas	-	-	-	-	0,24%	0,24%	0,24%	0,12%	0,12%
	Neumonía	-	-	-	-	-	-	-	0,40%	0,40%
	Bronquitis	-	-	0,77%	-	-	-	-	-	-
	Bronquitis crónica	-	-	-	-	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0,44%	0,44%	0,44%	0,44%	-	-	-	-	-
Productividad perdida	Días laborales	-	-	-	-	0,46%	0,46%	0,46%	-	-
	Días de actividad restringida	-	-	-	-	0,47%	0,47%	0,48%	-	-
	Días de actividad restringida menor	-	-	-	-	0,74%	0,47%	0,74%	-	-

Tabla 22. Coeficientes de Riesgo Unitario por Grupo Etario (MMA, 2015)

Tasas de Incidencia

Tipo de Efecto	Efecto	Tasas de Incidencia por Grupo Etario								
		0-1	1-4	5-12	13-17	18-29	30-44	45-64	65-74	75+
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	-	-	-	-	-	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009
	Cardiopulmonar largo plazo	-	-	-	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0196	0,0196
	Todas las causas largo plazo	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
Admisiones	Asma	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	Cardiovascular	-	-	-	-	0,0031	0,0031	0,0031	0,0287	0,0287
	Respiratorias crónicas	-	-	-	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0047	0,0047
	Neumonía	-	-	-	-	-	-	-	0,0150	0,0150
	Bronquitis	-	-	0,0000	-	-	-	-	-	-
	Bronquitis crónica	-	-	-	-	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Visitas Salas de Emergencia	Asma	0,0087	0,0087	0,0087	0,0087	-	-	-	-	-
Productividad perdida	Días laborales	-	-	-	-	1,3640	1,3640	1,3640	1,3640	1,3640
	Días de actividad restringida	-	-	-	-	6,4605	6,4605	6,4605	6,4605	6,4605
	Días de actividad restringida menor	-	-	-	-	7,8001	7,8001	7,8001	7,8001	7,8001

Tabla 23. Tasas de Incidencia por Grupo Etario (GreenLabUC 2011)

Valores Unitarios por Casos Evitados

Tipo de Efecto	Efecto	Valores Unitarios por Casos Evitados por Grupo Etario								
		0-1	1-4	5-12	13-17	18-29	30-44	45-64	65-74	75+
Mortalidad	Respiratoria corto plazo	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351
	Cardiopulmonar largo plazo	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351
	Todas las causas largo plazo	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351	15.351
Admisiones	Asma	26	26	26	26	29	29	29	-	-
	Cardiovascular					58	58	58	58	58
	Respiratorias crónicas					37	37	37	38	38
	Neumonía								41	41
	Bronquitis	26	26	26	26	37	37	37	38	38
	Bronquitis crónica	26	26	26	26	37	37	37	38	38
Visitas Salas de Emergencia	Asma	1,3	1,3	1,3	1,3					
Productividad perdida	Días laborales					0,9	0,9	0,9		
	Días de actividad restringida					0,3	0,3	0,3		
	Días de actividad restringida menor									

Tabla 24. Valores Unitarios por Casos Evitados por Grupo Etario (MMA 2015)

