CENTRO DE ENERGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

Dirección: Plaza Ercilla 847, Santiago

Contacto: Myriam Reyes
Email: mreyes@centroenergia.cl
Fono: +56 2 29780967

# Estudio de actualización y complementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo asociadas a la demanda energética

Informe final

Noviembre de 2019

**Preparado para:**

**Comisión Nacional de Energía**

Centro de Energía
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

Equipo de trabajo: Carlos Benavides, Manuel Díaz, Sebastián Gwinner, Juan Pablo San Martín, Andrés Ulloa.

Noviembre 2019, Santiago, Chile.

# Contenido

1 Introducción ..... 17
1.1 Objetivos ..... 18
1.1.1 Objetivo general ..... 18
1.1.2 Objetivos específicos ..... 18
2 Revisión de metodologías y estado del arte ..... 19
2.1 Marco teórico respecto a las herramientas de proyección de demanda ..... 19
2.2 Descripción de metodologías de proyección de demanda “top down” y “bottom up” ..... 24
2.3 Analizar experiencias internacionales ..... 31
2.3.1 Revisión de experiencias internacionales reportadas en revistas científicas ..... 32
2.3.2 DECC 2050 Energy Calculator ..... 32
2.3.3 MAPS Programme ..... 34
2.3.4 Reportes bienales ..... 35
2.3.5 Descripción detallada de experiencias internacionales ..... 42
2.4 Desarrollar en forma detallada la metodología de proyección “bottom up” ..... 78
3 Actualización de modelo ..... 80
3.1 Revisión de resultados de estudio previo ..... 80
3.1.1 Sector transporte ..... 81
3.1.2 Sector residencial ..... 89
3.1.3 Sector público ..... 96
3.1.4 Sector comercial ..... 98
3.1.5 Sector industria y minería ..... 100
3.2 Actualización de modelo transporte ..... 105
3.2.1 Metodología de cálculo de demanda de transporte caminero ..... 105
3.2.2 Actualización de demanda de transporte aéreo nacional ..... 111
3.2.3 Actualización de carga ferroviaria ..... 113
3.2.4 Actualización de la demanda por carga marítima cabotaje ..... 114
3.2.5 Incorporación de otros medios de transportes tales como motocicletas ..... 114
3.2.6 Transporte aéreo y marítimo internacional ..... 115

3.3 Actualización de modelo residencial ..... 117
3.4 Actualización de modelo sector público ..... 121
3.4.1 Actualización general ..... 121
3.4.2 Alumbrado público ..... 122
3.4.3 Edificios públicos ..... 124
3.5 Actualización de modelo sector comercial ..... 126
3.6 Actualización de modelo industria y minería ..... 128
3.6.1 Actualización del sector cobre ..... 128
3.6.2 Actualización otros sectores ..... 135
3.7 Incorporación de las variables de precios y costos en el modelo ..... 151
3.7.1 Revisión de antecedentes previos ..... 151
3.7.2 Propuesta metodológica ..... 153
3.8 Análisis de diversas medidas de eficiencia energética y otras políticas ..... 164
3.8.1 Sector industria y minería ..... 164
3.8.2 Sector transporte ..... 169
3.8.3 Sector CPR ..... 171
3.9 Analizar las posibles variabilidades en los datos de entrada y sus salidas de la herramienta. 176
3.9.1 Análisis determinístico ..... 177
3.9.2 Análisis probabilístico ..... 182
4 Implementación de modelo LEAP ..... 185
5 Implementación de modelo MAED ..... 192
5.1 Características del modelo MAED ..... 193
5.2 Estimación y carga de variables relevantes ..... 195
5.2.1 Variables macroeconómicas ..... 195
5.2.2 Variables demográficas ..... 197
5.2.3 Estimación y carga de variables sector industrial ..... 199
5.2.4 Estimación y carga de variables sector transporte ..... 213
5.2.5 Estimación y carga de variables sector residencial ..... 221
5.2.6 Estimación y carga de variables sector servicios ..... 231
5.3 Principales resultados modelo MAED ..... 236

6 Bibliografía ..... 241
7 Glosario ..... 245
8 Anexos ..... 247
8.1 Indicadores para medir desempeño de modelos de proyección ..... 247
8.2 Información de base para proyecciones de producción del cobre ..... 249

# Resumen Ejecutivo

## Objetivo general y específicos

El objetivo general del estudio es actualizar y complementar un modelo de proyección de demanda energética del largo plazo desarrollado por el Ministerio de Energía en el año 2015. El modelo permite proyectar la demanda energética a nivel nacional y regional para el horizonte 2017-2030. La Comisión Nacional de Energía ha mostrado interés en hacer uso de dicho modelo para las actividades de planificación que esta institución realiza, por cual ha licitado el presente estudio al Centro de Energía de la Universidad de Chile.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

- Elaborar un marco teórico general respecto a las modelaciones y herramientas utilizadas en la prospectiva de la demanda energética.
- Actualizar y complementar las herramientas de prospectiva de demanda obtenidas como resultado del estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo" licitado por el Ministerio de Energía.
- Construir modelos de proyección en MAED y LEAP que incluyan una descripción de cada carga junto con una metodología de conversión entre ambos programas, y que consideren propuestas de distintos escenarios de proyección.
- Proponer una metodología que permita actualizar de forma permanente las herramientas de prospectiva de demanda.

## Descripción general del modelo matemático

Durante el desarrollo del estudio se actualizaron los modelos de proyección de demanda del sector transporte, industria y minería, comercial, público y residencial. Las características generales del modelo se describen a continuación:

- Proyección de demanda energética de todos los sectores del Balance Nacional de Energía: industria del cobre, salitre, hierro, papel y celulosa, siderúrgica, petroquímica, cemento, azúcar, pesca, construcción, industria varías, minas varias, transporte terrestre de pasajeros en vehículos privados, transporte terrestre de pasajeros en buses, transporte en taxis y colectivos, transporte en motocicletas, transporte en modos no motorizados, transporte aéreo de pasajeros, transporte, transporte terrestre

de carga, transporte marítimo de carga, transporte ferroviario de pasajeros, transporte ferroviario de carga, comercio (supermercados, malls, hoteles, bancos, clínicas, oficinas, almacenes, bodegas, etc.), público, residencial, refinerías, plantas de regasificación, etc.

- Proyección de demanda para todos los energéticos representados en Balance Nacional de Energía: gas natural, carbón, biomasa, diésel, petróleo combustible, gasolina, kerosene, gas licuado, gasolina de aviación, kerosene de aviación, electricidad, etc.
- Proyección de demanda con resolución temporal anual para el horizonte 2017-2050.
- Proyección de demanda con resolución espacial con desagregación regional.
- Representación de usos finales de la energía por tipo de energético para las distintas industrias: usos térmicos (calderas, hornos), usos motrices y usos eléctricos (iluminación, sala de computadores, etc.).
- Representación de usos finales de la energía por tipo de energético para sector residencial: calefacción, cocción, refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación, enfriamiento, etc.
- Representación de usos finales de la energía para el sector comercial: calefacción, agua caliente sanitaria, enfriamiento, iluminación, etc.
- Representación de usos finales de la energía para el sector público: calefacción, agua caliente sanitaria, enfriamiento, alumbrado público, etc.
- Caracterización de usos finales haciendo uso de la información pública más reciente: Encuesta CDT, caracterización de usos finales del sector industrial obtenido del estudio desarrollado por el Centro de Energía Bien Público de Eficiencia Energética, encuestas Origen-Destino más recientes.
- Representación de distintas tecnologías para distintos modos de transporte: vehículos a gasolina, vehículos diésel, vehículos eléctricos, vehículos híbridos, etc.

Las proyecciones de demanda de energía del sector transporte se realizan a partir de proyecciones de demanda de pasajeros-kilómetros (PKM) para el transporte de pasajeros y de toneladas-kilómetros para el transporte de carga. Las proyecciones de PKM y TKM se proyectan haciendo uso de modelos econométricos. A partir de las proyecciones de PKM y TKM, y supuestos de penetración de distintas tecnologías, rendimientos de vehículos, tasas de ocupación, tasas de carga y particiones modales, se obtiene las proyecciones de demanda de energía del sector transporte.

Las proyecciones de demanda de energía para el sector industria y minería se realizan para los siguiente subsectores: salitre, hierro, papel y celulosa, siderurgia, petroquímica, cemento,

azúcar, pesca, industrias y minas varias. Para cada sector se identifican los principales drivers que describen el comportamiento del sector económico y son proyectados en función de modelos econométricos o proyecciones obtenidas de estudios previos. La demanda se desagrega en tres usos finales: motrices, térmicos y otros consumos eléctricos para representar los principales procesos demandantes de energía. Con esta desagregación y con datos de eficiencias por energéticos se calcula la energía útil de la industria que corresponde a la fracción de la energía demandada que es transformada en la energía necesaria para producir una unidad del bien. En el caso del sector cobre, este tiene como driver el material procesado para cada subproceso modelado (dependiente de ley del cobre, recuperación de material, etc.), con excepción del sector servicios que se calcula respecto a la producción fina. Para el sector cobre se caracteriza el consumo de energía de los siguientes procesos: mina rajo, mina subterránea, concentradora, lixiviación, fundición, refinería, servicios y desalinización.

La proyección del consumo energético del sector residencial se realiza a partir de la proyección del número de viviendas y la caracterización de los usos finales de la energía. Se caracterizan los siguientes usos finales: calefacción, agua caliente sanitaria, cocción y artefactos eléctricos. La metodología proyecta en una primera etapa la cantidad de viviendas y, luego, a partir de estimaciones de consumo unitario de energía para los distintos usos finales y tenencia de equipos por hogar se proyecta el consumo de energía.

La proyección de demanda de energía del sector comercial se realiza a partir de un modelo econométrico que relaciona la demanda de energía con el PIB. También se realizan proyecciones para los subsectores supermercados, malls, clínicas y bancos, a partir de la proyección de stock de estos comercios y estimaciones de consumo unitario.

**Principales actualizaciones**

A continuación se describen las actualizaciones generales realizadas al modelo de proyección de demanda de energía:

- Actualización de proyección de PIB de acuerdo a datos entregadas por Ministerio de Hacienda.
- Actualización de proyección de población a partir de proyecciones actualizadas del INE.

- Actualización del año base. Se ajustan parámetros específicos del modelo a partir de datos del Balance Nacional y Balance Regional de Energía del año 2017. La proyección de demanda de los modelos sectoriales (transporte, industria y minería, comercial, público y residencial) para el año 2017 coincide con los datos del Balance Regional de Energía.
- Modelación de distintas políticas energéticas en los sectores transporte, industria y minería y residencial que actualmente se están analizando en el país (electromovilidad, introducción de energías renovables, eficiencia energética, introducción de nuevos combustibles, etc.). Todas las medidas evaluadas ha sido consideradas en la actualización del compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de Chile (NDC).

Las actualizaciones específicas del sector transporte se sintetizan a continuación:

- Actualización de series históricas de PKM y TKM a partir de las series históricas de demanda de energía disponibles para el periodo 1998-2018. Las matrices de cálculo son auditables y actualizables para los usuarios de este modelo.
- Actualización de modelos econométricos para proyectar los PKM y TKM. Los modelos econométricos incorporan las variables de precio de los combustibles (diésel y gasolina para el modo caminero).
- Inclusión de nuevos modos y tecnologías. La actualización consideró la separación del modo “auto” en “vehículos livianos” y “vehículos medianos” cada uno con sus participaciones tecnológicas y rendimientos. Se realizó la separación del modo bus en “bus Urbano” y “bus Interurbano” para la evaluación de políticas de electromovilidad. Se incorporaron tecnologías de celdas de combustible (hidrógeno) en modos como camión y tractocamión. Se incluye el modo motocicleta en el modelo de transporte de pasajeros.
- Inclusión de modelos de precios. La proyección tecnológica de los modos vehículos livianos, vehículos medianos, bus (urbano), taxis y tractocamión fueron realizadas utilizando criterios de precio.
- Actualización de parámetros regionales, tales como particiones modales, rendimientos y niveles de actividad entre otros, de acuerdo a nueva información disponible.
- Modelación de políticas energéticas. Fueron modeladas medidas de eficiencia energética propias del sector transporte, que en términos generales se remiten a la electromovilidad (tanto en vehículos particulares, buses urbanos y taxis), estándares

de rendimiento (para vehículos livianos, medianos y pesados) e introducción de tecnologías de hidrógeno en el transporte de carga.

**Sector industria y minería**

Las principales actualización del sector industria y minería:

- Para las estimaciones de la industria del cobre, además de considerar la mejor información disponible de COCHILCO al año 2018 y sus proyecciones de producción al año 2029, se ha trabajado con la Dirección de Estudios y Políticas Públicas de esta institución para definir los criterios del mayor largo plazo (año 2050). Los criterios definidos están en la línea de la proyección que se está discutiendo en la actualidad para definir la Política Nacional de Minería 2050.
- Actualización y corrección de metodología de proyección de producciones de hierro, cemento, papel y celulosa.
- Actualización y corrección de modelo de proyección de demanda de energía del sector industria varias  a partir de modelo econométrico.
- Adicionalmente a los datos de producción y consumos de energía, fueron actualizadas las matrices de usos finales de cada sector analizado. Estas matrices se calcularon en el marco del estudio de estimación del potencial de eficiencia energética en sectores productivos desarrollado por el Centro de Energía, estudio en cual se llevó a cabo la primera encuesta de eficiencia energética a nivel nacional, lo que permitió obtener los mejores datos actuales respecto a usos térmico, eléctrico y motriz en el sector.

**Sector residencial**

- Actualización del número de vivienda de acuerdo a datos del CENSO del año 2017.
- Actualización de proyección de número de viviendas de acuerdo a proyecciones actualizadas de PIB y número de viviendas.
- Incorporación de análisis de escenarios para analizar el crecimiento del consumo de energía asociado a calefacción en función de los supuestos de PIB a los cuales se alcanza el confort térmico, índice de GINI y el porcentaje de confort térmico según tipo de energético.

**Sector comercial**

- Actualización de modelo de proyección de demanda energética agregada del sector comercial haciendo uso de modelo econométrico.
- Actualización del número de malls, supermercados, clínicas y hospitales del año base y proyección.

**Sector público**

- Modelación del subsector alumbrado público y edificios públicos.

**Otras actualizaciones realizadas durante el desarrollo del estudio:**

- Corrección de formato de modelos implementados en archivos Excel. Todos los modelos sectoriales tienen el mismo formato y estructura.
- Actualización del modelo LEAP haciendo uso de la versión más actualizada (versión 2018.01.30).
- Actualización de rutina de carga de datos del modelo LEAP desde archivos en Excel. La rutina actualizada permite trabajar con la versión más actualizada del modelo LEAP[1].
- Desarrollo de Panel de Control donde los usuarios pueden definir la combinación de driver (PIB, población, producción de cobre, etc.) y las medidas de mitigación a evaluar y cargar en el modelo LEAP.
- Se incorpora hoja "Datos MAED" en los modelos sectoriales de manera de facilitar la carga de datos a este modelo. De esta forma, se garantiza la coherencia entre los modelos implementados en Excel, LEAP y MAED.

## Implementación del modelo LEAP

Los modelos sectoriales fueron desarrollados en archivos en Excel y, mediante rutinas programadas por el consultor, se pueden cargar los datos en el software LEAP. A modo de ejemplo, en las siguientes figuras muestran la proyección de demanda de energía para los sectores modelados y la proyección de demanda regional.

[1] Versión antigua del modelo solo permitía trabajar con la versión LEAP 2015.

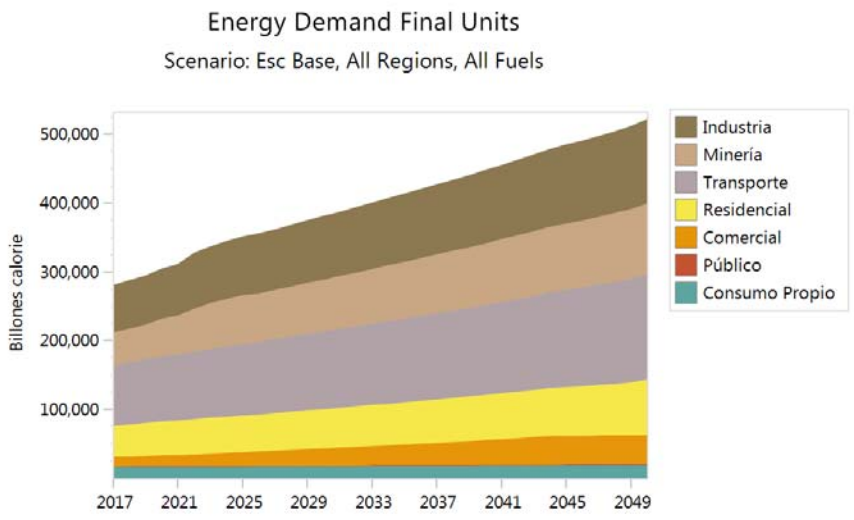



**Figura 1 Proyección en modelo LEAP de la demanda de energía por sector**

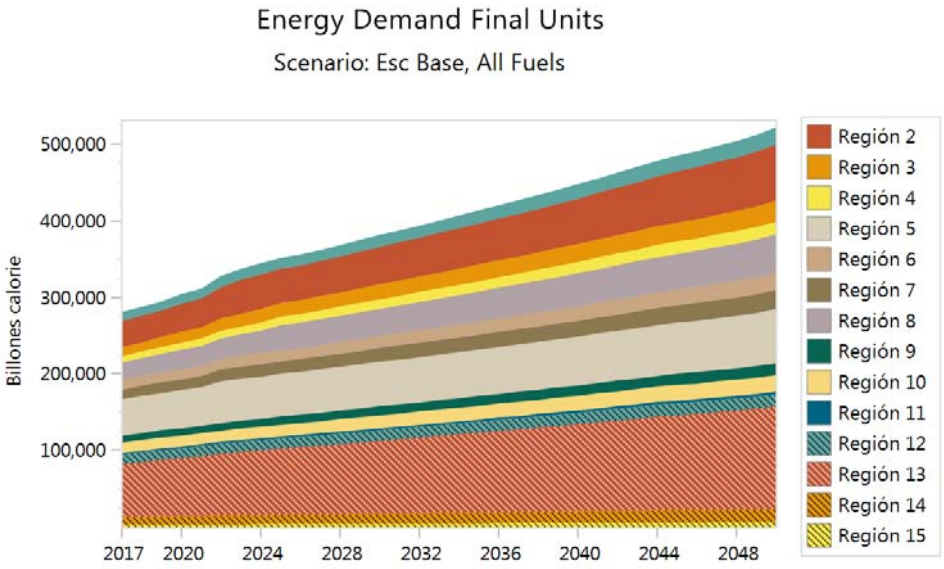



**Figura 2 Proyección en modelo LEAP de la demanda de energía por región**

### Implementación del modelo MAED

Además del modelo LEAP, el consultor también implementó el modelo MAED. El modelo MAED evalúa en el mediano a largo plazo la demanda futura de energía en base a escenarios de desarrollo socioeconómico, tecnológico y demográfico, relacionando sistemáticamente la demanda específica de energía para producir los bienes y servicios identificados en el modelo, con los correspondientes factores sociales, económicos y tecnológicos que afectan dicha demanda. La siguiente figura muestra la interfaz del modelo implementado.

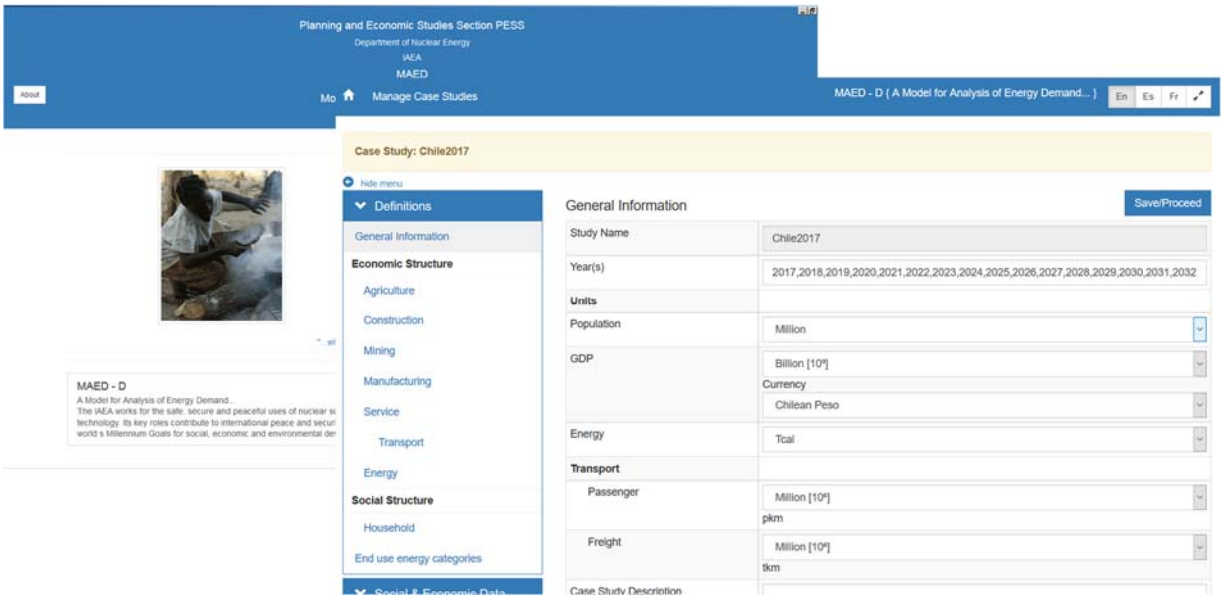



**Figura 3: Implementación de modelo MAED.**

## Desafíos futuros

El modelo de proyección de demanda energética de largo plazo que se ha implementado es intensivo en el uso de datos ya que realiza una representación detallada de los distintos subsectores, se realiza una caracterización de usos finales y las proyecciones tienen una desagregación regional. No obstante, se observa que en Chile no existen bases de datos que mantengan en forma permanente en esta información para caracterizar el stock de distintas tecnologías y la caracterización de usos finales. Por otra parte, el modelo permite e evaluar el

impacto de las distintas políticas energéticas. Una evaluación más detallada de estas políticas requiere información de costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, y costos asociados al uso de combustible, para caracterizar las distintas tecnologías que pueden satisfacer los usos finales de la energía. En el caso de Chile existe poco experiencia en el levantamiento de información de costos asociados a tecnologías del sector transporte, industrial, residencial, comercial y público. A continuación se describen algunas propuestas de mejoras específicas para los distintos sectores.

**Sector transporte**

- El modelo de proyección de demanda considera como principal driver las proyecciones de PKM y TKM. Los datos históricos de PKM y TKM se estiman de manera indirecta a partir de los datos de consumo de gasolina y diésel reportados por la SEC. En Chile no existen estadísticas oficiales de series de PKM y TKM. A nivel internacional se observa que existen estadísticas de series medidas de PKM y TKM, lo cual facilita el desarrollo de modelos de proyección basados en este enfoque.
- Se recomienda en trabajos futuros ahondar en explicar las diferencias entre las estadísticas elaboradas por la SEC (Informe Estadístico) y el Ministerio de Energía (Balance Regional de Energía). Los modelos econométricos fueron estimados a partir de los datos de la SEC debido que son series históricas de varios años.
- Existen pocos datos para caracterizar las particiones modales a nivel regional. Los últimos datos disponibles para algunas regiones son del año 2012 y 2015. Lo anterior dificultad la representación adecuada de la partición modal en transporte privado, público y transporte no motorizado. Por tanto, en estudios futuros se recomienda mejorar la proyección de la partición modal del transporte urbano de pasajeros.
- Desarrollar modelos detallados para los sectores marítimo y aéreo. Modelos que incorporen las tecnologías y capacidades de carga (pasajeros o carga) permitirá la modelación de medidas de eficiencia energética y cambio de combustibles en sectores cuya modelación suele ser simplificada.
- Se requiere un análisis detallado para caracterizar la demanda del sector búnker marítimo. La información disponible no permite desarrollar un modelo de proyección detallado para este sector.

- Se recomienda trabajar en forma conjunta con el Ministerio de Transporte y Ministerio de Obras (MOP) públicas para futuras actualizaciones del sector transporte. A modo de ejemplo, el MOP está trabajando en modelo para proyectar la demanda de infraestructura del sector transporte hacia el 2050.

**Sector industria y minería**

- Las proyecciones de demanda de energía del sector industria y minería dependen principalmente de las proyecciones de producción de cada sector. En este sentido, es importante poder acceder a la mejor información que disponen las empresas o las asociaciones productivas respecto a sus estadísticas productivas o su información prospectiva. En el caso de este estudio se pudo acceder a información que no es pública en los sectores del cobre y el papel y celulosa.
- Una de las variables más importantes en el sector cobre son las leyes de mineral históricas. Si bien se cuenta con información estadística en un periodo bastante largo esta información corresponde sólo a un promedio nacional de la ley de mineral oxidado y sulfurado. Ello complica poder llevar a cabo las estimaciones a nivel regional.
- Como se explica anteriormente, el modelo representa los usos finales de energía (térmico, eléctrico y motriz). Durante el desarrollo del estudio se utilizó la mejor información disponible y opinión experta, no obstante, existe poca información en Chile para una caracterización más detallada, por lo cual se requiere una actualización permanente de este tipo de información. En caso del sector cobre, COCHILCO dispone de la información de encuestas del sector minero (respondida por las propias empresas) que levanta información muy útil para la caracterización más detallada de los procesos mineros y de las distintas faenas. La información de estas encuestas es reservada pero se podría acceder a ella de manera agregada, procesamiento que COCHILCO no ha podido realizar hasta el momento.

**Sector residencial**

- El modelo de proyección de demanda depende principalmente de la proyección del número de viviendas. El modelo de proyección de vivienda es un modelo simplificado que podría ser mejorado en el futuro. En ese sentido, se recomienda trabajar en forma conjunta con el Ministerio de Vivienda y Urbanismo para futuras actualizaciones del sector transporte.

- Se recomienda realizar actualizaciones permanentes de fuentes de información para caracterizar usos finales de la energía del sector residencial: calefacción, agua caliente sanitaria, cocción y artefactos eléctricos.
- Debido a la falta de series históricas de usos finales, existe incertidumbre sobre las proyecciones del crecimiento del confort térmico y la tenencia de equipos por viviendas. En este sentido, se recomienda realizar sensibilidades con respecto a los principales supuestos utilizados.

**Sector comercial y público**

- Se recomienda realizar actualizaciones permanentes de usos finales de la energía para cada subsector del sector comercial y público. Existe poco información para caracterizar el consumo de energía de malls, supermercados, clínicas, bancos, alumbrado público, edificios públicos, etc. Si bien se realizan proyecciones para algunos subsectores, la demanda total está determinada por un modelo top-down.

# 1 Introducción

De acuerdo a lo establecido en el D.L. N° 2.224/1978, la Comisión es la encargada de analizar precios y tarifas de bienes y servicios energéticos, así como de monitorear y proyectar el funcionamiento actual y esperado del sector energético. En particular, la Ley General de Servicios Eléctricos establece que le corresponde a la Comisión entre otras tareas, participar en la elaboración de la Planificación de la Transmisión Eléctrica, en la Fijación de Precios de Nudo, en la Fijación de Precios de Sistemas Medianos y el diseño, coordinación y dirección de licitaciones de energía eléctrica para suministrar a clientes regulados. Para llevar a cabo dichos procesos, es necesario que la Comisión realice previsiones de demanda energética, en particular, de energía eléctrica. Por otro lado, y de acuerdo a lo establecido en la Ley, el Ministerio de Energía debe realizar una planificación energética de largo plazo, en adelante "PELP" y, en dicho proceso, identificar las áreas en donde pueden existir polos de desarrollo de generación eléctrica, en adelante "Polos de Desarrollo", así como también desarrollar las políticas públicas referentes al mercado energético.

Con el fin de dar cumplimiento a las tareas señaladas en el párrafo anterior, así como para la elaboración de procesos tarifarios, la planificación y el desarrollo de políticas públicas, es necesario considerar en los análisis que cada uno de dichos procesos supone, el potencial efecto del nivel de consumo de las distintas fuentes de energía, además de identificar las variables que lo determinan. En particular, se requiere cuantificar dichos efectos para los clientes finales en Chile, y disponer de herramientas que permitan su modelación y obtención de resultados en términos económicos y energéticos.

Este informe corresponde al informe final del estudio de actualización y complementación de herramientas de demanda en un contexto de prospectivas de largo plazo. En el capítulo 2 se realiza una revisión del marco metodológico y análisis de experiencias internacionales. En el capítulo 3 se realiza una revisión del modelo de referencia y se realiza la propuesta de actualización del modelo. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la implementación del modelo LEAP. Por su parte, en el capítulo 5 se presentan los resultados de la implementación del modelo MAED. Este informe está acompañado de documentos anexos donde que incluyen las secciones "Manual de actualización y memoria de cálculo" y "Fuentes de información".

## 1.1 Objetivos

A continuación se enumeran los objetivos generales y específicos del presente estudio, según se desprende de las bases técnicas de la postulación.

### 1.1.1 Objetivo general

El objetivo del estudio es actualizar y complementar las herramientas de prospectivas de demanda desarrolladas en el estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo", licitado por el Ministerio de Energía, de manera que dichas herramientas permitan proyectar la demanda energética con un horizonte de tiempo de, al menos, 30 años.

### 1.1.2 Objetivos específicos

La presente consultoría considera los siguientes objetivos específicos:

1) Elaborar un marco teórico general respecto a las modelaciones y herramientas utilizadas en la prospectiva de la demanda energética.
2) Actualizar y complementar las herramientas de prospectiva de demanda obtenidas como resultado del estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo" licitado por el Ministerio de Energía.
3) Construir modelos de proyección en MAED y LEAP que incluyan una descripción de cada carga junto con una metodología de conversión entre ambos programas, y que consideren propuestas de distintos escenarios de proyección.
4) Proponer una metodología que permita actualizar de forma permanente las herramientas de prospectiva de demanda.

# 2 Revisión de metodologías y estado del arte

## 2.1 Marco teórico respecto a las herramientas de proyección de demanda

Los modelos de proyección de demanda energética tienen como objetivo principal estimar la demanda futura en el corto, mediano y/o largo plazo. El marco conceptual que aquí se presenta está basado principalmente en la caracterización presentada en los siguientes referencias internacionales: (Kuster, Rezgui, & Mourshed, 2017), (Debnath & Mourshed, 2018) y (Suganthi & Samuel, 2012).

El marco teórico considera la caracterización de acuerdo a distintos atributos: objetivo que buscan los modelos, metodologías empleadas, indicadores para medir el desempeño, sectores donde se aplica, horizonte de evaluación, nivel de desagregación temporal, el nivel de desagregación espacial y el nivel de agregación del sistema o sectores que representa. Estas características se describen a continuación.

- Objetivos que buscan los distintos modelos dependiendo de uso esperado.

Los modelos se pueden caracterizar de acuerdo a su uso esperado. Si bien el objetivo de estos modelos es estimar la demanda energética futura, la utilización de los resultados obtenidos se puede enmarcar dentro de análisis muchos más amplios. Por ejemplo, la Comisión Nacional de Energía realiza proyecciones de demanda eléctrica que son utilizadas en los Informes de Precio de Nudo que se elaboran semestralmente.

Algunas de los usos esperados de los modelos de proyección pueden ser los siguientes: Proyección de demanda de electricidad, proyección de demanda de energía, proyección del impacto de energías renovables, proyección de emisiones de gases de efecto invernadero, evaluaciones económicas relacionadas con el sector energía, evaluación de impactos socioeconómicos, proyección de precios de energía y electricidad, planificación y análisis de políticas energéticas y climáticas, análisis de desempeño de políticas implementadas y análisis de modelo de desarrollo.

- Descripción general de las distintas metodologías y modelos matemáticos utilizados

Los modelos se pueden caracterizar de acuerdo a las metodologías empleadas para realizar las proyecciones. En (Debnath & Mourshed, 2018) se propone una clasificación en modelos

estadísticos, modelos basados en inteligencia computacional y modelos de programación matemáticas (aunque para esta última categoría solo se referencia un modelo). A continuación se listan las principales metodologías utilizadas en la literatura internacional de acuerdo a esta clasificación.

Métodos estadísticos

Análisis basados en regresiones, entre los cuales se encuentran las siguientes metodologías: regresiones lineales, regresiones lineales por ajuste de mínimos cuadrados, regresiones no lineales, cointegración y modelos de corrección de errores, regresión logística, nonparametric regression (NR), partial least squares regression (PLSR) y stepwise regression (SR). Los modelos econométricos son modelos de regresión los cuales buscan determinan las variables explicativas de la demanda energética. Las variables explicativas pueden ser el PIB, el ingreso, la población, los precios de los energéticos, etc. Mediante distintos test estadísticos se buscar cuantificar el efecto de los distintos potenciales determinantes de la demanda, utilizando el patrón histórico de comportamiento reflejado en los datos. Para cada variable explicativa se buscar calcular una elasticidad de esta variable con respecto a la demanda energética.

Series de tiempo de una variable: Los modelos de series se basan en analizar la tendencia temporal de los datos para realizar proyecciones futuras. En los modelos de series de tiempo se pueden mencionar las siguientes metodologías: moving average (MA), autoregressive integrated moving average (ARIMA), seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA), autoregressive moving average model with exogenous inputs (ARMAX) y modelos autoregressive moving average (ARMA).

Series de tiempo de más de una variable: Vector autoregression (VAR), Bayesian vector autoregression (BVAR), Multivariate VARIMA, Structural time series model (STSM).

Otras metodologías: Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity (GARCH), Seasonal generalized autoregressive conditional heteroscedasticity (SEGARCH), autoregressive distributed lag (ARDL), log-linear analysis (LA), Geometric progression (GP), etc.

Métodos basados en Inteligencia Computacional

Metodologías del tipo "machine learning": Redes neuronales, support vector machine (SVM), abductory inductive mechanism (AIM), árboles de decision, group method of data handling (GMDH).

Algoritmos metaheurísticos: Algortimos basados en computación evolucionaria tales como algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, optimización por colonias de hormigas, etc.

Modelos de incertidumbres: modelos basados en lógica difusa, grey prediction models.

Otros tipos de metodologías

Además de los tipos de modelos descritos anteriormente y las metodologías basadas en las combinaciones de estas, también existen otros tipos de modelos que se han utilizado para realizadas proyecciones de demanda energética.

Modelos de optimización: Los modelos de optimización tienen como objetivo seleccionar la mejor solución entre un conjunto de alternativas. Este tipo de modelos ha sido utilizado para determinar las tecnologías más costos eficientes para satisfacer los requerimientos de asociados a servicios energéticos. Por ejemplo, para satisfacer la demanda de calor (para calefacción o para un proceso productivo), se desea determinar cuál es la tecnología y el tipo de combustible más económico para satisfacer este crecimiento de la demanda. Un ejemplo de este tipo de modelo de optimización es modelo TIMES (Loulou, Remme, Kanudia, Lehtila, & Goldstein, 2005).

Modelos macroeconómicos: Los modelos macroeconómicos se utilizan para analizar el impacto de distintas políticas en el desarrollo económico del país (impacto del crecimiento de impuestos, schocks de precios internacionales, etc.). Este tipo de modelos representa la estructura económica de cada país y típicamente se representan la interacción de tres grandes bloques: los hogares, las firmas y el gobierno. Estos bloques están interconectados en tres mercados distintos: el mercado del trabajo, el del capital y el de los bienes. Típicamente se calibran este tipo de modelos a partir de datos de la Matriz Insumo Producto o datos de la Matriz de Contabilidad Social. A partir de proyecciones de PIB, es posible determinar los requerimientos de la industria por capital, trabajo y energía. Algunos ejemplos de modelos

macroeconómicos son los modelo de equilibrio general computable (CGE por sus siglas en inglés) y los modelos modelo de equilibrio general dinámico y estocástico (DSGE).

- Validación de los modelos y metodologías utilizadas.

En la literatura internacional se pueden encontrar distintos indicadores para evaluar el desempeño de los distintos modelos de proyecciones. Este tipo de indicadores tiene como objetivo monitorear o comparar el error de proyección de distintos modelos utilizados. A continuación se describen los principales indicadores utilizados (ver Anexo para formulación matemática):

- ✓ Root mean square error (RMSE)
- ✓ Mean absolute error (MAE)
- ✓ Mean absolute percentage forecast error (MAPE),
- ✓ Mean absolute deviation (MAD)
- ✓ Normalized root-mean-square error measure (NRMSE),
- ✓ Standard error of prediction (SEP)
- ✓ Absolute relative error (ARE)

De acuerdo a la experiencia del consultor, este tipo de indicadores no se utilizan para monitorear el desempeño de los modelos de proyección de demanda utilizados a nivel nacional. En este sentido, se recomienda monitorear el desempeño de los modelos de proyección con el objeto de identificar las causas de las desviaciones y las medidas correctivas que se pudieran aplicar para mejorar el desempeño.

La caracterización de los modelos también se puede clasificar de acuerdo a los siguientes atributos:

- Sectores representados

Los modelos de proyección de demanda se pueden utilizar para proyectar la demanda de uno o varios sectores. Típicamente se utilizan para proyectar la demanda de los sectores del Balance Nacional de Energía: industria, minería, residencial, comercial, público, comercial, transporte terrestre de pasajeros, transporte de carga, etc. Otro tipo de desagregación también es posible identificar como la proyección de demanda eléctrica para clientes

regulados y clientes libres que realiza la Comisión Nacional de Energía y el Coordinador Eléctrico Nacional.

- Horizontes temporales de proyección

Las proyecciones de demanda energética se pueden realizar para distintos horizontes de evaluación. Si bien este estudio está concentrado en realizar proyecciones de largo plazo que abarcan varios años (por ejemplo: horizonte 2019-2050), las proyecciones de demanda se pueden realizar para periodos de minutos o horas (por ejemplo, esto podría ser de interés para la operación real de los sistemas eléctricos de potencial) o proyecciones con horizontes de días o semanas (por ejemplo, el Coordinador Eléctrico Nacional requiere de proyecciones de días a una semana para realizar la programación de la operación diaria de las centrales). El horizonte de evaluación típicamente se clasifica en proyecciones de corto, mediano y largo plazo.

- Desagregación espacial

La desagregación espacial de la proyección de la demanda se puede realizar a nivel nacional, regional, comunal e incluso a nivel de subestaciones eléctricas (o “barras” como típicamente se denominan en el sector eléctrico). El nivel de desagregación espacial va a depender del uso esperado del modelo utilizado. Asimismo, el nivel de desagregación espacial va a depender de la información disponible. A modo de ejemplo, la información de las los Balances Regionales de Energía está disponible desde el año 2014. El nivel de desagregación espacial a nivel de subestaciones podría ser de interés para realizar la planificación de las subestaciones primarias o para determinar las capacidades técnicas disponibles de algunas líneas que conectan algunas barras específicas.

- Nivel de agregación

Los modelos también se suelen clasificar en modelos “top down” y “bottom up” dependiendo el nivel de detalle o caracterización del sector en el cual se aplica la metodología. Un modelo “bottom up” o de enfoque “de abajo o hacia arriba” se basa en la construcción de un sistema complejo agregando un conjunto de subcomponentes elementales. Por ejemplo, si quisiéramos proyectar la demanda energética de un hogar, la proyección de demanda de energía se realizaría a partir de la caracterización y proyección de demanda de los equipos de calefacción, calderas, hervidores eléctricos, luminarias, cocina, televisores, etc., es decir, de “abajo hacia arriba”. Por el contrario, los modelos “top down” o de enfoques de arriba hacia

abajo, tienen una representación más simplificada del sector o sistema que se evaluar. Haciendo uso del mismo ejemplo anterior, la proyección de la demanda energética de sistema de calefacción se haría a partir de la demanda energética del hogar y luego haciendo usos de supuestos de participación de la demanda por calefacción se podría estimar la demanda de este tipo de artefactos, es decir, "de arriba hacia abajo". En términos prácticos, el nivel de agregación de una metodología para determinar si es del tipo "bottom up" o "top down" es algo difuso y suele quedar para la interpretación de los investigadores o usuarios del modelo desarrollado.

## 2.2 Descripción de metodologías de proyección de demanda "top down" y "bottom up"

A nivel nacional se han utilizado diversas metodologías para realizar proyecciones de demanda eléctrica o demanda energética en general.

Modelo de proyección demanda eléctrica CNE

La CNE realiza proyecciones de demanda eléctrica desagregando sus proyecciones para clientes libres y clientes regulados. Estas proyecciones son utilizadas en los Infomes de Precio de Nudo de corto plazo que se realizan semestralmente y ejercicios de planificación que esta institución realizada, entre otros estudios. Las proyecciones se realizan a nivel sistémico y a nivel de distribuidoras, luego a partir de estados 2 proyecciones se calcula la demanda de clientes libres. Las proyecciones de demanda eléctrica para cada distribuidora (incluye la demanda de clientes libres y regulados), se realizan a partir de un modelo econométrico. Las variables explicativas utilizadas son: población, PIB y precio del cobre. Los modelos se estiman utilizan las series históricas de PIB regional y población regional. La demanda sistémica se proyecta utilizando un modelo econométrico que considera las mismas variables explicativas.

La proyección se realiza con una resolución temporal anual. A partir de las proyecciones de demanda anual se realiza una modulación mensual utilizando factores de modulación informados por las empresas distribuidoras.

Modelo de proyección demanda eléctrica Coordinador Eléctrico

En el año 2018 el Coordinador Eléctrico realizó un estudio para actualizar su modelo de proyección de demanda eléctrica (Coordinador Eléctrico Nacional, 2018). En dicho estudio se desarrolló un modelo de regresión del tipo panel de los datos tomando en cuenta los datos históricos de retiros en distintas barras y con resolución mensual. Las proyecciones se realizaron para clientes regulados; clientes libres asociados a industrias mineras de cobre y para los otros clientes libres (sin incluir la industria del cobre). Para los clientes regulados se estimaron 4 modelos considerando las siguientes variables explicativas: IMACEC, IMACEC no minero, precio de la energía eléctrica, población y número de viviendas. Para los clientes libres asociados a industria del cobre se estimaron 3 modelos considerando las siguientes variables explicativas: IMACEC minero y producción de cobre. Para los clientes libres no mineros se estimó un modelo econométrico considerando las siguientes variables explicativas: IMACEC no minero y precio de la energía eléctrica. El ajuste y robustez del modelo para clientes libres no mineros fue menor a las estimaciones de los clientes libres de la industria del cobre y clientes regulados. Finalmente, los modelos econométricos fueron comparados con un modelo de serie de tiempo del tipo SARIMA, mostrándose que el modelo panel de datos tenía mejores propiedades econométricas que el modelo SARIMA.

Durante el desarrollo de dicho estudio se detectaron falencias de información cuya mejora permitiría mejores estimaciones de los modelos. Algunos de los problemas detectados fueron los siguientes: 1) Información de clientes regulados no está desagregada por sector (residencial, comercial, industrial). La mejora en la clasificación disponible permitiría integrar dichos resultados con los datos recopilados en el Balance Nacional y Regional de Energía. Asimismo, permitiría explorar variables explicativas propias de cada sector (por ejemplo, a nivel internacional se observa que las variables explicativas del sector residencial pueden ser distintas a las variables explicativas del sector comercial o industrial); 2) Imposibilidad de hacer seguimiento de demanda para algunas empresas de sectores específicos; 3) Información de encuestas de demanda eléctrica se informan (en algunos casos) en barras distintas a las barras de retiros históricos

Un modelo previo desarrollado por el Coordinador Eléctrico Nacional estaba basado en un Modelo de Corrección de Errores (MCE). El MCE consideraba como principales variables explicativas el IMACEC y los costos marginales (utilizado como proxy del precio de la energía

eléctrica). La metodología también consideraba el desarrollo de un modelo econométrico del tipo Modelo Panel para analizar las tendencias internacionales de la demanda eléctrica per cápita y el ingreso per cápita de los distintos países. El modelo panel se utiliza para ajustar las tasas de crecimiento de la demanda en el largo plazo.

Tanto el modelo de la CNE y del Coordinador Eléctrico se podrían clasificar como del tipo "top down". Una de las principales ventajas de este enfoque es que se requiere un número limitado de parámetros (o drives) para realizar proyecciones. Por ejemplo, a partir de proyecciones de PIB, IMACEC, población, PIB per cápita, precio de la energía eléctrica, se realizan proyecciones de demanda energética de largo plazo. Una de las principales desventajas o limitaciones es que se requiere una gran cantidad de muestras para estimar las elasticidades de estos modelos. Si la cantidad de muestras utilizadas es baja la validez estadística de los modelos es limitada.

Otra desventaja de los modelos econométricos es que no permiten representar adecuadamente la proyección de cambios tecnológicos que no se han observado en el pasado (introducción de vehículos eléctricos, introducción de energías renovables a nivel distribución, electrificación de usos finales, etc.). Se espera que la masificación de la generación renovable a nivel distribución, la electromovilidad y electrificación de los usos finales afecte las proyecciones de demanda.

Modelo de proyección de demanda eléctrica COCHICO

El modelo de proyección de demanda energética para la industria del cobre se basa en estimaciones de intensidad energética para cada proceso minero y en proyecciones futuras de producción de cobre. La proyección se realiza para las faenas mineras actualmente en operación, proyectos mineros en etapa de construcción y proyectos de inversión con posibilidades de concretarse durante el horizonte de evaluación a 10 años. COCHILCO calcula los coeficientes de consumo unitario de energía por faena y por procesos en base a datos operacionales provistos por las empresas mineras del país. Las intensidades energéticas por proceso minero han sido estimadas a partir de información proporcionadas en forma confidencial a COCHILCO. Asimismo, las proyecciones de producción de cobre son informadas

de manera reservada por las empresas mineras. La metodología utilizada permite realizar proyecciones de demanda eléctrica por empresas, por barras y a nivel de regional.

La calidad de las proyecciones está directamente relacionada con la capacidad de pronosticar de manera correcta la producción de cobre. La principal desventaja de esta metodología es la dificultad de replicar los resultados por parte de instituciones distintas a COCHILCO, debido a que las intensidades energéticas y las producciones de cobre por empresa no están disponibles en estudios públicos.

Modelo de proyección de demanda energética Ministerio de Energía

El modelo de proyección de demanda energética corresponde al modelo de referencia que será actualizado en este estudio. Se lleva a cabo un análisis que mezcla enfoques "bottom up" y "top down" para proyectar la demanda energética de todos los sectores del Balance de Energía. A diferencia del modelo implementado por el Coordinador y la CNE, este modelo proyecta la demanda para todos los tipos de energéticos y para todos los sectores representados en el Balance de Energía. Los modelos utilizados están basados principalmente en los modelos desarrollados en durante la fase 2 del proyecto MAPS-Chile (MAPS-Chile, 2014). El proyecto MAPS-Chile tenía como objetivo generar evidencia científica de cuáles son las medidas de mitigación más costo-efectivas para la mitigación del cambio climático en Chile. Los resultados de dicho proyecto ayudaron posteriormente a definir el compromiso de Chile presentado en la COP de París 2015.

Una descripción de este modelo será desarrollada con más detalles en la sección 3.2 de este informe. Los modelos "bottom up" tienen como principal ventaja la caracterización más detallada de los distintos usos finales de la energía. Por ejemplo, en el sector industrial se caracterizan los usos finales para calor, fuerza motriz, iluminación, etc. En el sector residencial se caracterizan los usos finales para calefacción, agua caliente sanitaria, cocción, iluminación. A partir de esta caracterización se facilita el análisis del impacto de políticas energéticas y climáticas en el mediano y largo plazo. Una de las desventajas de esta metodología es la gran cantidad de datos que se requiere para realizar esta caracterización y la falta de series históricas. Por ejemplo, en Chile existen pocos estudios para caracterizar los usos finales a nivel residencial, la encuesta Origen-Destino para caracterizar los modelos de transporte se realizan cada 10 años, los estudios para caracterizar los usos finales a nivel industrial son limitados, etc.

La falta de series históricas limita la validez estadística de las proyecciones realizadas con este tipo de modelo.

Modelo energético PMR

Este modelo ha sido desarrollado por el Centro de Energía en el contexto del proyecto PMR (Centro de Energía - Universidad de Chile, 2019). El modelo de optimización tiene como función objetivo minimizar el costo asociado al consumo de energía y la inversión en equipos y nuevas tecnologías, pago por impuesto a las emisiones, entre otras variables. El modelo tiene como objetivo principal modelar el impacto de los instrumentos de precio al carbono como el impuesto a las emisiones o la implementación de un Sistema de Permisos de Emisiones Transables. Adicionalmente, el modelo permite modelar distintas políticas en energéticas. En (Centro de Energía - Universidad de Chile, 2019) se analizó el impacto de las siguientes medidas:

- Impuesto a las emisiones
- Sistema de permisos de emisiones transables
- Introducción de energía renovable en sector generación eléctrica
- Retiro de centrales
- Introducción de energía solar en procesos térmicos
- Uso de hidrógeno en transporte minero y procesos térmicos
- Cambio de combustibles en procesos térmicos por biomasa
- Cambio de combustibles en procesos térmicos por gas natural
- Estándares mínimos de eficiencia energética en motores nuevos
- Estándares de rendimiento mínimo para vehículos nuevos
- Medidas de eficiencia energética en calderas industriales
- Introducción de vehículos eléctricos
- Introducción de energía renovable en distribución

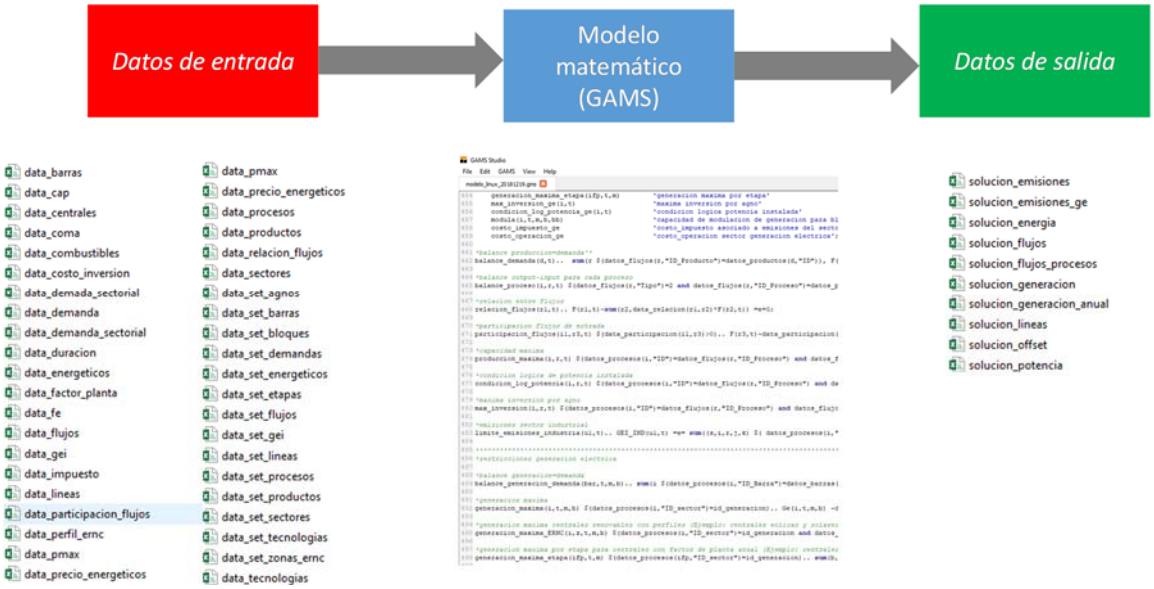
El modelo permite capturar el impacto en la demanda energética debido a, por ejemplo, la baja en los costos de desarrollo de paneles fotovoltaicos instalados en viviendas, la baja en los costos de desarrollo de vehículos eléctricos, el recambio de combustible de calderas industriales, el uso de hidrógeno en la minería, entre otras políticas. El modelo recibe como parámetros de entrada las proyecciones de precios de los combustibles, parámetros para caracterizar las distintas tecnologías (potencia instalada, factor de planta, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento), precio de los combustibles, entre otros parámetros.

La función objetivo del problema de optimización minimiza el costo asociado al consumo de energía, el costo asociado al pago del impuesto y/o a la adquisición de derechos de emisiones, el costo asociado a la inversión en tecnologías y costo de operación y mantenimiento anual. Además, se incluyen en la función objetivo el costo de adquisición de offset en otros sectores. El modelo de optimización está sujeto un conjunto de restricciones tales como: balance entre producción y demanda, relación ente producción y consumo de energía, cotas máximas de producción o generación para cada proceso, potencias máximas factibles de instalar en cada año, límite de emisiones máximas, entre otras restricciones que se describen más adelante.
La función objetivo se muestra en siguiente ecuación. El parámetro $factor_t$ se utiliza para traer a valor presente los costos.

$$Min \sum_{i,t} factor_t \times (c_{oper} + c_{inv} + C_{coma} + c_{impuesto} + c_{offset})$$

Donde $c_{oper}$ es el costo de operación, $c_{inv}$ es el costo de inversión, $C_{coma}$ es el costo de operación y mantenimiento anual, $c_{impuesto}$ es el pago asociado al impuesto y $c_{offset}$ es el pago asociado a la compra de offset.

La siguiente figura muestra la estructura general del modelo. Los datos de entrada al modelo se ingresan en formato CSV siguiendo una estructura de base de datos relacional. Los archivos en formato CSV se pueden editar utilizando Excel, lo cual facilita la manipulación y visualización de estos datos. La formulación del problema de optimización se implementa en lenguaje GAMS. El programa GAMS tiene rutinas especializadas para leer los datos de entrada en formato CSV. Tanto el modelo energético como el modelo macroeconómico están programados en lenguaje GAMS, con el objeto de facilitar la integración entre ambos modelos y facilitar la transparencia de la modelación utilizada. Los datos de salida del modelo de optimización se imprimen en formato CSV.




Los resultados del modelo del pueden visualizar mediante una herramienta de visualización web. La herramienta permite seleccionar distintos escenarios e indicadores (demanda de energía, generación eléctrica, emisiones de gases de efecto invernadero, etc.). La siguiente figura muestra un ejemplo de visualización de los resultados de proyección de demanda de energía.

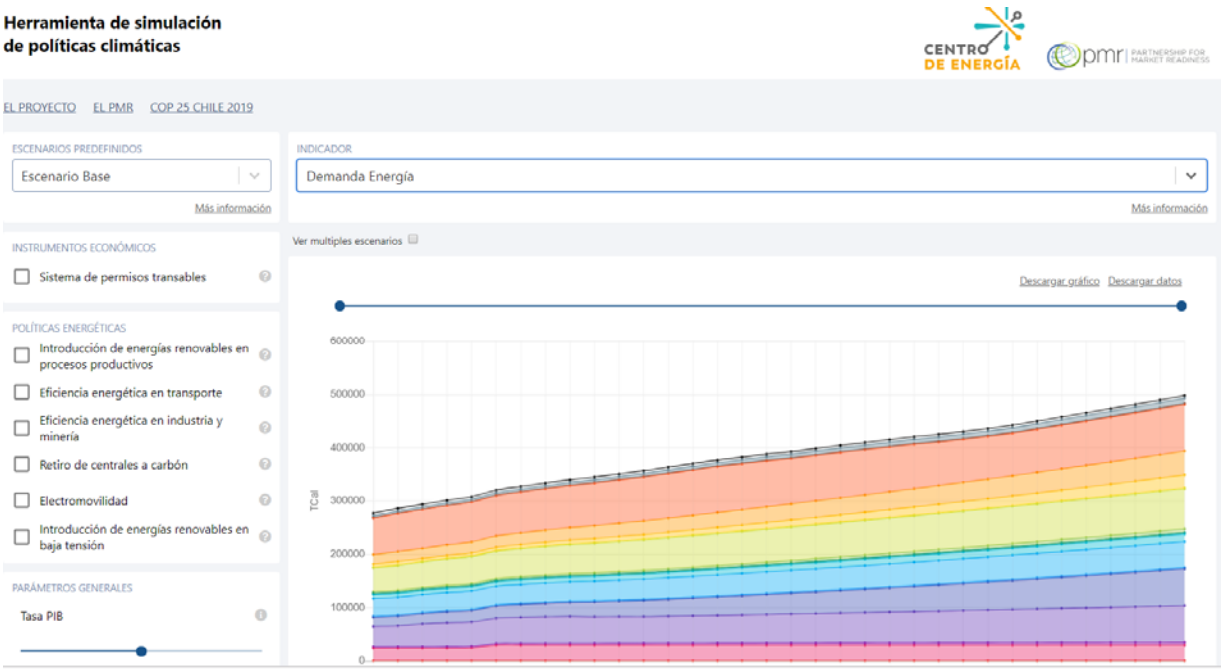



**Figura 4: Ejemplo de herramienta de visualización del modelo PMR. Fuente: Centro de Energía.**

## 2.3 Analizar experiencias internacionales

A continuación se presenta la revisión de experiencias internacionales exitosas en el uso de modelos del tipo “bottom up” que han sido desarrollados en iniciativas previas para proyectar la demanda energética (y oferta de energía si la contraparte técnica lo estima conveniente). La metodología propuesta por consultor consiste en identificar distintas experiencias internacionales en el uso de modelos del tipo “bottom up”. Para identificar dichas experiencias el consultor ha revisado las siguientes fuentes de información: 1) Revisión de experiencias internacionales reportadas en revistas científicas; 2) Revisión de experiencias de países que han implementado la calculadora energética “DECC 2050 Energy Calculator”; 3) Experiencia de países que participaron del programa internacional MAPS-Programme; 4) Revisión de reportes bienales. A partir de un análisis preliminar de estas referencias, se seleccionan las experiencias internacionales a describir detalladamente. A continuación se realiza una descripción de estas experiencias.

### 2.3.1 Revisión de experiencias internacionales reportadas en revistas científicas

Se realizó una revisión de experiencias internacionales reportadas en revistas científicas indexadas a principales journals (Web of Science, ex ISI). Un modelo ampliamente reportado en la literatura internacional corresponde al modelo TIMES. En (Arndt et al. 2016) se reporta el uso del modelo South African TIMES Model (SATIM) para evaluar distintas políticas energéticas. En (Shi, Chen, and Yin 2016) se reporta el modelo energético TIMES para proyectar demanda energética y políticas del sector comercial, público y residencial. En (Tattini, Gargiulo, and Karlsson 2018) se utiliza el modelo TIMES para proyectar la demanda energética del sector transporte. En (Wiese and Baldini 2018) se desarrolla un modelo de optimización propio para modelar el impacto de políticas energéticas en el sector industrial.

En la literatura internacional también se reportan otros modelos. En (Fleiter et al. 2018) se utiliza el modelo FORECAST para analizar políticas de eficiencia energética en el sector industrial (este modelo es utilizado por el gobierno de Alemania, el cual se describe en detalle a continuación). En (Leibowicz et al. 2018) se utiliza el modelo de optimización OSeMOSYS para proyectar demanda energética y análisis de política en el sector residencial. El modelo OSeMOSYS es el modelo de optimización utilizado por el software LEAP. Sin embargo, dicho modelo de optimización se utiliza para representar el sector generación eléctrica y no los sectores de demanda.

### 2.3.2 DECC 2050 Energy Calculator

Se identificaron distintos países que han desarrollado la calculadora energética DECC 2050 Energy Calculator (UK Department of Energy and Climate Change, 2015). Dicha plataforma computacional ha sido utilizada en Reino Unido, Irlanda, Colombia, Brasil, Sudáfrica, México, Indonesia, etc. El modelo permite analizar el impacto de distintas medidas de mitigación con el objeto de reducir la demanda de energía y por ende las emisiones de gases de efecto invernadero. La siguiente figura muestra plataforma web de la versión de la calculadora del Reino Unido. La página principal de esta plataforma muestra una lista de medidas de mitigación sectoriales que se pueden implementar. Los usuarios pueden seleccionar distintos niveles de implementación de la misma medida. El nivel 1 es el nivel de menor impacto en reducción de emisiones, mientras que el nivel 4 es el de mayor impacto. La plataforma muestra

en forma instantánea el impacto en reducción de emisiones de la medida seleccionada por el usuario o el impacto de combinaciones de medidas. La plataforma también muestra en forma gráfica otros salidas como la proyección de demanda y oferta de energía.

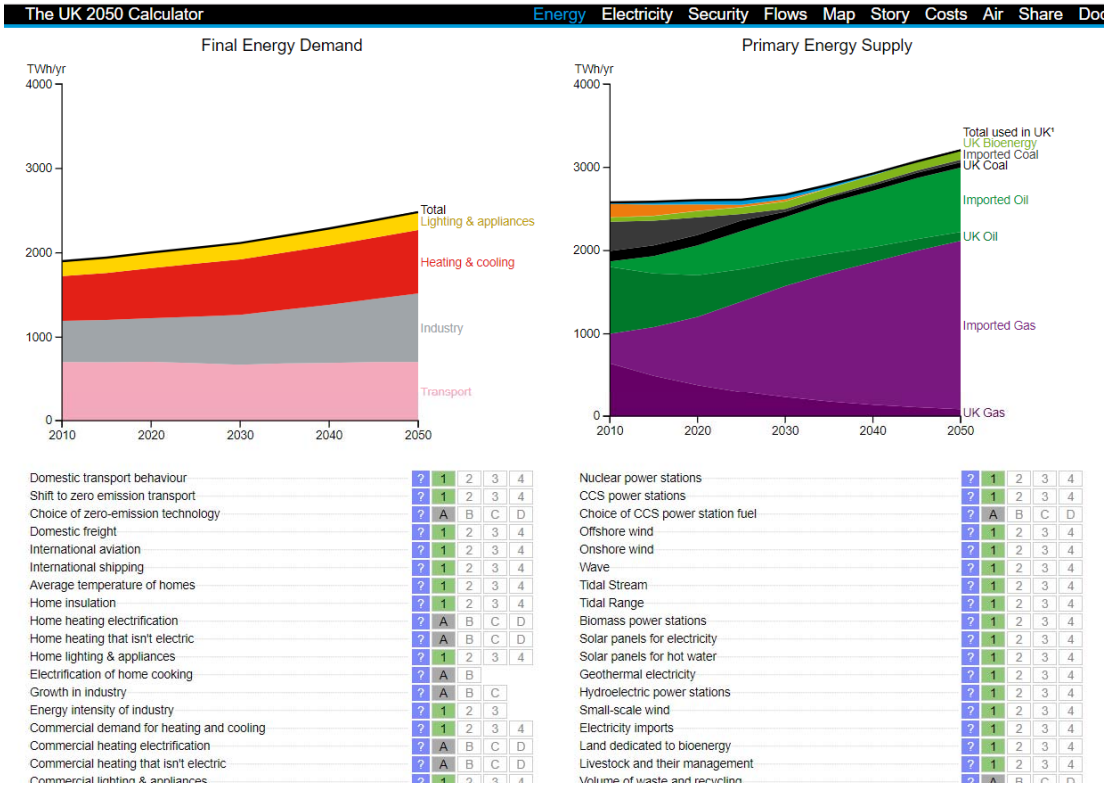



**Figura 5: Plataforma computacional DECC 2050 Energy Calculator. Los usuarios pueden seleccionar distintos niveles de implementación de la misma medida y ver el impacto en la demanda de energía, oferta de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. El nivel 1 es el nivel de menor impacto en reducción de emisiones, mientras que el nivel 4 es el de mayor impacto.**

Desde la plataforma web es posible descargar la versión en Excel en la cual se encuentran más detalles de la metodología implementada. Una de las principales ventajas de esta plataforma es que el acceso abierto a las metodologías implementadas y en la transparencia de los resultados.

En la versión de la calculadora del Reino Unido, la metodología del sector transporte de pasajeros considera como principal driver la proyección de los pasajeros kilómetros (PKM). Luego se aplican supuestos de partición modal por cada modo de transporte (caminata,

automóviles, transporte público, etc.) y supuestos de participación de tecnologías asociadas a cada transporte. A partir de esta información y otros supuestos se calcula la demanda de energía. Las proyecciones de PKM son obtenidas por el Departamento de Transporte del Reino Unido (DfT Transport Statistics Great Britain). En se encuentran publicadas estadísticas de PKM para el periodo 1952-2017 (Department for Transport UK, 2018). Veremos más adelante que este tipo de estadísticas no existen en el caso de Chile, lo cual dificulta la aplicación de este tipo de modelos en Chile. En la versión de Irlanda, la metodología para el transporte de carga considera como principal driver la proyección de las toneladas kilómetros transportadas (TKM). Los datos de TKM históricos son obtenidos a partir de encuestas (Central Statistics Office, 2019). Veremos también que en el caso de Chile no existen estadísticas de datos de TKM.

En la versión de la calculadora del Reino Unido, la metodología del sector residencial considera como principal driver la proyección del número de hogares. La proyección del número de hogares es realizada por el Ministerio de Viviendas, Comunidades y Gobierno local. En (Ministry of Housing Communities & Local Government, 2016) se pueden encontrar proyecciones del número de viviendas para el horizonte 2014-2039. A partir de estimaciones de consumos unitarios por unidad de vivienda para calefacción, agua caliente sanitaria, refrigeración, etc. se calcula la demanda por energía útil. El modelo supone que la demanda por uso final puede ser satisfecha por distintas tecnologías, para lo cual se tienen datos de eficiencia y costos para distintos tipos de tecnologías. En el caso de Chile, el Ministerio de Vivienda no realiza proyecciones de número de hogares. También veremos que la cantidad de tecnológicas representadas por este modelo es mayor que el número de tecnologías representadas en el modelo de referencia chileno.

### 2.3.3 MAPS Programme

El proyecto MAPS Programme se desarrolló entre 2011 y 2015 y tenía como objetivo analizar distintas medidas de mitigación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional (MAPS-Programme, 2015). Este proyecto se realizó en forma simultánea en

Perú, Brasil, Colombia y Chile, y contó con la asesoría técnica del Energy Research Center de la Universidad de Cape Town (Sudáfrica). Para analizar las medidas se desarrollaron distintos modelos de proyección de demanda y oferta de energía, por lo cual fue necesario desarrollar modelos "bottom up" con una representación detallada de los usos finales de la energía para los distintos sectores del Balance Nacional de Energía.

Es importante destacar que los insumos del proyecto MAPS-Chile fueron utilizados posteriormente para implementar el modelo LEAP del estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo". En (Benavides & Diaz, 2014) se puede encontrar un análisis de los principales problemas y desafíos de los modelos implementados en Chile. Como veremos más adelante en la sección 3.1, varios de estos problemas y desafíos siguen vigentes.

### 2.3.4 Reportes bienales

Los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas contra el Cambio Climático deben reportar cada 2 años el estado de avance y cumplimiento de sus metas de reducción de gases de efecto invernadero. En los reportes bienales se describen los modelos y metodologías para evaluar el impacto de sus políticas de mitigación de largo plazo. Por tratarse de fuentes oficiales de los distintos países, es una fuente rica de información en términos de desarrollo de metodologías y modelos para proyectar demanda de energía en el largo plazo, que podrían servir de referencia para el caso chileno. El consultor ha realizado una pre-selección de aquellos países que cuentan una descripción detallada de sus metodologías y que cuentan con la mayor cantidad de políticas evaluadas.

La siguiente tabla presenta un resumen de los modelos utilizados por distintos países en sus reportes bienales.

**Tabla 1: Resumen de los modelos utilizados por distintos países en sus reportes bienales**

| País | Modelo utilizado | Principales datos de entrada/drivers | Metodología | Resolución temporal | Resolución espacial | Publicación internacional | Disponibilidad información |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alemania | Se reporta el uso del modelo FORECAST. | PIB<br>Precios de energéticos<br>Población<br>Temperatura<br>Producciones industriales.<br>Impuestos, etc.<br>Costos de inversión y operación de distintas tecnologías. | Modelo de simulación, modelo de selección discreta a partir de datos de costos de inversión y operación de distintas tecnologías.<br>Modelo de stocks.<br>Representación de detallada de usos finales. | Anual | Nacional<br>Criterios para desagregación regional | Sí | +++ |
| Canadá | Se reporta el uso del modelo E3MC (Energy, Environment and Economy Model for Canada).<br>E3MC se compone de 2 modelos: El modelo energético Energy 2020 (Systematic | PIB<br>Población<br>Ingreso<br>Precio de combustibles<br>Número de viviendas, m2 de vivienda (residencial), superficie para uso comercial | Modelo de simulación, modelo de selección discreta a partir de datos de costos de inversión y operación de distintas tecnologías. | Anual | Nacional<br>Criterios para desagregación regional | No encontrada | ++ |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Solutions, 2017) y un modelo econométrico. | Producciones industriales (industria y minería) | | | | | |
| Reino Unido | Se reporta el uso del modelo Energy and Emissions Projections (EEP) model suite (DECC energy model) (Gobierno de Reino Unido, 2017).<br><br>El modelo EEP está compuesto a su vez por 3 submodelos: modelo de despacho para el sector generación, modelo para estimar precios y modelo de demanda energética. | PIB<br><br>Población<br><br>Número de hogares<br><br>Temperatura<br><br>Empleo (para sector comercial), etc.<br><br>Precio de combustibles<br><br>Precio al carbono | Modelo bottom up y top down. Uso de modelos econométricos para proyectar la demanda de energía total por sector. Sin embargo, no fue posible encontrar una descripción detallada de estos modelos (Department for Business Energy & Industry Strategy, 2019).<br><br>Participación de cada combustible se estima a partir de regresión logística.<br><br>Niveles de actividad del sector transporte son proyectad por Departamento de transporte (Department of Transport UK, 2018). | Anual | Nacional | No | + |
| Australia | Para el sector transporte se reporta | No especificados en detalles. | Para el sector transporte se utiliza un modelo bottom up con | Anual | No especificada | No | + |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | el uso del modelo Energy Sector Model (ESM).<br><br>Para los otros sectores no se específica el nombre del modelo (Gobierno de Australia, 2017). | Población<br><br>Ingreso<br><br>PKM para el transporte | enfoque de optimización lineal. El modelo considera el precio de los combustibles, costo de inversión de vehículos alternativos y parámetros técnicos de cada vehículo (eficiencia, km recorridos, etc.).<br><br>Para el sector residencial, comercial e industrial se menciona el uso de un modelo mediante el cual las estimaciones de producción y las intensidades de emisiones se utilizan para proyectar la demanda de cada subsector. | | | | |
| Japón | No se especifica el nombre de modelo. Se menciona el uso de 4 tipos de modelos: modelo macroeconómico, modelo para estimar precios de energético, | No especificados en detalles.<br><br>PIB, niveles de actividad de industrias, población, número de hogares, precios. | La demanda de energía se calcula a partir de estimaciones de actividad económica, índices de precios e indicadores de conservación de energía (eficiencia energética de tecnologías, estándares de construcción, etc.). Los niveles de | Anual | No específico | No | + |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | modelo de indicadores de conservación de energía y modelo de generación/demanda energética (Gobierno de Japón, 2017). | | actividad son obtenidos de modelo macroeconómico.<br><br>Se menciona que el modelo ha sido desarrollado por el The Institute of Energy Economics. En (Sugiyama et al., 2019) se menciona el uso de un modelo con una estructura similar al proyecto TIMES. Sin embargo, no es claro si este mismo modelo es utilizado en el reporte bienal. | | | | |
| Suiza | Se reporta el uso del modelo GEMINI-E3 (Lausanne École polytechnique fédérale de, 2019). | No especificados en detalles.<br><br>PIB, población, pasajeros-kilómetros, número de vehículos, precios de la energía. | El modelo GEMINI-E3 es un modelo de equilibrio general computable (CGE).<br><br>Los modelos del tipo CGE generalmente tienen una representación de más simplificada de los usos finales y distintas tecnologías utilizadas en los distintos sectores. | Anual | Nacional/regional | Sí(de Jong, Schroten, Essen, Otten, & Bucci, 2010) | ++ |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sudáfrica | Se reporta el uso del modelo SATIM (Gobierno de Sudáfrica, 2018). | PIB<br>Población<br>Número de hogares<br>Pasajeros kilómetros<br>Precios de los energéticos | El modelo SATIM es la implementación en Sudáfrica del modelo TIMES (Energy Research Centre, 2018).<br>El modelo TIMES tiene un enfoque de optimización para determinar las tecnologías más costo efectivas para satisfacer la demanda. | Anual | Nacional | Sí (Arndt et al., 2016) | ++ |

La siguiente figura resume la lista de países exploradas preliminarmente, previo a realizar un análisis más detallado. A partir del análisis y descripción preliminar, el consultor ha identificado 6 experiencias internacionales que son interesantes de analizar en profundidad: Alemania, Canadá, Reino Unido, California, Sudáfrica y la experiencia general del uso del modelo TIMES. Esta selección ha sido acordada con la contraparte técnica. De estas 6 experiencias, a continuación se describen 4 de ellas en forma detallada, las cuales corresponden a Alemania, Canadá, Inglaterra, Sudáfrica y el uso general del modelo TIMES.

| Revisión de informes bienales |
|---|
| Alemania |
| Canadá |
| Reino Unido |
| Australia |
| Japón |
| Belgica |
| Finlandia |
| Suiza |
| España |

| Otros |
|---|
| California (USA) |

| Revistas internacionales |
|---|
| TIMES (Suecia, Australia, Italia, Paquistán, Dinamarca, China, Japón, USA, Chile, etc.) |
| SATIM (Sudáfrica) |
| MARKAL |
| FORECAST |
| MESSAGE |
| LEAP-OSeMOSYS |

| 2050 UK Calculator |
|---|
| Reino Unido, Irlanda |
| Brasil |
| Colombia |
| México |
| Sudáfrica |
| India |
| Indonesia |

| MAPS Programme |
|---|
| Sudáfrica |
| Brasil |
| Colombia |
| Perú |
| Chile |

**Figura 6: Lista preliminar de países identificados para reportar su experiencia internacional**

### 2.3.5 Descripción detallada de experiencias internacionales

#### 2.3.5.1 Alemania

El reporte bienal de Alemania reporta el uso del modelo Forecast[2] para el sector residencial e industrial (Gobierno de Alemania, 2019) (Fleiter et al., 2018), (Biere, Fleiter, Hirzel, & Sontag, 2014), (Elsland, Bradke, & Wietschel, 2014). Para el sector transporte se reporta el uso del modelo TEMS.

Modelo residencial

Principales driver: Número de hogares, superficie construida por tipo de edificación (m2).

Precio de la energía: Sí considerado.

El modelo sectorial del sector residencial se compone de un módulo para electrodomésticos, módulo para calefacción, suministro de agua caliente y un módulo para el cálculo de la demanda de electricidad por electromovilidad.

El modelo caracteriza los siguientes artefactos según las tecnologías y / o clases de eficiencia en el modelo:

- Grandes electrodomésticos (incluyendo: refrigeradores, congeladores, lavavajillas, lavadoras, secadoras, cocinas)
- Terminales TIC (que incluyen: computadoras de escritorio, pantallas de PC, computadoras portátiles, televisores, decodificadores, módems / enrutadores).
- Pequeños electrodomésticos (que incluyen: máquinas de café, aspiradoras, plancha, tostadora, secador de pelo, microondas, extractor)
- Iluminación
- Acondicionadores de aire.
- Otras aplicaciones eléctricas: esta categoría representa un agregado que incluye todas las aplicaciones eléctricas domésticas que aún no se han considerado en otras áreas.

Para caracterizar las distintas tecnologías se utilizan las siguientes bases de datos:

[2] https://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php

- Edificios y sistemas de calefacción: Buildings Performance Institute Europe (BPIE), IEE project TABULA, IEA Building Energy Efficiency Policies (BEEP), IEE project EPISCOPE, ODYSSEE database, country specific research e.g. for heat pumps
- Aparatos eléctricos: Ecodesign Directive preparatory studies, ODYSSEE database, market research data from GfK

La proyección del inventario de los distintos dispositivos se realiza mediante una función logística. La circulación de stock de nuevos dispositivos se basa en una vida útil del dispositivo y una función de distribución para determinar la probabilidad de falla (distribución normal), a través de la cual se determina el tiempo de finalización de la vida útil de un dispositivo antiguo y el inicio de la vida útil de un dispositivo nuevo.

La proyección de distintas tecnologías se modela a través de un modelo de difusión tecnológica que representa las decisiones de inversión individuales tomadas a lo largo del tiempo. Para todos los tipos de decisiones de inversión, el modelo sigue un enfoque de simulación en lugar de optimización (se argumenta que esta metodología permite representar mejor el comportamiento de la vida real de las empresas y los hogares). La tasa de difusión está directamente relacionada con la rentabilidad de las medidas. Las decisiones de inversión se modelan considerando un modelo de selección discreta, donde los hogares (y compañías) toman decisiones de inversión entre distintas tecnologías para satisfacer la demanda de sus servicios. Para esto se implementa una función del tipo logit. Este enfoque permite que las tecnologías que pueden ser costo efectivas no sean seleccionadas en un 100%, con el objeto de representar la heterogeneidad en las decisiones de los distintos agentes.

La evaluación de rentabilidad considera los siguientes costos:

- Inversiones específicas de equipos teniendo en cuenta los factores de aprendizaje de costes.
- Costos de asociado al consumo de energía de los dispositivos.
- Costos de mantenimiento de los dispositivos teniendo en cuenta los factores de aprendizaje de costos

En (Elsland et al., 2014) es posible encontrar una descripción detallada del modelo del sector residencial asociada a la demanda por calefacción (ver figura siguiente). Las viviendas son clasificadas en 5 categorías según año de construcción (menores a 1960, 1961-1990, 1991-2008, 2009-2020, 2021-2050), 2 tipo de edificaciones (edificaciones para una vivienda y edificaciones para varias familias) y 5 estándares de eficiencia energía. En total, se caracterizan 50 tipos de viviendas.

Por otra parte, se identifican 11 tipos de tecnologías para satisfacer la demanda por calefacción y agua caliente sanitaria. Adicionalmente, se identifican 5 estándares de eficiencia energética para cada tecnología.
La demanda de energía se calcula de la siguiente forma:

$$UED_t = \sum_k s_{k,t} \times f_{k,t} \times (ued_{k,t} + w_k \times c_w \times \Delta T_k)$$

Donde $UED_t$ es la demanda de energía para calefacción y agua caliente sanitaria, $s_{k,t}$ es el número de viviendas del tipo *k* en el año *t*, $ued_{k,t}$ es la intensidad energética asociada a calefacción, $w_k$ es la demanda de energía por m2 para agua caliente, $c_w$ es la capacidad específica y $\Delta T_k$ es la diferencia de temperatura entre el interior y exterior de la vivienda.

El modelo permite representar cambios de tecnologías asociadas al consumo de calefacción. Para cada tecnología *i* se determina la siguiente función de utilidad:

$$U_{i,t} = \beta_{i,0} + \beta_{i,0} \times A_{i,t} + \beta_{i,2} \times FS_{i,j,k,t} + \beta_{i,3} \times S_{i,t} + \beta_{i,4} \times MC_{i,t} + \beta_{i,5} \times EC_{i,t}$$

Donde $U_{i,t}$ son los costos percibidos por el uso de la tecnología i, $A_{i,t}$ es el costo de inversión anualizado, $FS_{i,j,k,t}$ es el costo asociado al cambio de combustible, $S_{i,t}$ corresponde a eventuales subsidios, $MC_{i,t}$ es el costo de operación y mantenimiento y $EC_{i,t}$ es el costo asociado al consumo de energía.

La participación de mercado de cada una de las tecnologías se determina a partir de un modelo de elección discreta de la siguiente forma:

$$\pi_{i,k,t} = \frac{e^{-\frac{\lambda \times U_{i,k,,t}}{U_{MEAN,k,t}}}}{\sum_i e^{-\frac{\lambda \times U_{i,k,,t}}{U_{MEAN,k,t}}}}$$

Donde $\pi_{i,k,t}$ es la participación de mercado de la tecnología i, asociada al tipo de vivienda k en el año t, $\lambda$ es un parámetro de que representa la heterogeneidad del mercado, $U_{MEAN,k,t}$ es la utilidad promedio para un sistema de referencia.

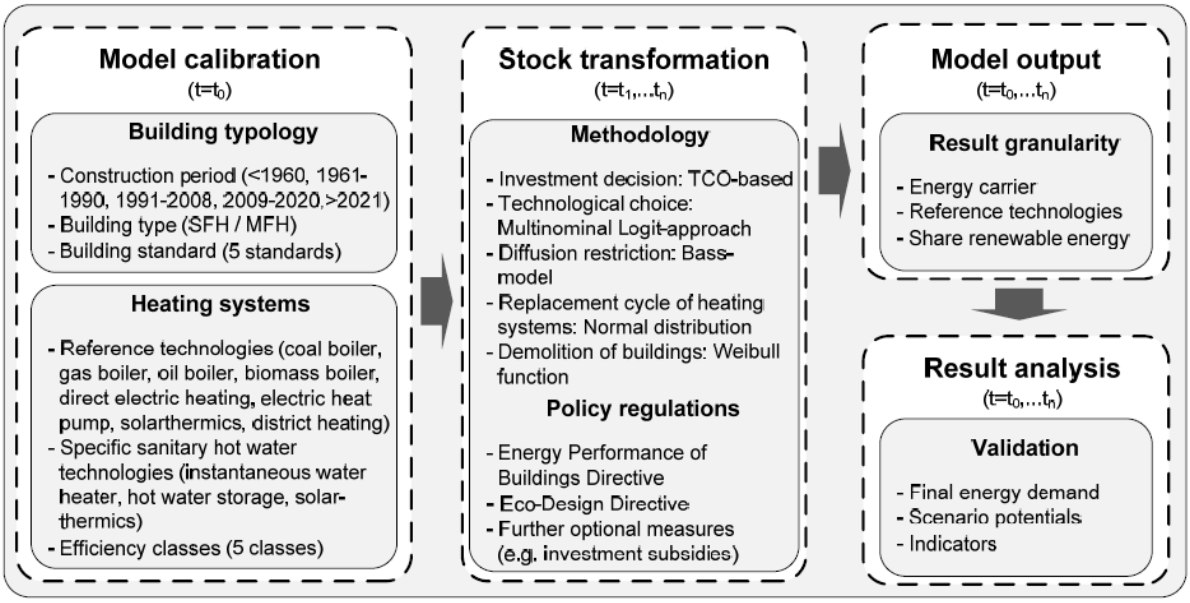



**Figura 7: Metodología del sector residencial (Elsland et al., 2014)**

Análisis

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Base de datos con stock de artefactos
- Gran cantidad de usos finales representados
- Gran cantidad de tipos de viviendas caracterizadas (50).
- Gran cantidad de tecnologías y estándares de eficiencia energética.
- Incorporación de precio de la energía a través de funciones de utilidad para cada tecnología

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Número de viviendas como *driver*
- Caracterización de viviendas según año de construcción (aunque con un menor nivel de desagregación)
- Modelo basado en intensidad de energía por m2 de vivienda.
- No se observa discusión sobre la diferencia entre el consumo teórico y el consumo real de calefacción.

Modelo industria y minería

La industria tiene una estructura jerárquica y divide a la industria en sectores o subsectores económicos a partir de datos de balances de energía. Cada subsector se caracteriza por distintos subprocesos. Los procesos son caracterizados por un consumo de energía específico y niveles actividad.

Se distinguen seis submodelos: 1) modelo macro, 2) modelo para procesos intensivos en energía, 3) modelo de calefacción y refrigeración de espacios, 4) modelo para motores eléctricos e iluminación, 5) modelo de hornos industriales y 6) modelo de generación y distribución de vapor y agua caliente (Fleiter et al., 2018). La siguiente figura muestra la estructura general del modelo del sector industria.

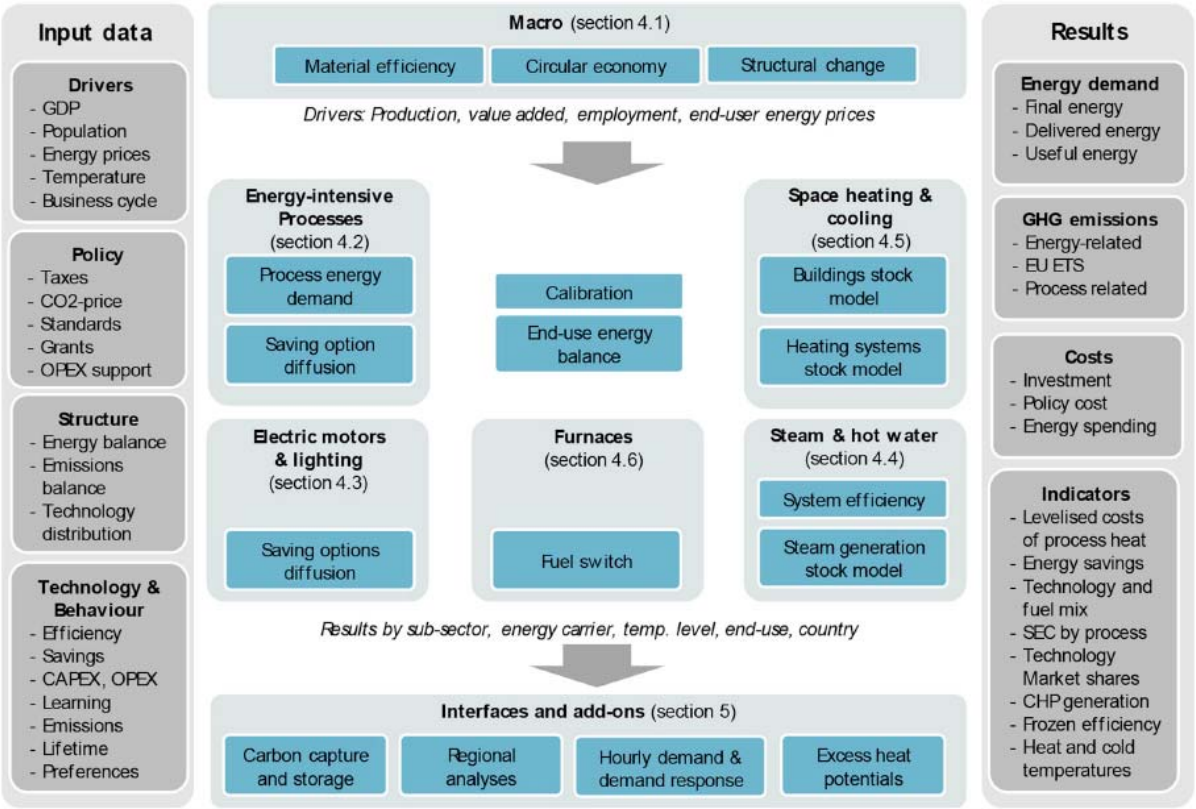



**Figura 8: Modelo FORECAST sector industrial. Fuente: (Fleiter et al., 2018).**

Modelo macro

Del modelo macro se obtienen proyecciones de los parámetros macroeconómicos como el PIB, población, precios de la energía, producción industrial en toneladas por proceso, precios de la energía a usuario final, etc.

Modelo para procesos intensivos en consumo de energía

El modelo para procesos intensivos en energía considera más de 60 procesos industriales (industria del acero, papel y celulosa, etc.). La demanda de energía se calcula de la siguiente forma:

$$E_{p,t} = P_{p,t} \times (I_{t=tini} - \sum_{n=1} M_{n,p,t})$$

Donde $E_{p,t}$ es la demanda de energía del proceso p en el año t, $P_{p,t}$ es la producción, $I_{t=tini}$ es la intensidad energética y $M_{n,p,t}$ corresponden a los ahorros de las distintas medidas implementadas. Alrededor de 200 medidas se han modelado. La introducción de las medidas se representa a través de un modelo difusión tecnológica, representado mediante una curva-S que toma en cuenta la rentabilidad de las medidas.

La curva S se modela mediante un modelo de crecimiento logístico de la siguiente forma:

$$f(PB) = 1 - \frac{N}{1 + \frac{N - f(0)}{f(0)} e^{-PB \times \beta}}$$

Donde *f* es la participación de mercado en función del periodo de retorno; N corresponde a la máxima participación de mercado (1 o 100% es el máximo valor); PB corresponde al periodo de retorno (*payback time* en inglés) de la alternativa tecnológica; *f(0)* es la participación de mercado para PB=0; y β es un coeficiente para caracterizar la curva logística. A mayor periodo de retorno, menor es la participación proyectada, al contrario, a menor periodo de retorno, mayor es la participación de la medida.

Por su parte, el periodo de retorno se calcula de la siguiente forma:

$$PB = \frac{CI}{CE + CPer - CO}$$

Donde *PB* es el periodo de retorno, *CI* es el costo de inversión de la medida, son los ahorros asociados al menor consumo de energía, *CPer* son los ahorros por compra de permisos de emisiones transables (esto aplica a países que tienen Sistema de Permisos de Emisiones Transables) y *CO* es el costo de operación de la medida. La proyección del precio de la energía influye en el periodo de retorno de las distintas medidas.

Modelo de generación y distribución de vapor y agua caliente

Los usos finales asociados a la generación y agua caliente se modelan a través de un modelo de stock (*"vintage stock model"* como define en paper de referencia). Un modelo de stock simula la construcción, demolición y cambios de equipos de generación de calor (Ejemplo: calderas) considerando su años de operación, vida útil, demanda de calor y opciones de recambio tecnológico.
Para cada opción tecnológica se calcula la siguiente ecuación para determinar la probabilidad de elección de una tecnología en particular (modelo de elección discreta) o participación de mercado:

$$\pi_{t,y} = \frac{e^{-\lambda \times U_{t,y}}}{\sum_t e^{-} \times U_{t,y}}$$

Donde $\pi_{t,y}$ es la probabilidad de seleccionar la tecnología $t$ en el año $y$, $U_{t,y}$ es el costo percibido para la tecnología $t$ en el año $y$. La probabilidad de selección de una tecnología depende del costo de cada una de ellas, donde la el costo percibido para cada tecnología se calcula como:

$$U_{t,y} = ASC_t \times (I_{t,y} + OM_{t,y} + E_{t,y} + P_{t,y} + R_{t,y})$$

Donde $U_{t,y}$ son los costos percibidos para cada tecnología t y para cada año y, $I_{t,y}$ es el costo de inversión anualizado, $OM_{t,y}$ son los costos de operación y mantenimiento, $E_{t,y}$ es el costo asociado al uso de la energía, , $P_{t,y}$ son costos asociados a alguna política (ejemplo: subsidios) y $R_{t,y}$ son otros ingresos asociados a la implementación de la medida.

Modelo de calefacción y refrigeración de espacios

El modelo de calefacción y refrigeración de espacios consta de dos submodelos. Un modelo de stock de edificaciones para estimar la cantidad de superficie demandante de energía, y un modelo de stock para determinar las tecnologías que satisfacen la demanda de energía. La siguiente figura describe la estructura general de este submodelo.

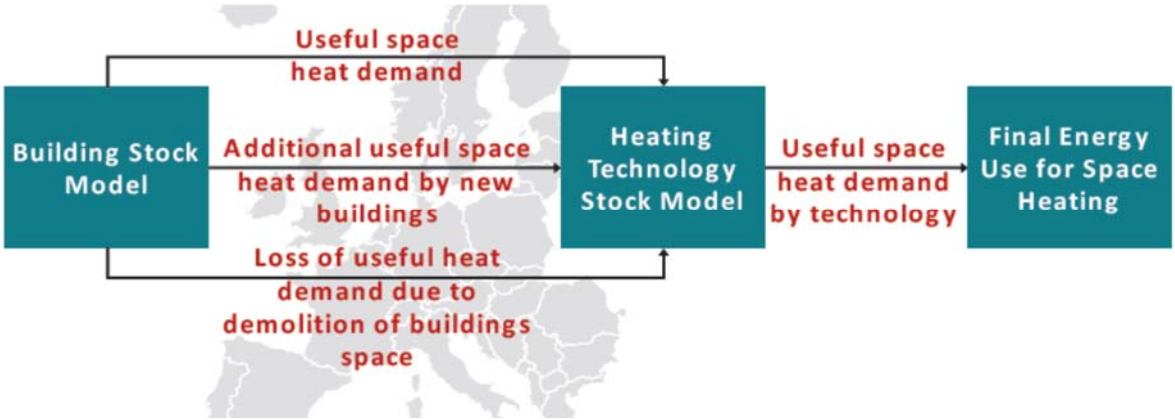



**Figura 9: Modelo calefacción y refrigeración de espacios** (Biere et al., 2014).

El modelo de stock de edificaciones tiene una desagregación por tipo de industria, año de construcción, año de remodelación o acondicionamiento y tipo de edificación. La cantidad de superficie (m2) está indexada a la cantidad de m2 por trabajadores que se requiere para cada industria. Usando distintos tipos de modelos, se calcula la superficie total construida considerando el stock inicial, reacondicionamiento, demolición, reconstrucción.

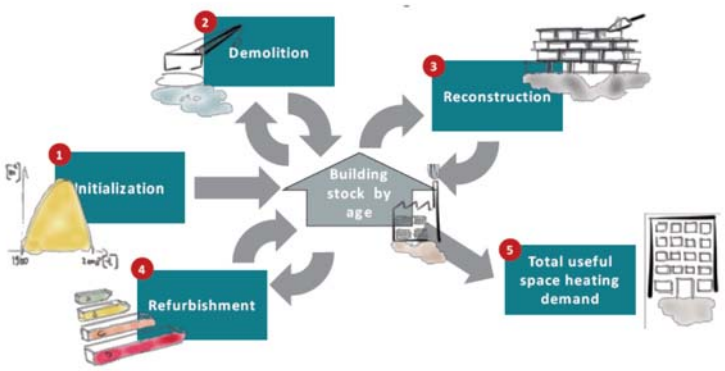



**Figura 10: Modelo de stock de edificaciones** (Biere et al., 2014).

El modelo de stock para determinar las tecnologías que satisfacen la demanda de energía es similar al modelo de generación y distribución de vapor y agua caliente.

Análisis

Principales diferencias con respecto a modelo implementado en Chile:

- Cantidad de procesos industriales representados (más de 60 solo para industrias intensivas en uso de energía)
- Cantidad de medidas de mitigación modeladas (más de 200 medidas de mitigación solo para procesos industriales intensivos en uso de energía)
- Introducción de precios de la energía para simular cambios tecnológicos. El precio de la energía no influye directamente en los niveles de producción (este efecto debería estar incluido en el modelo macro).
- Modelo de stock que considera edad, vida útil, reacondicionamiento, etc. para distintos equipos e instalaciones.

Principales similitudes con respecto a modelo implementado en Chile:

- Modelo de intensidad para procesos industriales (E=I x P)
- Se consideran proyecciones de producciones industriales
- La caracterización de subprocesos sería equivalente a la representación de usos finales. Sin embargo, se identifica un mayor nivel de desagregación.

Modelo transporte

A diferencia de los modelos del sector industria y minería y sector residencia, el modelo de transporte no se encuentra descrito detalladamente. La demanda de energía del sector transporte se realiza utilizando el modelo TEMPS. Usando parámetros de movilidad (número de viajes, distancias de viaje, división modal del transporte de pasajeros y carga, y distancias de transporte), se analiza el impacto de distintas políticas. El modelo consta de tres componentes: 1) demanda de transporte; 2) inventario de vehículos (incluida la base de datos de tecnología); y 3) balance de energía y gases de efecto invernadero. Una estructura similar la posee el modelo TREMOVO, el cual es utilizado por distintos países de la Unión Europea. La siguiente figura muestra la estructura general del modelo.

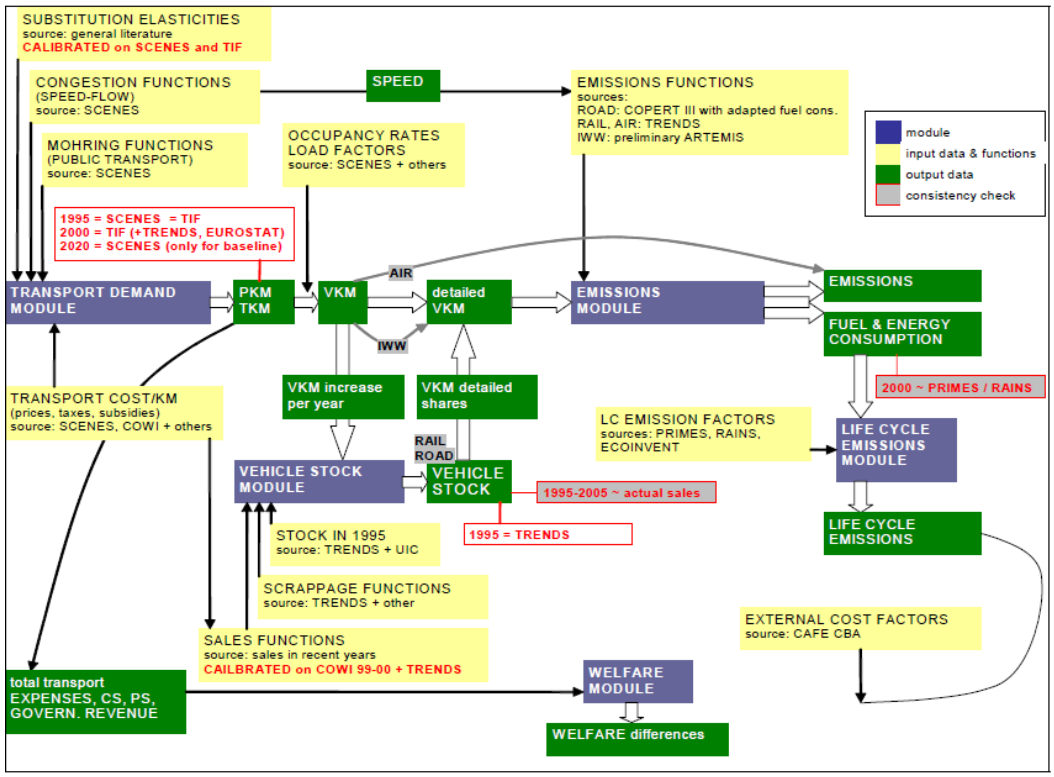



**Figura 11: Modelo TREMOVE[3]**

El módulo para el inventario de vehículos se utiliza para mapear la tecnología y el desarrollo de la eficiencia de los modos de transporte, considerando automóviles, camiones y autobuses con un nivel de detalle a nivel de vehículo (basado en varias categorías).

El módulo de balance de energía y gases de efecto invernadero calcula el consumo final de energía para el sector del transporte, que es necesario para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando el consumo de energía específico de los modos de transporte en etapas anuales.

Para estimar el efecto de las medidas en el módulo de demanda de transporte, las elasticidades de precios/demanda se toman desde referencias bibliográficas de estudios previos. Para el transporte privado motorizado se considera una elasticidad precio de -0.3 y una elasticidad de precio cruzado para el transporte público de 0.13 (Hautzinger et al., 2004). Para el transporte de carga las elasticidades también son obtenidas de estudio previo (de Jong et al., 2010). En dicho estudios se estima una elasticidad precio/demanda de -0.3 y una elasticidad precio/TKM de -0.1.

[3] https://www.tmleuven.be/en/navigation/TREMOVE

De acuerdo a lo planteado en el reporte de proyección, el kilometraje del automóvil en Alemania no se registra estadísticamente de manera exhaustiva y, por lo tanto, está sujeto a incertidumbre.

Análisis

La metodología documentada para el sector transporte no es muy detallada. Sin embargo, se desprenden las siguientes diferencias con respecto a modelos implementados en Chile:

- Utilización de elasticidades precio/combustible para estimar el efecto sobre la demanda de transporte de pasajeros (PKM) y transporte de carga (TKM). No obstante, estas elasticidades son obtenidas de estudios previos.
- Base de datos detallada caracterizar distintas categorías de vehículos.

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- El módulo de proyección demanda de transporte considera la proyección de PKM y TKM (aunque no fue posible identificar la metodología utilizada para su proyección)
- Caracterización de distintos tipos de tecnologías de transporte.

#### 2.3.5.2 Canadá

El reporte bienal de Canadá reporta el uso del modelo Energy, Environment and Economy Model for Canada (E3MC) (Gobierno de Canadá, 2017). Este modelo se compone de 2 sub-modelos: El modelo energético ENERGY 2020 y un modelo econométrico desarrollado por los mismos investigadores de Canadá (Systematic Solutions, 2017). El modelo ENERGY 2020 se describe a continuación.

ENERGY 2020 utiliza el mismo enfoque metodológico para los sectores residencial, comercial, industrial y transporte. ENERGY 2020 mantiene un registro del stock, retiros, reacondicionamientos, y estimación de nuevos equipos dentro del horizonte de evaluación del modelo. El modelo considera metodologías de elección del consumidor (utilizando regresiones logísticas multinomiales) para simular cómo los consumidores toman decisiones sobre compras de nuevas tecnologías para satisfacer sus necesidades energéticas. La estructura general del modelo se muestra en la siguiente figura.

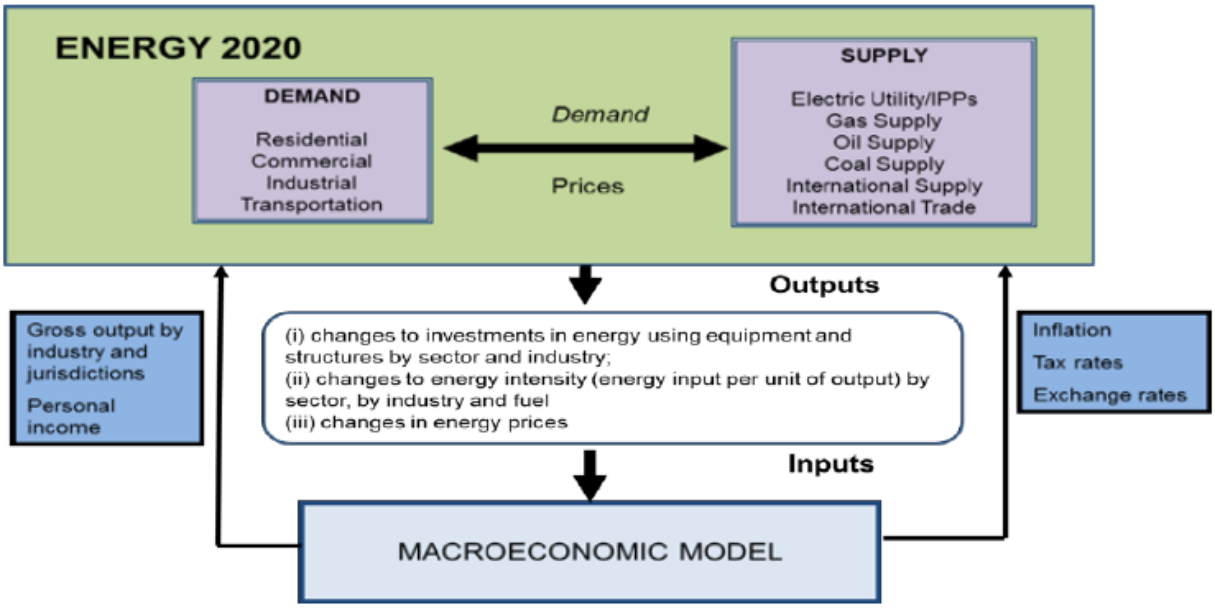



Figura 12: Estructura general del modelo E3MC

Del modelo macro se obtienen proyecciones de los parámetros macroeconómicos como el PIB, población, precios de la energía, producción industrial en toneladas por proceso, precios de la

energía a usuario final, etc. Estos datos son utilizados como datos de entrada o drivers para calcular la demanda por servicios energéticos de los distintos sectores representados.

El cálculo de la demanda de energía se realiza considerando 3 módulos: Production capacity, Device Energy Requirements y Process Energy requirements. A continuación, se describen las principales características de estos módulos. La siguiente figura muestra el esquema general de simulación.

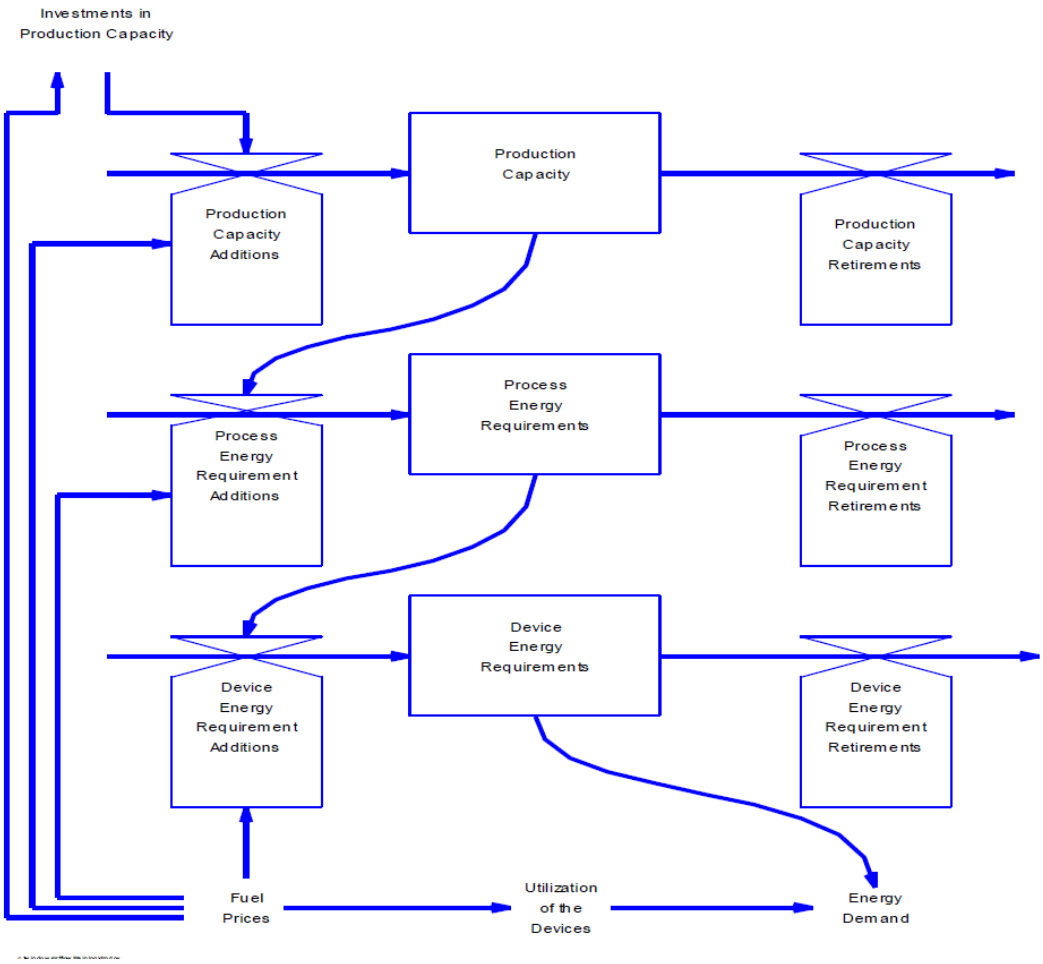



**Figura 13: Metodología de cálculo de la demanda de energía**

Módulo "Production capacity": Representa el stock de equipos necesarios para satisfacer la demanda. El modelo considera el stock existente, el reacondicionamiento, la entrada en operación de nuevos equipos y el retiro de equipos. En este módulo se estima la cantidad

electrodomésticos, equipos de calefacción, aire acondicionado, calentadores de agua, secadoras de ropa, refrigeradores, etc., necesarios para satisfacer la demanda de energía.

Módulo "Process Energy requirements": En este módulo se estiman necesidades de usos finales de la energía (o demanda por usos finales de la energía). Por ejemplo, para una vivienda puede representar la demanda por agua caliente sanitaria, la demanda de calefacción. Para el caso de una industria puede representar la demanda de calor para una industria.

Módulo Device Energy Requirements: En este módulo se calculan los requerimientos de energía corresponden a la energía requerida para hacer funcionar los electrodomésticos, equipos de calefacción, aire acondicionado, calentadores de agua, secadoras de ropa, refrigeradores, etc. La utilización de los dispositivos está relacionada con el comportamiento de las personas y operación de las industrias. La demanda de energía por equipo se expresa con resolución anual. Por ejemplo, un refrigerador consume 5 TBTU/año.

El modelo considera el impacto del precio de los combustibles en la demanda de energía. Por ejemplo, para la calefacción de agua caliente eléctrica residencial, si el precio de la electricidad aumenta, el modelo representa restricciones presupuestarias de los hogares haciendo que se utilice menos agua caliente. También se modela el cambio de combustible. Siguiendo con el ejemplo anterior, si los consumidores tienen tiempo para ajustar y reemplazar los electrodomésticos, se puede comprar un calentador a gas en lugar de un calentador eléctrico.

La selección del tipo de combustible depende de los precios relativos de estos. A medida que el precio de un combustible aumenta en relación con otro, habrá un cambio gradual hacia el combustible más barato basado en las percepciones de los precios relativos de los consumidores (a menudo hechas con información imperfecta), así como la influencia de factores no relacionados con el precio. La curva resultante por estas decisiones se asemeja a la curva S, como se muestra en la siguiente figura. Los costos relativos de cada opción de combustible, combinado con factores de preferencia de consumo no relacionados con el precio de los combustibles, se incorporan dentro de una función logística multinomial para calcular las cuotas de mercado de los combustibles.

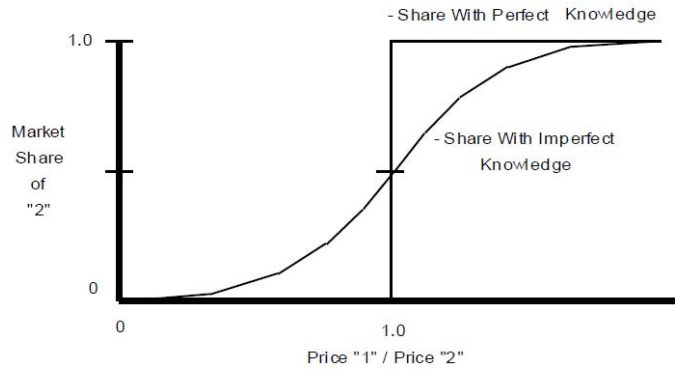



**Figura 14: Participación de mercado en función del precio de los combustibles**

Modelo residencial

Principales driver: Número de viviendas, expresadas en m2 de superficie.

Precio de la energía: Sí, de la forma descrita anteriormente.

El modelo residencial es un modelo bottom up con las siguientes características:

- Tres tipos de vivienda
- Siete usos finales (calefacción de espacios, calefacción de agua, otros sustituibles, refrigeración, iluminación, aire acondicionado, otros no sustituibles)
- Nueve tipos de tecnología (eléctrica, gas, carbón, petróleo, biomasa, solar, GLP, vapor, geotérmica)

Análisis

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Modelo de stock (representación detallada del inventario de viviendas)
- Utilización de modelo de elección discreta para la selección de la tecnología a utilizar (o tipo de combustible).

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Viviendas como driver
- Número reducido de viviendas representadas
- Número acotado de usos finales
- Caracterización de distintos tipos de tecnologías.

Modelo comercial

Principales driver: Superficie construida, expresadas en m2 de superficie.

El modelo Energy 2020 caracteriza 12 tipos de comercios. La siguiente tabla muestra los subsectores representados.

**Tabla 2: Tipos de comercios representados en modelo Energy 2020.**

| Commercial | |
|---|---|
| Wholesale Trade | Floor Space |
| Retail Trade | Floor Space |
| Warehousing and Storage | Floor Space |
| Info. and Cultural Industries | Floor Space |
| Offices | Floor Space |
| Educational Services | Floor Space |
| Health Care & Social Assist. | Floor Space |
| Arts, Accom., Food, Other | Floor Space |
| Natural Gas Distribution | NG Demand |
| Oil Pipelines | National Oil Production |
| Natural Gas Pipelines | NG Demand<br>Local Gas Prod. (BC, AB) |
| Street Lighting | GRP |

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Mayor desagregación para los distintos tipos de comercio.
- Uso de superficie construida como driver, mientras que el modelo implementado en Chile utiliza el número de establecimientos.
- Utilización de modelo de elección discreta para la selección de la tecnología a utilizar (o tipo de combustible).

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Equivalencia en algunos tipos de establecimientos comerciales

Modelo industria y minería

Principales driver: PIB, producción de combustibles para industriales asociadas al sector combustible.

Se caracterizan más de 20 tipos de industrias. La siguiente figura muestra los subsectores representados y los drivers asociados al crecimiento de la industria.

**Tabla 3: Tipos de industrias representadas en modelo Energy 2020 y driver que explica su crecimiento.**

| Industrial | |
|---|---|
| Food & Tobacco | Gross Output |
| Textiles | Gross Output |
| Apparel | Gross Output |
| Lumber | Gross Output |
| Furniture | Gross Output |
| Pulp and Paper Mills | Gross Output |
| Converted Paper | Gross Output |
| Printing | Gross Output |
| Petrochemicals | Gross Output |
| Industrial Gas | Gross Output |
| Other Chemicals | Gross Output |
| Fertilizer | Gross Output |
| Petroleum Products | National RPP Production |
| Rubber | Gross Output |
| Leather | Gross Output |
| Cement | Gross Output |
| Glass | Gross Output |
| Lime & Gypsum | Gross Output |
| Other Non-Metallic | Gross Output |
| Iron & Steel | Gross Output |
| Aluminum | Gross Output |
| Other Nonferrous Metal | Gross Output |
| Fabricated Metals | Gross Output |
| Machines | Gross Output |

| Industrial | |
|---|---|
| Computers | Gross Output |
| Electric Equipment | Gross Output |
| Transport Equipment | Gross Output |
| Other Manufacturing | Gross Output |
| Iron Ore Mining | Gross Output |
| Other Metal Mining | Gross Output |
| Non-Metal Mining | Gross Output |
| Light Oil Mining | Local Oil Production |
| Heavy Oil Mining | Local Oil Production |
| Frontier Oil Mining | Local Oil Production |
| Primary Oil Sands | Local Oil Production |
| SAGD Oil Sands | Local Oil Production |
| CSS Oil Sands | Local Oil Production |
| Oil Sands Mining | Local Oil Production |
| Oil Sands Upgraders | Local Oil Production |
| Conventional Gas Production | Local NG Production |
| Sweet Gas Processing | Local NG Production |
| Unconventional Gas Production | Local NG Production |
| Sour Gas Processing | Local NG Production |
| LNG Production | Local LNG Production |
| Coal Mining | Gross Output |
| Construction | Gross Output |
| Forestry | Gross Output |

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Mayor desagregación para los distintos tipos de industria
- El PIB se utiliza como driver para la mayoría de los sectores industriales. Mientras que en modelo chileno se utilizan las producciones industriales por sector en la mayoría de los casos.

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Equivalencia en algunos tipos de establecimientos comerciales

Modelo transporte

Principales driver: Población, PIB regional, ingresos.

La siguiente tabla muestra los subsectores representados en el modelo Energy 2020 y los driver que explican el crecimiento de estos.

**Tabla 4: Subsectores del sector transporte y driver asociados.**

| **Transportation** | |
|---|---|
| Passenger | Population |
| Freight | GRP |
| Air Passenger | Personal Income |
| Air Freight | GRP |
| Foreign Passenger | GRP |
| Foreign Freight | GRP |
| Residential Off-Road | GRP |
| Commercial Off-Road | GRP |

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Transporte de pasajeros solo depende de la población

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Similar desagregación en transporte de pasajeros y transporte de carga

#### 2.3.5.3 Experiencia modelo TIMES

El software TIMES es un modelo energético que permite realizar representaciones detalladas de los distintos sectores energéticos. La metodología utilizada corresponde a un modelo de optimización lineal que minimiza los costos de inversión en nuevas tecnologías, los costos de operación y mantenimiento anual, los costos operación asociados al consumo de energía y otras componentes de costos asociadas a la implementación de políticas energéticas (ejemplo: impuesto a las emisiones). El modelo permite representar todos los sectores energéticos incluidos en los Balances Nacionales de Energía: transporte, residencial, industria y minería, generación eléctrica, etc.). El modelo está sujeto un conjunto de restricciones para representar la operación de los distintos sectores.

La siguiente figura muestra la estructura general del modelo TIMES. Las líneas horizontales representan los flujos de entrada y salida de cada proceso, mientras que las líneas verticales representan los distintos tipos de "comodities" (combustibles o tipos de demanda). Por ejemplo, el sector residencial tiene representado los distintos usos finales de la energía y las distintas tecnologías que se pueden utilizar para satisfacer la demanda de energía. La demanda por calefacción puede ser satisfecha por artefactos a gas, kerosene, eléctricos, etc. Al modelo se le ingresan de manera exógena la demanda por servicios energéticos ("energy demands services"). A partir de estas proyecciones de demanda, el modelo optimiza y determina cuáles son las tecnologías más costo efectivas para satisfacer dicha demanda (teniendo en cuenta los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, precios de los combustibles, etc.).

El modelo integra en los sectores transformadores o suministradores de energía (centrales de generación eléctrica, plantas de refinería, etc.) con los sectores demandantes de energía. En la figura se aprecia como la planta de refinería recibe como flujo de entrada el petróleo crudo y los flujos de salida corresponden a los productos refinados (diésel y gasolina). La gasolina luego entra como flujo de entrada a las tecnologías que utilizan este tipo de combustible en el sector transporte, por su parte el diésel entra como flujo de entrada a los procesos del sector residencial, industrial y transporte. De manera análoga, en el sector generación eléctrica se representan los distintos tipos de tecnologías de centrales (carbón, gas natural, eólica, etc.). Para cada proceso entra como flujo de entrada el energético primario y como flujo de salida se obtiene la electricidad. Posteriormente la electricidad es un flujo de entrada para las tecnologías de este tipo del sector residencial, comercial, industrial, etc. El modelo TIMES representa restricciones para mantener los balances entre los flujos de entrada y salida de cada proceso. Asimismo, representa restricciones de flujos máximos de salida (asociados a la

capacidad instalada) de manera de limitar los flujos de salida de cada proceso. En caso que no exista capacidad instalada, el modelo deberá optimizar la expansión de capacidad para satisfacer la demanda de los servicios energéticos.

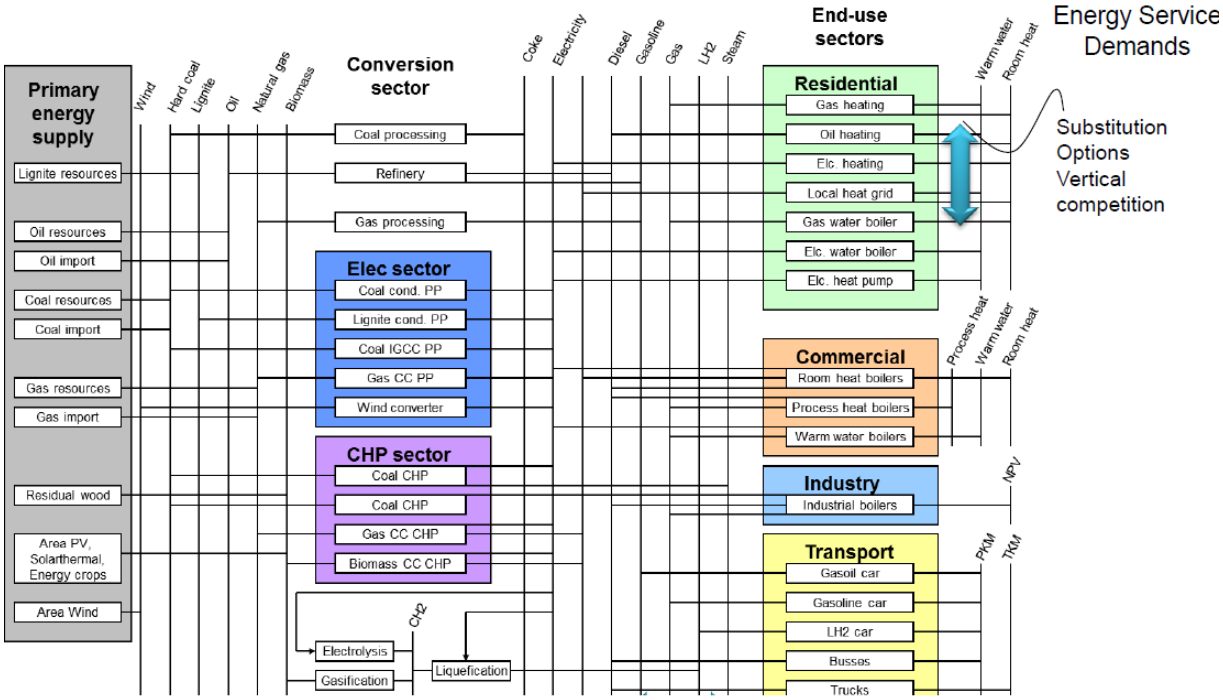



**Figura 15: Estructura general del modelo TIMES. Fuente:** (IEA-ETSAP, n.d.)

El modelo TIMES puede ser utilizado para representar todos los sectores del Balance Nacional de Energía o para representar un sector en particular. Por ejemplo, la siguiente figura muestra de la implementación del modelo TIMES para modelar el sector transporte (Tattini, Gargiulo, & Karlsson, 2018). Se representan los modos de transportes no motorizados (caminata y bicicleta), metro, trenes livianos, trenes, vehículos particulares, buses y motocicletas. Cada modo de transporte debe satisfacer la demanda de transporte desagregada por distintas distancias.

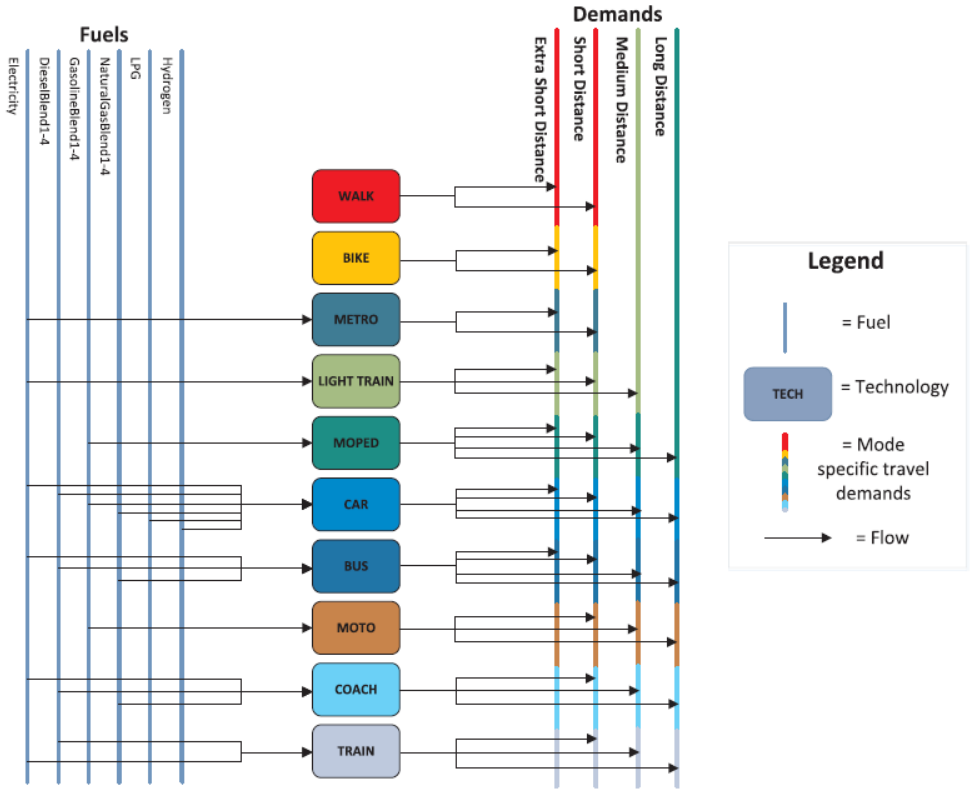



**Figura 16: Ejemplo de aplicación del modelo TIMES en el sector transporte. Fuente:** (Tattini et al., 2018)**.**

En (Shi, Chen, & Yin, 2016) se utiliza el modelo TIMES para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residencial. La siguiente figura muestra los procesos modelados. La demanda por servicios energéticos son: demanda por calefacción, demanda por enfriamiento, demanda por agua caliente y cocción, demanda por iluminación, demanda asociada a consumo de refrigeradores, demanda asociadas a maquinas lavadoras y otros equipos eléctricos. La demanda por calefacción puede ser satisfecha por distintas tecnologías: calefactores convencionales, equipos de aire acondicionado, calefacción distrital, bombas de calor, etc. La demanda por iluminación puede ser satisfecha por ampolletas incandescentes, fluorescentes, LED, etc. La demanda por servicios energéticos depende de la zona climática y del tipo de viviendas.

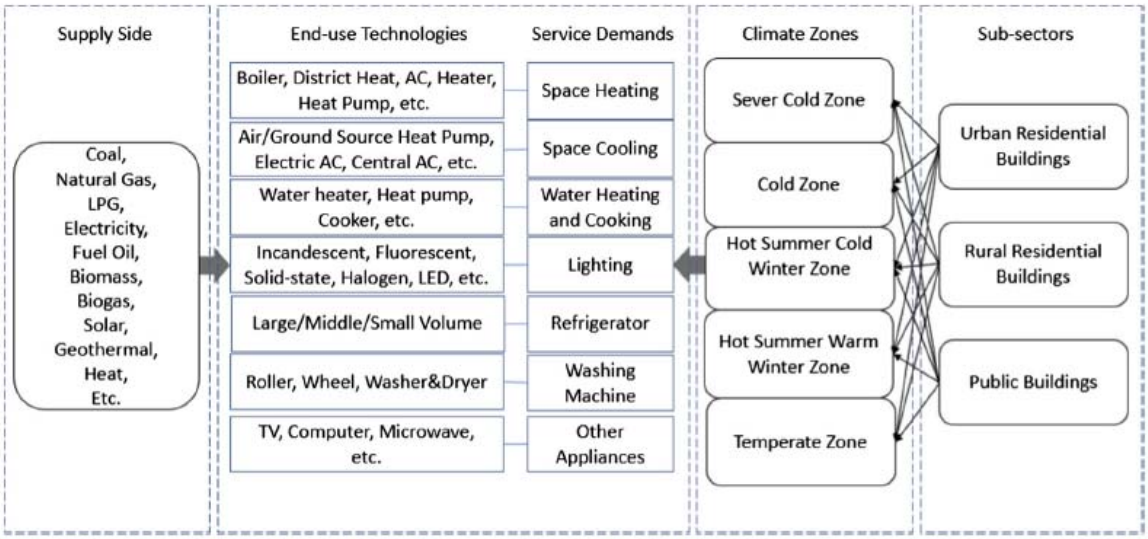



**Figura 17: Ejemplo de aplicación del modelo TIMES en el sector residencial. Fuente:** (Shi et al., 2016)

Comentarios generales al uso del modelo TIMES:

- El modelo TIMES permite realizar una representación detallada de los distintos usos finales y tecnologías. Sin embargo, el nivel de detalle de la implementación propia de cada país depende de la información disponible.
- El crecimiento de la demanda depende de los datos exógenos de proyección de demanda de servicios energéticos. Esta demanda de servicios energética típicamente están correlacionadas con el crecimiento del PIB, PIB regional, PIB sectorial, crecimiento de la población, proyección de producciones industriales, etc.
- El precio de las combustibles y los costos de las tecnologías influye en el crecimiento de la demanda energética para los distintos tipos de combustibles. El modelo optimiza cual es la tecnología más costo efectiva para satisfacer el crecimiento de la demanda de energía.
- El modelo TIMES utiliza un enfoque de optimización, mientras que el modelo FORESCAT y ENERGY 2020 utilizan un enfoque de simulación basado en modelo de selecciones del tipo logit. No obstante, en ambos casos se utilizan los costos de inversión de las distintas tecnologías y precios de los combustibles para determinar el año a partir del cual una tecnología se vuelve más costo eficiente que otra.

#### 2.3.5.4 Sudáfrica

El reporte bienal de Sudáfrica (Gobierno de Sudáfrica, 2018) reporta el uso del modelo SATIM para analizar el impacto de distintas políticas energéticas y climáticas. El modelo SATIM (South Africa TIMES) corresponde a la versión de Sudáfrica del modelo TIMES (Energy Research Centre, 2018).

El modelo SATIM es un modelo de optimización lineal de equilibrio parcial, capaz de representar todo el sistema energético, incluidos sus costos económicos y sus emisiones. La estructura del modelo SATIM está contenida en un base de datos, y construido a través de una interfaz de usuario llamada ANSWER, que proporciona un marco para estructurar el modelo y los escenarios, y también para interpretar los resultados. ANSWER compila los datos de entrada del modelo en un conjunto de ecuaciones lineales, que luego son resueltas por el optimizador utilizado por software (Ejemplo: CPLEX).

El modelo SATIM representa actualmente cinco sectores de demanda y dos sectores de oferta: industria, agricultura, comercio residencial y transporte por el lado de la demanda, y electricidad y combustibles líquidos por el lado de la oferta. A continuación se realiza una descripción de los distintos sectores modelados.

Modelo industria y minería

La siguiente tabla muestra los subsectores del sector industria y minería representados en el modelo SATIM. El modelo representa un subconjunto de sectores representado en el Balance Nacional de Energía. Se representan el sector minería, industria del hierro y acero, industria química, industria de metales precios y no ferrosos, industria de alimentos, industria del papel y celulosa, y en la categoría “otros” se agrupan los otros sectores del balance de energía.

**Tabla 5: Subsectores de industria y minería representados en el modelo SATIM. Fuente: (Energy Research Centre, 2018)**

| DOE[3] Energy Balance | DOE Share of Total Consumption (2006) | SATIM[1] | LTMS |
|---|---|---|---|
| Mining and Quarrying | 16.9% | Mining SIC2 | Gold Mining |
| | | | Other Mining |
| Iron and Steel | 28.0% | Iron & Steel - 351 | Manufacturing |
| Chemical and Petrochemical | 13.3% | Chemicals -33 | |
| Non-Ferrous Metals | 4.5% | Precious & Non-Ferrous metals - 352 | |
| Non-Metallic Minerals | 4.8% | N.M.M Products -34 | |
| Food and Tobacco[2] | 0.3% | Food, Beverage & Tobacco - 30 | |
| Paper Pulp and Print[2] | 0.6% | Pulp & Paper Products -323 | |
| Construction | 1.1% | Other | |
| Machinery | 0.2% | | |
| Textile and Leather | 0.1% | | |
| Wood and Wood Products | 0.1% | | |
| Transport Equipment | 0.02% | | |
| Non-specified (Industry) | 30.2% | | |

La siguiente tabla muestra los usos finales de la energía y las tecnologías representadas para satisfacer la demanda de servicios energéticos del sector industria y minería. Por ejemplo, para satisfacer la demanda de las calderas se pueden utilizar calderas a gas a carbón, gas natural, a biomasa, etc.

**Tabla 6: Usos finales de la energía y servicios energéticos representadas en el sector industria y minería del modelo SATIM. Fuente: (Energy Research Centre, 2018)**

| Energy Source | Technology | Energy Service Demands |
|---|---|---|
| Electricity | Elec Heating - Electricity | Elec Heating |
| Electricity | Compressed air - Electricity | Compressed air |
| Electricity | Lighting - Electricity | Lighting |
| Electricity | Cooling - Electricity | Cooling |
| Electricity | HVAC - Electricity | HVAC |
| Electricity | Pumping - Electricity | Pumping |
| Electricity | Fans - Electricity | Fans |
| Electricity | Other motive - Electricity | Other motive |
| Electricity | Electrochemical - Electricity | Electrochemical |
| Electricity | boiler/process heating - Electricity | boiler/process heating |
| Coal | boiler/process heating - Coal | boiler/process heating |
| Gas | boiler/process heating - Gas | boiler/process heating |
| HFO | boiler/process heating - HFO | boiler/process heating |
| LPG | boiler/process heating - LPG | boiler/process heating |
| Biomass Bagasse | boiler/process heating - Biomass Bagasse[1] | boiler/process heating |
| Biomass Wood | boiler/process heating - Biomass Wood[2] | boiler/process heating |
| Diesel | Transport – Diesel[3] | Transport |

Dentro de las limitaciones presentadas en el mismo documento descriptivo del modelo SATIM, se menciona que este modelo no representa las distintas tecnologías que utilicen un mismo tipo combustible para determinado uso final determinado (las distintas tecnologías podrían tener distintas eficiencias, costos de inversión y mantenimiento, etc.). Esto se debe a limitaciones de información disponible. Además, actualmente no se utilizan datos de costos de inversión para las tecnologías asociadas a los distintos tipos de combustibles. Por lo tanto, solo se utilizan los costos del combustible. También dentro del mismo documento se mencionan limitaciones de información disponible para caracterizar la participación de usos finales de energía. Las participaciones fueron obtenidas de estudios antiguos y datos obtenidos de opiniones expertas.

La siguiente tabla muestra la participación de usos finales para el sector industria y minería.

**Tabla 7: Participación de usos finales de la energía. Fuente: (Energy Research Centre, 2018)**

| Energy Service Fractional Shares by Sub-sector | Mining | Iron & Steel | Chemi-cals | Precious & Non-Ferrous metals | N.M.M Products | Food, Beverage & Tobacco | Pulp & Paper Products | Other |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elec Heating | 2.0% | 40.0% | 2.0% | 1.0% | 23.0% | 7.0% | 2.0% | 9.7% |
| Compressed air | 18.6% | 5.0% | 15.0% | 0.0% | 13.0% | 4.0% | 35.0% | 10.9% |
| Lighting | 4.5% | 3.5% | 4.0% | 1.0% | 5.0% | 5.0% | 10.0% | 8.1% |
| Cooling | 8.1% | 1.0% | 5.0% | 0.0% | 0.0% | 23.0% | 0.0% | 5.1% |
| HVAC | 8.0% | 2.0% | 2.0% | 1.0% | 2.0% | 6.0% | 4.0% | 8.5% |
| Pumping | 17.9% | 2.5% | 35.0% | 0.0% | 8.5% | 28.0% | 35.0% | 13.0% |
| Fans | 6.9% | 4.5% | 8.0% | 0.0% | 9.0% | 4.0% | 0.0% | 5.5% |
| Other motive | 33.8% | 41.5% | 20.0% | 7.0% | 39.5% | 21.0% | 14.0% | 36.9% |
| Electrochemical | 0.2% | 0.0% | 8.0% | 90.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.3% |
| Boiler/process heating | 0.0% | 0.0% | 1.0% | 0.0% | 0.0% | 2.0% | 0.0% | 1.0% |
| **Total** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** |

La demanda de energías se proyecta a partir de proyecciones de PIB sectoriales y datos de intensidad energética. Las intensidades energéticas son obtenidas a partir de interpolaciones de datos históricos. Las proyecciones de PIB sectorial son obtenidas de un modelo macroeconómico.

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Caracterización más detallada de las distintas tecnologías que satisfacen la demanda.
- Caracterización más detallada de los usos finales de la energía.
- Producciones industriales obtenidas de un modelo macroeconómico
- Caracterización de costos inversión y operación de distintas tecnologías (aunque se menciona en documento que esta características no ha sido utilizada)

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Modelo basado en intensidades energéticas
- Número limitado de número de industrias representadas

Sector comercial

La siguiente tabla muestra los tipos de comercios representados en el modelo SATIM.

**Tabla 8: Tipos de comercio representados en el modelo SATIM. Fuente: (Energy Research Centre, 2018)**

| Building activity | Economic sector | Percentage share of floor area 2001 | Percentage share o floor area 2006 |
|---|---|---|---|
| Shopping space | Wholesale, retail, motor trade and accommodation | 37% | 36% |
| Office and banking space | Finance, real estate and business services | 30% | 39% |
| Other non-residential space | Personal services | 33% | 24% |

La demanda de energías se calcula a partir de datos de intensidad por $m^2$ construidos para uso comercial y proyecciones de $m^2$ construidos para el horizonte de evaluación. La intensidad energética se calcula a partir de datos históricos y la proyección de m2 de superficie se obtiene de un modelo econométrico que correlaciona la superficie construido con el PIB sectorial del sector comercial. Para el cálculo de intensidad también se considera norma de construcción utilizada (lo cual afecta el consumo energético unitario). La proyección del PIB sectorial se obtiene a partir de modelo macroeconómico.

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Proyección de superficie construida para uso comercial basada en modelo econométrico (en los siguientes capítulos de este informe se muestra que el consumo de energía se calcula a partir de la proyección del número de establecimientos y consumos promedios).

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Modelo basado en intensidades energéticas
- Número limitado de número de comercios representadas

Sector residencial

El modelo SATIM caracteriza los distintos tipos de hogares según nivel de ingreso y consumo de energía. Se representan 5 tipos de hogares: 1) hogares de ingreso bajo sin acceso a la energía eléctrica, 2) hogares de ingreso bajo con acceso a la electricidad, 3) hogares de ingreso medio sin acceso a la energía eléctrica, 4) hogares de ingreso medio con acceso a la energía eléctrica y 5) hogares de ingresos altos. Los hogares de altos ingresos tienden a poseer más electrodomésticos y, como resultado, consumen más electricidad. La tenencia de equipos está fuertemente correlacionada con la demanda de energía. Los datos de uso de electricidad y los datos de electrodomésticos provienen de diferentes fuentes con diferentes clasificaciones de banda de ingresos.

Los siguientes servicios energéticos son representados en el modelo SATIM: 1) cocina, 2) calefacción, 3) agua caliente, 4) refrigeración y 5) "otros" usos finales. El crecimiento de la demanda por servicios energéticos depende del crecimiento de la población y del ingreso de los hogares.

A partir de datos de encuestas se observa que los hogares de altos ingresos tenían un tamaño de hogar de 2,41 personas por hogar, las de ingresos medio ingreso tiene 2,97 personas por hogar y hogar de bajos ingresos tienen un tamaño de hogar promedio de 4.34 personas por hogar en 2007. Los cambios en los niveles ingresos de los hogares se relacionan con el crecimiento del PIB y el crecimiento del mercado laboral.

El crecimiento de la demanda de energía por hogar se calcula de la siguiente forma:

$$IE_{i,j,n} = IE_{i,j,n-1} \times (1 + \epsilon_{i,j} \times \Delta I_{i,n})$$

Donde $IE_{i,j,n}$ es la intensidad energética del tipo de hogar i, por el servicio energético j, en el año n, $\Delta I_{i,n}$ es el crecimiento de ingreso de hogar tipo i en el año n, $\epsilon_{i,j}$ es la elasticidad intensidad/ingreso. Luego la demanda por uso final de la energía se calcula de la siguiente forma:

$$UE_{i,j,n} = IE_{i,j,n} \times P_{i,n}$$

Donde $UE_{i,j,n}$ es la demanda de energía del tipo de hogar i, por el servicio energético j, en el año n, y $P_{i,n}$ es la población del grupo i en el año n.

La información sobre los tipos de combustibles utilizados para calefacción, iluminación y cocina para los distintos grupos de ingresos se obtienen de encuestas de censo, encuestas comunitarias y la encuesta general aplicadas a hogares. Una de las limitaciones de la metodología que se menciona en documento descriptivo, es que estas encuestas no proporcionan una descripción cuantitativa de los patrones de consumo de energía y las características de uso final de energía de diferentes hogares. Por lo tanto, los datos cuantitativos sobre el consumo de energía en los hogares sudafricanos son limitados.

Sector transporte

La siguiente tabla muestra los tipos de transporte para pasajeros representados en el modelo SATIM. El modelo presenta automóviles, SUV, buses, minibuses, buses BRT, METRO y trenes de alta velocidad. Para cada uno de estos tipos de transporte también se representan distintos tipos de tecnologías.

**Tabla 9: Tipos de transporte representados para el transporte de pasajeros en el modelo SATIM. Fuente: (Energy Research Centre, 2018).**

| sub-Sector | Energy Source | Technology | Energy Service |
|---|---|---|---|
| Passenger | Diesel | SUV Priv.Veh. Oil Diesel | Passenger Transport by SUV Private Vehicle |
| Passenger | Gasoline | SUV Priv.Veh. Oil Gasoline | |
| Passenger | Diesel | SUV Priv.Veh. Oil Diesel Hybrid | |
| Passenger | Gasoline | SUV Priv.Veh. Oil Gasoline Hybrid | |
| Passenger | Diesel | Car Priv.Veh. Oil Diesel | Passenger Transport by Car Private Vehicle |
| Passenger | Gasoline | Car Priv.Veh. Oil Gasoline | |
| Passenger | Diesel | Car Priv.Veh. Oil Diesel Hybrid | |
| Passenger | Gasoline | Car Priv.Veh. Oil Gasoline Hybrid | |
| Passenger | Electricity | Car Priv.Veh. Electricity | |
| Passenger | Gas | Car Priv.Veh. Gas | |
| Passenger | Gasoline | Moto Priv.Veh. Oil Gasoline | Passenger Transport by Motorcycle Private Vehicle |
| Passenger | Diesel | Bus Oil Diesel | Passenger Transport by Bus |
| Passenger | Gas | Bus Gas | |
| Passenger | Diesel | Minibus Oil Diesel | Passenger Transport by Minibus |
| Passenger | Gasoline | Minibus Oil Gasoline | |
| Passenger | Diesel | Minibus Oil Diesel Hybrid | |
| Passenger | Gas | Minibus Gas | |
| Passenger | Diesel | BRT Oil Diesel (1) | Passenger Transport by BRT |
| Passenger | Gas | BRT Gas | |
| Passenger | Electricity | BRT Electricity | |
| Passenger | Electricity | Metro Rail Electricity(2) | Passenger Transport by Metro Rail |
| Passenger | Electricity | High Speed Metro Train Electricity | Passenger Transport by High-Speed Metro Train |

La siguiente tabla muestra los tipos de transporte de carga y modo aviación representados en el modelo SATIM. Para el transporte de carga se representan camiones livianos, medianos, pesados y transporte ferroviarios.

**Tabla 10: Tipos de transporte representados para el transporte de carga en el modelo SATIM. Fuente: (Energy Research Centre, 2018).**

| sub-Sector | Energy Source | Technology | Energy Service |
|---|---|---|---|
| Freight | Diesel | LCV Oil Diesel | Freight Transport - LCV |
| Freight | Gasoline | LCV Oil Gasoline | |
| Freight | Gas | LCV Gas | |
| Freight | Diesel | MCV Oil Diesel | Freight Transport - MCV |
| Freight | Gasoline | MCV Oil Gasoline | |
| Freight | Gas | MCV Gas | |
| Freight | Diesel | HCV Oil Diesel | Freight Transport - HCV |
| Freight | Gas | HCV Gas | |
| Freight | Diesel | Rail Corridor Diesel | Freight Transport - Rail Corridor |
| Freight | Electricity | Rail Corridor Electricity | |
| Freight | Diesel | Rail Other Diesel | Freight Transport - Rail Other |
| Freight | Electricity | Rail Other Electricity | |
| Freight | Electricity | Rail Export (bulk mining) Electricity | Freight Transport - Rail Export (bulk mining) |
| Freight | Electricity | Rail Export (bulk mining) Diesel | |
| Other | Electricity | Pipeline Electricity | Transport Other - Pipeline |
| Other | Jet Fuel | Aviation Jet Fuel | Transport Other - Aviation Jet Fuel |
| Other | Aviation Gasoline | Aviation Gasoline | Transport Other - Aviation Gasoline |
| Other | HFO (Residual Oil) | HFO[3] | Transport Other - HFO |

Las proyecciones de demanda de energía del sector transporte de pasajeros se realizan consideran el sub-modelo Vehicle Parc Model. La demanda de energía del sector transporte de pasajeros se calculan a partir de proyecciones de PKM. Las proyecciones de PKM se estiman suponiendo un “presupuesto de tiempo” para viajar estimado en 1,1 horas/persona/día. Para estimar los km recorridos se deben hacer supuestos de velocidad promedio de cada modo de transporte.

El stock vehículo considerada la entrada de nuevos vehículos y las tasas de obsolescencia o chatarrización. Para calcular las tasas de chatarrización se utiliza un modelo de distribución de probabilidad del tipo Weibull. La cantidad de kilómetros recorridos anuales depende de los años de operación de cada vehículo y se asume que disminuye con el paso del tiempo. El modelo SATIM determina cuales son las tecnologías más costo efectivas para satisfacer la demanda de PKM.

La demanda del sector transporte de carga depende de la proyección de TKM. Existen series históricas de datos de TKM que son utilizada para estimar un modelo econométrico que correlaciona los TKM con el PIB del sector transporte. A su vez, el PIB del sector transporte es obtenido del modelo macroeconómico.

La siguiente figura muestra los distintos módulos del modelo del sector transporte.

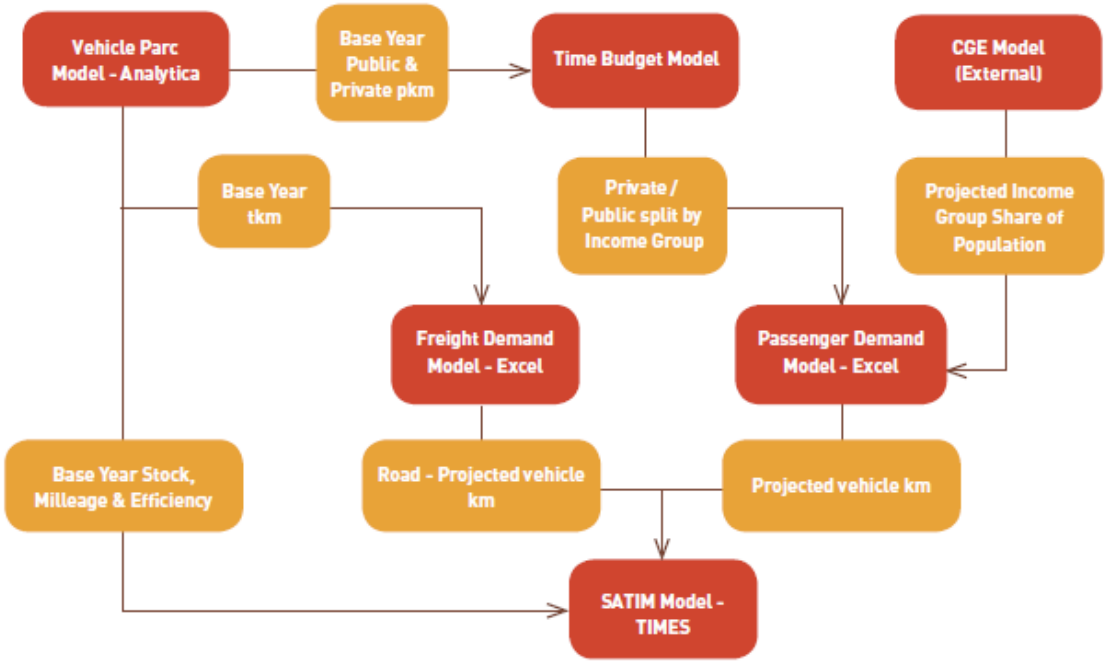



**Figura 18: Modelo del sector transporte. Fuente:** (Energy Research Centre, 2018)

Principales diferencias identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Caracterización de costos inversión y operación de distintas tecnologías
- Uso de modelo de stock de vehículos
- Utilización de concepto "presupuesto de tiempo" para determinar la proyección de PKM.
- Nivel de actividad variable en el tiempo.

Principales similitudes identificadas con respecto a modelo implementado en Chile:

- Las categorías del sector transporte de pasajeros y transporte de carga son simulares al modelo chileno.
- Representación de demanda de servicios mediante proyecciones de PKM y TKM.

#### 2.3.5.5 Comentarios generales

A continuación se realiza un análisis de las dificultades que podría tener la implementación en Chile de las metodologías revisadas en la experiencia internacional.

Los modelos FORECAST, Energy 2020 y TIMES son intensivos en el uso de información para caracterizar el stock disponible de las distintas tecnologías y edificaciones de los distintos sectores. No solo se necesita contar con la información de la cantidad de equipamiento, sino que también de sus características técnicas (capacidad instalada, eficiencia, tipo de combustible utilizado, año de entrada en operación, estándar de construcción, vida útil, etc.). En el caso de Chile se observa que no existen bases de datos que mantengan en forma permanente en este tipo de información.

Los modelos FORECAST, Energy 2020 y TIMES son intensivos en el uso de información para caracterizar los usos finales de la energía. En el caso de Chile se han hechos estudios particulares para caracterizar los usos finales cada cierto número de años.

Tanto los modelos de selección discreta (FORESCAT, ENERGY 2020) como los modelos de optimización (TIMES, SATIM), requieren información de costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, y costos asociados al uso de combustible, para caracterizar las distintas tecnologías que pueden satisfacer los usos finales de la energía. Asimismo, se requieren las proyecciones de costos de las distintas tecnologías. En el caso de Chile existe poco experiencia en el levantamiento de información de costos asociados a tecnologías del sector transporte, industrial, residencial, comercial y público.

La revisión de la experiencia internacional también muestra que existen instituciones especializadas bases de datos de parámetros relevantes para los modelos de proyección de demanda como lo son los PKM, TKM y número de hogares. Estas mismas instituciones también se encargan de realizar proyecciones que son datos de entrada para los modelos energéticos. En el caso de Chile se observa que el Ministerio de Transporte y Ministerio de Viviendas no realizan este tipo de proyecciones.

En el caso de Chile los modelos de optimización han sido utilizados ampliamente en el sector generación eléctrica. Por ejemplo, los modelos PLP, OSE2000, PLEXOS, PET, etc. optimizan la operación del sistema eléctrico considerando las proyecciones de demanda eléctrica y los precios de los combustibles. El modelo PET y módulo de optimización del modelo PLEXOS pueden realizar proyecciones del plan de expansión de la generación considerando los costos de inversión y los costos de operación de las distintas tecnologías de generación. Asimismo, en Chile existe información detallada del stock disponible y las características técnicas de centrales en operación (potencia máxima, consumos específicos, año de entrada en operación, etc.). Como se menciona anteriormente, existen dificultades para obtener este mismo tipo de información para otros sectores (transporte, industria y minería, comercial, etc.). Los modelos de optimización aplicados a otros sectores energéticos han sido poco utilizados en el caso de Chile. El modelo energético PRM desarrollo por el Centro de Energía de la Universidad de Chile es un ejemplo de aplicación de este tipo de metodologías aplicadas para proyectar la oferta y demanda de energía en el mediano y largo plazo.

La siguiente tabla resumen las principales características de los modelos revisados con un mayor nivel de detalle.

**Tabla 11: Comparación general de modelos utilizados**

| Característica | FORECAST | ENERGY 2020 | SATIM/TIMES |
|---|---|---|---|
| Experiencia internacional | Alemania | Canadá, Estados Unidos | Sudáfrica, Suecia, Australia, Paquistán, etc. |
| Metodología | Modelo de simulación<br>Modelo de difusión tecnológica, modelo selección discreta.<br>Modelo de stock. | Modelo de simulación<br>Modelo de difusión tecnológica, modelo selección discreta.<br>Modelo de stock. | Modelo de optimización |
| Precio de combustibles | Sí. Afecta modelo de selección discreta. | Sí. Afecta modelo de selección discreta. | Sí. Se ingresa como dato de entrada modelo de optimización. |
| Costos de inversión de distintas tecnologías. | Sí. Afecta modelo de selección discreta. | Sí. Afecta modelo de selección discreta. | Sí. Se ingresa como dato de entrada modelo de optimización. |
| Caracterización de stock de tecnologías y viviendas | Caracterización de inventario y sus características técnicas (capacidad instalada, eficiencia, tipo de combustible utilizado, año de entrada en operación, estándar | Caracterización de inventario y sus características técnicas (capacidad instalada, eficiencia, tipo de combustible utilizado, año de entrada en operación, estándar de construcción, vida útil, etc.). | Caracterización de inventario y sus características técnicas (capacidad instalada, eficiencia, tipo de combustible utilizado, año de entrada en operación, estándar |

| Característica | FORECAST | ENERGY 2020 | SATIM/TIMES |
|---|---|---|---|
| | de construcción, vida útil, etc.). | | de construcción, vida útil, etc.). |
| PIB, población. | Afecta las proyecciones de las demandas de los servicios energéticos. | Afecta las proyecciones de las demandas de los servicios energéticos. | Afecta las proyecciones de las demandas de los servicios energéticos. |

## 2.4 Desarrollar en forma detallada la metodología de proyección "bottom up"

En la siguiente sección se detalla la metodología de proyección "bottom up" asociada la proyección de demanda energética. La metodología se basa principalmente en el modelo de referencia utilizado en estudio previo.

Las características del modelo se describen a continuación:

- Proyección de demanda energética de todos los sectores del Balance Nacional de Energía: industria del cobre, salitre, hierro, papel y celulosa, siderúrgica, petroquímica, cemento, azúcar, pesca, construcción, industria varías, minas varias, transporte terrestre de pasajeros en vehículos privados, transporte terrestre de pasajeros en buses, transporte en taxis y colectivos, transporte en motocicletas, transporte en modos no motorizados, transporte aéreo de pasajeros, transporte, transporte terrestre de carga, transporte marítimo de carga, transporte ferroviario de pasajeros, transporte ferroviario de carga, comercio (supermercados, malls, hoteles, bancos, clínicas, oficinas, almacenes, bodegas, etc.), público, residencial, refinerías, plantas de regasificación, etc.
- Proyección de demanda para todos los energéticos representados en Balance Nacional de Energía: gas natural, carbón, biomasa, diésel, petróleo combustible, gasolina, kerosene, gas licuado, gasolina de aviación, kerosene de aviación, electricidad, etc.
- Representación de usos finales de la energía por tipo de energético para las distintas industrias: usos térmicos (calderas, hornos), usos motrices y usos eléctricos (iluminación, sala de computadores, etc.).
- Representación de usos finales de la energía por tipo de energético para sector residencial: calefacción, cocción, refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación, enfriamiento, etc.
- Representación de usos finales de la energía para el sector comercial: calefacción, agua caliente sanitaria, enfriamiento, iluminación, etc.
- Representación de usos finales de la energía para el sector público: calefacción, agua caliente sanitaria, enfriamiento, alumbrado público, etc.
- Caracterización de usos finales haciendo uso de la información pública más reciente: Encuesta CDT, caracterización de usos finales del sector industrial obtenido del estudio desarrollado por el Centro de Energía Bien Público de Eficiencia Energética, encuestas Origen-Destino más recientes.
- Representación de distintas tecnologías para distintos modos de transporte: vehículos a gasolina, vehículos diésel, vehículos eléctricos, vehículos híbridos, etc.
- Uso de modelos econométricos para aquellos sectores en cuales existen series históricas de demanda energética, producción industrial, etc.
- Uso de modelos basados en intensidades energéticas, las cuales serán estimadas haciendo uso de la información pública más reciente.

- Combinación de metodologías basadas en modelos econométricos y modelos de intensidades energéticas.
- Proyección de demanda energética con una desagregación espacial regional.
- Proyección de demanda energética con una resolución temporal anual.
- Otras características que se describen en las actividades a desarrollar en las siguientes secciones.

La descripción del modelo de referencia se realiza en la sección 3.1. En la sección 3.2 se describen las actualizaciones realizadas al modelo del sector transporte, en la sección 3.3 las actualizaciones del sector residencial, en la sección 3.4 las actualizaciones del sector público, en la sección 3.5 las actualizaciones realizadas al modelo del sector comercial y en la sección 3.6 las actualizaciones del sector industria y minería. En la sección 3.7 se describen las actualizaciones específicas para la incorporación de los precios de los energéticos.

# 3 Actualización de modelo

## 3.1 Revisión de resultados de estudio previo

En este capítulo el Centro de Energía explicará sucintamente el contenido y principales resultados del estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo" licitado por el Ministerio de Energía en el año 2015. El modelo desarrollo en dicho estudio corresponde al modelo base que será actualizado de acuerdo a la descripción que se detalla en los siguientes secciones.

El consultor ha hecho una revisión de las metodologías, ha identificado los principales supuestos y ha identificado las principales ventajas y desventajas de las metodologías empleadas.

La metodología consideró los siguientes sectores: Industria y Minería (y sus subsectores); Comercial (y sus subsectores), Público y Residencial (CPR); y Transporte. La herramienta computacional permite a los usuarios ingresar inputs de entrada o drivers de consumo a una planilla Excel (modelo de datos), que alimenta al modelo de demanda a al software LEAP y este a su vez al sistema de modelamiento energético de código abierto OSeMOSYS para la prospección de la oferta energética. Los resultados obtenidos a partir de los modelos son exportados a una planilla Excel para el cálculo de indicadores. Lo anterior resumido en la siguiente figura.

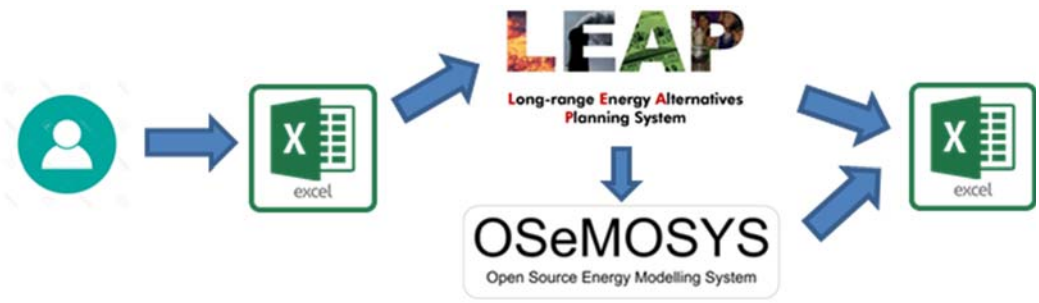



**Figura 19: Esquema de modelación utilizado en "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo".**

A continuación se describen los distintos sectores analizados.

### 3.1.1 Sector transporte

En términos generales, la metodología de modelación del sector transporte en sus distintas modalidades, cuenta de tres bloques principales. Entre estos: 1) La información de entrada con la cual se definen las series históricas de PKM y TKM para cada modo de transporte. 2) Proyección de las variables PKM y TKM que definen el modelo. 3) Metodología específica que permite estimar la demanda energética y emisiones de GEI para el período 2014-2050. Esto es representado en la siguiente figura:

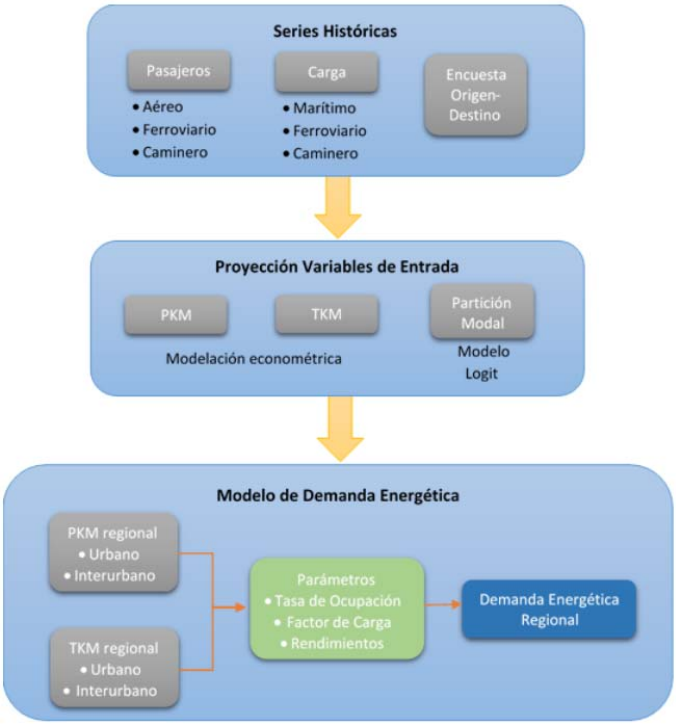



**Figura 20 Resumen de la metodología de proyección de demanda del sector transporte**

El modelo del sector transporte realizado en el estudio "Elaboración e implementación de herramientas de prospectivas de Largo Plazo" son los mismos a los utilizados en el proyecto MAPS Fase II (MAPS-Chile, 2014). La metodología se basa en la proyección de los niveles de actividad regional en toneladas-kilómetro (TKM) y pasajero-kilómetro (PKM) para el transporte de carga y de pasajeros respectivamente. El resumen de la metodología es presentado en la figura siguiente:

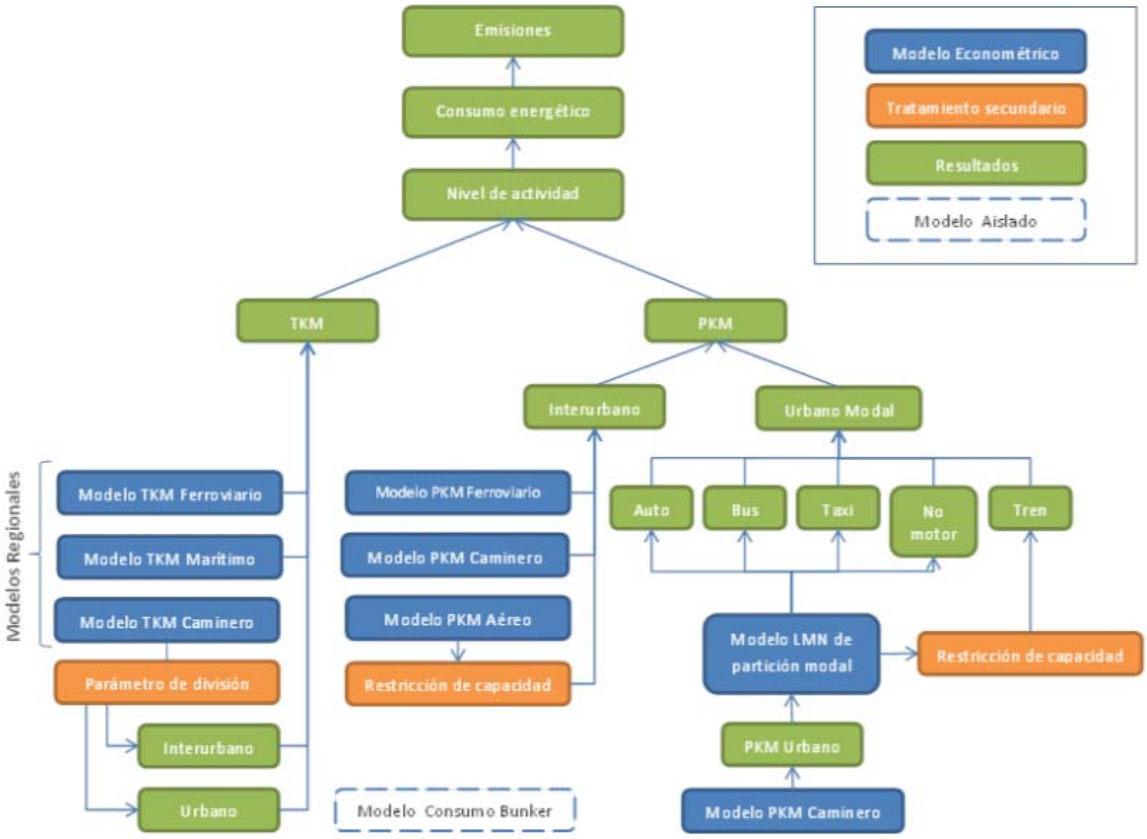



**Figura 21: Detalle de modelo de transporte. Fuente: MAPS Fase II Transporte**

#### 3.1.1.1 Modo Caminero

##### 3.1.1.1.1 Metodología de estimación de series de PKM y TKM histórico del modo caminero

La metodología considera como primer paso para la construcción de series históricas la desagregación del consumo de combustible por región. Para esto, se utiliza como información de base los informes estadísticos de combustibles publicados por la SEC.

En términos resumidos la metodología del estudio previo considera para la estimación de las series de PKM y TKM históricos para cada región de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$PKM_t = \sum_i^I CC_t * X_{i,t} * TO_{i,t} * FdC_{i,t} \qquad \forall t$$

$$TKM_t = \sum_i^I CC_t * X_{i,t} * TC_{i,t} * FdC_{i,t} \qquad \forall t$$

Donde: $PKM_t$: Demanda de transporte de pasajeros para cada categoría [paxkm]; $CC_t$ Consumo de combustible total para cada año t [m$^3$]; $X_{i,t}$ Participación del modo i en el consumo de combustibles; $TO_{i,t}$; tasas de ocupación promedio del modo i [pax]; $FdC_{i,t}$ rendimiento promedio del modo i [km/m$^3$] y $TC_{i,t}$: tasa de carga promedio del modo i [ton]

Para asignar el consumo de combustible correspondiente al modo caminero en cada año t ($CC_t$), la metodología considera como criterios de asignación los consumos de los combustibles Petróleos Diésel y Gasolinas (todas sus categorías salvo gasolina de aviación) de los siguientes canales de distribución:

**Tabla 12 Criterios de asignación de combustibles del informe estadístico de la SEC al modo caminero**

| Canal de Distribución | Combustibles |
|---|---|
| **Empresas de Transporte** | Todas las gasolinas y petróleos diésel |
| **Canal Minorista** | Todas las gasolinas y petróleos diésel |
| **Ventas Directas ENAP** | Todas las gasolinas |
| **Usuarios** | Gasolinas sin plomo |

A partir del año 2014 comenzaron a ser publicados los balances de energía con desagregación regional. Se evidenciaron diferencias regionales y nacionales en el consumo de gasolina y diésel respecto a la metodología basada en los reportes de la SEC.

#### 3.1.1.1.2 Metodología de cuantificación de la participación en el consumo de combustible de los distintos modos de transporte caminero

La metodología considera la cuantificación de consumo de combustible por categoría de modo de estimar una matriz de peso porcentual para la asignación de consumos de combustible ($X_{i,j}$). Para realizar este cálculo se utiliza la ecuación presentada a continuación para cada región.

$$CC_{i,j} = N_{i,j} * \frac{NA_{i,j}}{FdC_{i,j} * 1000} \qquad \forall\, i,j$$

Donde: $CC_{i,j}$: representa el consumo de combustible de la categoría i para el combustible j (gasolina o diésel) [m$^3$]; $N_{i,j}$ representa el número de vehículos de la categoría i del combustible j [-]; $NA_{i,j}$ representa el nivel de actividad promedio de la categoría i y combustible j [km/año] y $FdC_{i,j}$ representa el rendimiento de combustible promedio del modo i y combustible j [km/l]. Esto es replicado para cada región.

Posteriormente, se calcula la participación porcentual por categoría y combustible de acuerdo a:

$$X_{i,j} = \frac{CC_{i,j}}{CC_j} \qquad \forall\, i,j$$

Donde: $X_{i,j}$: representa la participación porcentual en el consumo de combustible para la categoría i y el combustible j [%]; $C_{i,j}$: representa el consumo de combustible de la categoría i para el combustible j (gasolina o diésel) [m$^3$]; $CC_j$ representa el consumo total del combustible j para un año fijo asociado al modo caminero [m$^3$].

En términos generales, las principales observaciones a la metodología de cálculo de series históricas de PKM y TKM desarrollada en el estudio previo para el modo caminero se resumen en los siguientes puntos:

1. Las series de PKM y TKM para el modo caminero son series derivadas, es decir, no son datos estadísticos o información recopilada por una entidad pública, sino son datos calculados a partir de información oficial (Informe Estadístico SEC y Anuario del Parque Automotriz del INE), y supuestos de rendimientos, niveles de actividad, tasas de ocupación y tasas de carga.

2. Al aplicar la metodología propuesta se obtienen estimaciones de consumo de gasolina regional que son distintos a los consumos reportados por los Balances Regionales de Energía del Ministerio de Energía para el modo transporte caminero. A nivel nacional, el consumo de gasolina estimado es similar al consumo de gasolina calculado a partir de los balances regionales. Por otra parte, para el consumo de diésel, al aplicar la metodología se observan diferencias significativas en el consumo de diésel a nivel regional y nacional respecto a los consumos reportados en los Balances Regionales. Los modelos regionales son ajustados para obtener los consumos reportados en el Balance Regional 2017.

3. Las series históricas de pasajeros-kilómetro para cada región son derivadas sólo considerando los modos que consumen combustible (ya sea diésel o gasolina). Quedan afuera la demanda de pasajeros-kilómetros generados por otros modos, como, por ejemplo, el modo bicicleta o medios motorizados que no utilicen combustible como los trenes urbanos.

4. No se explicita en la metodología del estudio previo la forma en que se estiman la demanda de pasajeros-kilómetros asociados al modo caminero interurbano, tanto de vehículos particulares como de buses interurbanos.

5. Existe nueva información relativa a los parámetros utilizados en el modelo energético de transporte que pueden ser actualizados en base a nueva información.

#### 3.1.1.2 Modo Aéreo

La serie histórica de PKM del modo aéreo interurbano fue obtenida a partir de información del estudio "Estimación de Demanda por Transporte Aéreo Nacional e Internacional en Chile" de la Junta de Aeronáutica Civil (JAC) del año 2013, cual tiene desagregación nacional. A partir de la información histórica se proyectó la demanda regional de pasajeros-kilómetro mediante modelos econométricos. Finalmente, para proyectar el consumo de energía regional del modo aéreo a nivel regional se multiplicó la demanda proyectada a nivel regional por un factor de intensidad energético de acuerdo a:

$$CE_{r,t} = PKM_{r,t} * IE_t \qquad \forall\, r, t$$

Donde: $CE_r$ corresponde al consumo de energía del modo aéreo de la región r en el periodo t [unidades de energía]; $PKM_{r,t}$ corresponde a la proyección de demanda asociada al transporte aéreo de pasajeros de cada región r en cada periodo t [pas-km] y $IE_t$ corresponde a la

intensidad de energía consumida por unidad de demanda en cada periodo t [unidad de energía/ pas-km].

Algunas de las principales observaciones destacadas en este modo son:

1. El consumo energético obtenido a partir de la demanda de pasajeros fue asociado únicamente al combustible kerosene de aviación. Para el caso del consumo de combustible gasolina de aviación el resultado se obtuvo a partir de proyecciones directas.

2. Las series históricas de TKM interurbano del modo aéreo no fueron consideradas dentro del modelo, posiblemente dado que su participación es marginal.

#### 3.1.1.3 Modo Marítimo

La serie histórica de demanda de transporte marítimo nacional por región es estimada a partir de la información publicada por DIRECTEMAR en su Boletín Estadístico Marítimo entre los años (1991-2011). La proyección de esta variable a nivel regional hacia el año 2050 es realizada mediante modelos econométricos para cada región.

El consumo de energía regional del modo marítimo es calculado a partir de los datos proyectados de demanda de toneladas-kilómetro para este modo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CE_{r,t,f} = TKM_{r,t} * IE_t * P_f \qquad \forall\, r, t$$

Donde: $CE_{r,t,f}$ corresponde al consumo de energía del modo marítimo nacional de la región r en el periodo t [unidades de energía] y para el combustible consumido f; $TKM_{r,t}$ corresponde a la proyección de demanda asociada al transporte de carga marítimo nacional de cada región r en cada periodo t [pas-km] ; $IE_t$ corresponde a la intensidad de energía consumida por unidad de demanda de transporte de carga en cada periodo t [unidad de energía/ ton-km] y $P_f$ corresponde al porcentaje de participación del combustible f del modo marítimo (diésel o petróleo combustible)

El resumen de los puntos importantes a considerar en la evaluación de la metodología correspondiente al modelo marítimo de carga en territorio nacional es:

1. La serie histórica de demanda por toneladas-kilómetro por región es derivada. Sin embargo, a diferencia del modo caminero, los parámetros requeridos para calcularlo son públicos y correctamente cuantificados. Además, no existen supuestos significativos para su cálculo.

#### 3.1.1.4 Modo Ferroviario

##### 3.1.1.4.1 Carga Ferroviaria

La información de demanda de carga ferroviaria fue obtenida a partir del INE, el cual publica esta información, pero con un nivel de agregación nacional. Una vez asignada la demanda por región, a partir de la información histórica, se realizan modelos econométricos parar proyectar la demanda de toneladas-kilómetro por región.

Finalmente, el consumo de energía de asociada a este modo por región es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CE_{fer,carga} = \frac{TKM_{fer}}{TC_{fer} * FdC_{fer,carga}}$$

Donde: $CE_{fer,carga}$ corresponde al consumo de energía del modo ferroviario de carga [unidades de energía]; $TKM_{fer}$ corresponde a la demanda de toneladas-kilómetro del modo ferroviario {ton-km]; $TC_{fer}$ corresponde a la tasa de carga promedio del modo ferroviario [ton/convoy] y $FdC_{fer,carga}$ corresponde al factor de consumo del modo ferroviario de carga [km-convoy/unidad de energía].

Dentro de los elementos a considerar dentro de la metodología evaluada se encuentran:

1. No se presenta en la metodología la forma en que las toneladas-kilómetros asociadas al transporte ferroviario son asignadas a cada región.

##### 3.1.1.4.2 Pasajeros Ferroviario

Las series históricas de transporte de pasajeros del modo ferroviario en pasajeros-kilómetros se encuentra disponible la Encuesta mensual de ferrocarriles del INE. Sin embargo, esta información no permite separar ni por región, ni tampoco asignar que parte de esta corresponde a los modos urbano o interurbano.

La estimación de PKM urbano e interurbano de pasajeros en el modo ferroviario es estimado a partir de la información disponible de empresas (FESUB, Trenes Metropolitanos, EFE, Merval y METRO) y utilizando como parámetros la distancia media de viajes.

### 3.1.2 Sector residencial

La proyección del consumo energético del sector residencial usa la vivienda como la variable clave para determinar la evolución del sector. La metodología proyecta en una primera etapa la cantidad de viviendas y, luego, a partir de estimaciones de consumo unitario de energía y tenencia de equipos por hogar se proyecta el consumo de energía. La metodología utilizada se basa en la metodología desarrollada en el proyecto MAPS-Chile. El modelo de proyección de demanda del sector residencial está basado en modelo bottom up, cuyos principales drivers para su modelación fueron el crecimiento del parque de viviendas y cambios en el consumo energético unitario.

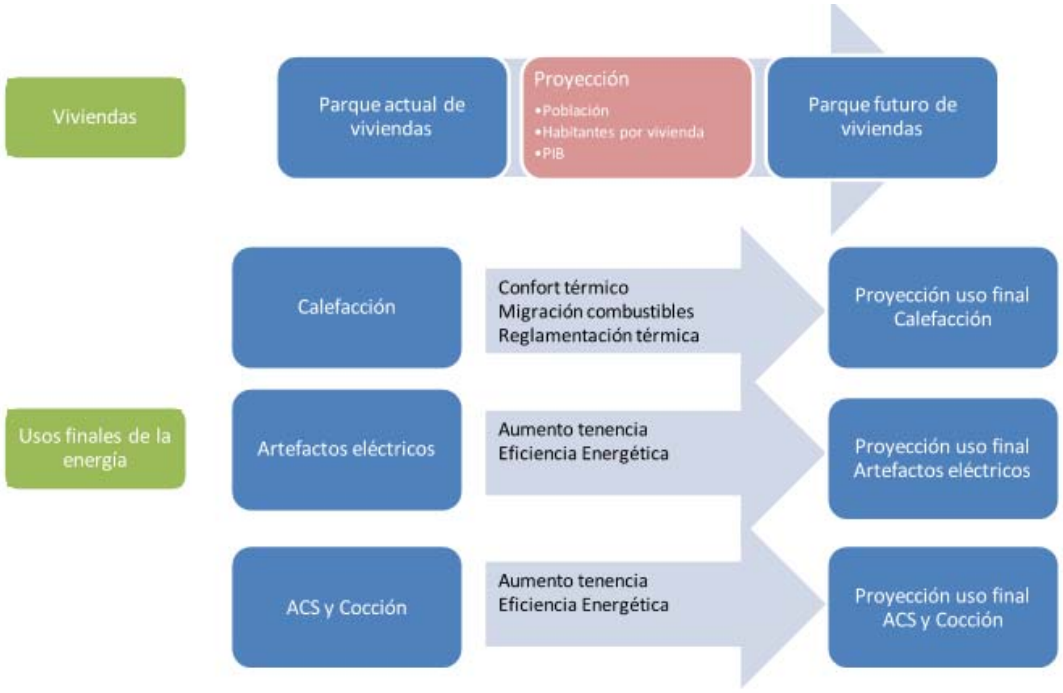



**Figura 22 Esquema para proyectar demanda residencial.**

La siguiente tabla muestra la descripción general del modelo.

**Tabla 13: Principales variables utilizadas para proyectar la demanda de energía del sector residencial**

| Variable proyectada | | Descripción |
|---|---|---|
| Número de viviendas | | • El número de viviendas se proyecta a partir de la proyección de población y de estimaciones del número de personas por hogar: Número de viviendas = Población / Habitantes por vivienda |
| Población | | • La proyección de población se obtiene de las proyecciones realizadas por el INE. |
| Habitantes por vivienda | | • Se calibra modelo econométrico que relaciona el PIB per cápita a paridad de poder de compra (PPC) y el número de habitantes por vivienda. El modelo utilizará datos panel de varios países. |
| Uso de energía por calefacción | Intensidad energética por hogar | • Se estima la demanda de energía por vivienda que se necesita para alcanzar el confort térmico. La demanda térmica depende de la ubicación geográfica y del tipo de vivienda (casa aislada, pareada, departamento, etc.).<br>• El año en que se alcanza el confort térmico depende del ingreso per cápita. Una vez alcanzado el confort térmico el consumo unitario se mantiene constante[4]. El mismo análisis se realiza con el índice GINI[5]<br>• Se incorpora un factor que tiene en cuenta la mejora en la envolvente térmica media de las viviendas. Se tiene en consideración que la proporción de viviendas con reglamento térmico actual aumenta con respecto a las viviendas existentes con peores exigencias de reglamentación. Adicionalmente, se pueden incorporar en este factor medidas de eficiencia energética como reacondicionamiento térmico o mejoras adicionales a la reglamentación térmica.<br>• Otra variable que afecta la intensidad energética en el tiempo es la proyección de la eficiencia de los calefactores. Para el caso de la leña se espera que los calefactores mejoren su eficiencia en el tiempo, disminuyendo la intensidad energética de este energético en el tiempo. Adicionalmente, se pueden incorporar en esta variable medidas de eficiencia energética en calefactores. |
| | Tipo de combustible | • El escenario línea base considera restricciones ambientales que limitan el uso de la leña para calefacción en algunas regiones. Esto tiene como consecuencia un aumento de emisiones debido al uso |

[4] Se estima que entre los 30.000 – 35.000 USD/pers/año, la población prioriza niveles de confort en sus viviendas y todo el parque de viviendas logra ese estatus.

[5] Se estima que con un índice de 0.35 podría alcanzarse el confort térmico para gran parte de la población. De acuerdo con datos de CEPAL el índice GINI actual es de 0.454.

| Variable proyectada | | Descripción |
|---|---|---|
| | | de gas natural, GLP y kerosene. Se esperan realizar sensibilidades con respecto a la proyección de la demanda de uso de la leña debido a que su proyección depende de las políticas futuras que se implementen. |
| Uso de energía por agua caliente sanitaria | Número de hogares con acceso a agua caliente sanitaria | • Se proyecta que el 100% de las viviendas tendrá acceso a agua caliente sanitaria cuando se alcance el PIB per cápita de un país desarrollado. Esta estimación se basará en criterio experto de acuerdo con la evidencia observada en países desarrollados. |
| | Intensidad energética por hogar | • El consumo unitario por vivienda decrece debido a que el principal uso del agua caliente es la ducha y esto a su vez está relacionado con el número de habitantes por vivienda. Se supone, como primer criterio, que el consumo unitario decrece a la misma tasa que decrece el número de habitantes por vivienda. |
| Cocina | Intensidad energética por hogar | • Se supone que el consumo energético unitario se mantiene constante durante el horizonte de evaluación. |
| Consumo eléctrico | Stock de equipos eléctrico | • Se proyecta la tenencia de equipos por hogar (refrigerador, televisores, etc.) a partir de una relación entre el número de equipos por hogar y el ingreso per cápita. El stock crece hasta alcanzar un determinado de nivel de saturación. La proyección se realiza a partir de los niveles de stocks observados en países de mayores ingresos per cápita (España y Estados Unidos) y condiciones similares a las de Chile (supuesto basado en criterio experto). El stock de artefactos del año inicial se estimará a partir de datos de estudio previo de usos finales (Estudio elaborado por la CDT, 2010).<br>• La tenencia de equipos de aire acondicionado por vivienda tiene un tratamiento diferenciado. La tenencia crece hasta alcanzar los niveles observados en ciudades con condiciones climáticas similares a las zonas climáticas de Chile (supuesto basado en criterio experto).<br>• Un consumo adicional se agrega en este ítem para representar otros consumos eléctricos no considerados. El consumo se calcula de tal forma que en el agregado la demanda eléctrica coincida con el Balance Nacional de Energía. Este consumo se mantiene constante durante todo el horizonte de evaluación. |
| | Intensidad energética de equipos eléctricos | • El consumo unitario energético asociado a equipos para el año inicial se estima a partir de datos de estudios previos. Se asumen mejoras en eficiencia energética de los equipos que, adoptadas de |

| Variable proyectada | | Descripción |
|---|---|---|
| | | manera natural, es decir, no constituyen una medida de mitigación. |

Del análisis realizado a la metodología implementada en el estudio anterior se concluye que, si bien, la metodología es adecuada para representar el consumo actual del sector residencial, los resultados obtenidos son muy sensibles a los supuestos y a la información disponible para realizar las trayectorias.

El esquema bottom-up permite desagregar los consumos por combustible y uso final por hogar. Sin embargo, al realizar la agrupación para ajustarse al balance estos dependen, principalmente, de la penetración del uso final por hogar, de la participación supuesta por energético y del número de viviendas por región. A continuación, se realiza el análisis para cada uso final modelado:

**Calefacción**

En el caso del consumo de calefacción la participación de combustibles en este uso final proviene del Estudio Leña (CDT, 2015) que contaba con información desagregada por región, a excepción de las regiones del norte que están agrupadas en una zona geográfica (zona norte). Además, se encuentra agrupado el consumo de Gas Natural y Gas Licuado en un solo consumo, por lo que existe la dificultad de desagregar estos energéticos en regiones donde existe presencia de los dos. Para la proyección de esta variable es necesaria la proyección de la penetración de la calefacción para cada una de las regiones y los cambios entre tecnologías. Estos últimos datos cuentan con poca información disponible para hacer proyecciones por lo que se utilizar criterio experto basándose en algunos supuestos. El uso de calefacción en hogares se asume constante para la zona norte y para las otras regiones un aumento gradual hasta alcanzar el 100% de la penetración. Para los cambios de la tenencia por tipo de combustible se utilizan los siguientes supuestos:

- En el caso de regiones donde hay presencia de gas natural (incluyendo la VI), la presencia del uso de gas natural aumenta.
- En el caso de la leña, se estima en general, que disminuye su presencia como resultado de restricciones medioambientales.
- En el caso del kerosene, se estima que disminuye su presencia, por mayor concientización de la calidad de aire interior.
- La electricidad aumenta su uso debido a su facilidad de uso, y los precios competitivos de las tecnologías.

- En el caso del gas licuado (GLP), su alta presencia nacional que se mantiene o disminuye principalmente como resultado de la mayor presencia de electricidad y gas natural en las regiones donde llega.

Con respecto a la intensidad energética de las viviendas se tiene el detalle regional de viviendas con calefactor principal a leña del estudio(CDT, 2015). En tanto para los otros combustibles, este valor se encuentra en el estudio (CDT, 2011), desagregado por tipo de calefactor y por zona térmica. La proyección de la intensidad energética en calefacción depende de varios factores cada uno proyectado con diferentes supuestos y criterios que se comentan a continuación.

El primer componente de esta proyección corresponde a la mejora en la envolvente térmica de las viviendas. Para realizar esta proyección es necesario estimar la evolución de las pérdidas térmicas de la casa y departamento promedio y para ello se requiere desagregar las viviendas por tipos. En este estudio se consideran las tipologías de viviendas de la tabla:

**Tabla 14 Tipologías de viviendas del sector residencial**

| TIPOLOGÍA | ÁREA (M2) |
|---|---|
| AISLADA 1 PISO | 55 |
| AISLADA 2 PISOS | 72 |
| PAREADA 1 PISO | 45 |
| PAREADA 1 PISO | 65 |
| PAREADA 2 PISOS | 55 |
| PAREADA 2 PISOS | 70 |
| DEPARTAMENTO 1 | 60 |
| DEPARTAMENTO 2 | 70 |

Cada tipología de vivienda para cada zona térmica cuenta con su propio coeficiente de pérdidas térmicas, el cual fue calculado en función de parámetros estructurales de cada tipo de vivienda. Este valor es utilizado para proyectar intensidad energética. Adicionalmente, se separa cada tipología por año de construcción para tomar en consideración la reglamentación térmica vigente.

La segunda componente tiene en cuenta el confort térmico de las viviendas. Para calcular la energía necesaria para alcanzar la temperatura de confort es necesario calcular los grados días de cada región del país y calcular la energía requerida (en kWh/viv) para cada tipología mencionada. Luego, con la proyección del PIB y del índice GINI se determina la trayectoria con

la cual el consumo unitario crece en el tiempo hasta alcanzar cierto nivel de confort. Se utiliza el supuesto que a los 35.000 USD/hab y a los 0.35 de índice GINI se alcanza cierto valor de confort. Para calefactores a gas y parafina se asume que se alcanza un 80% del consumo teórico ideal, para calefactores eléctricos el 50% del consumo y para calefactores a leña el 100%.

Finalmente, el último componente corresponde, a la eficiencia de calefactores. Para el cálculo de este factor se considera una eficiencia del 70% para calefactores a leña existentes y del 74% para calefactores nuevos, asumiendo que se produce el recambio natural de artefactos cada 8 años.

**Artefactos.**

El consumo de artefactos eléctricos se calcula en base al consumo promedio de cada artefacto eléctrico (kWh/equipo), tenencia de artefactos (número de artefactos por vivienda) y al número de viviendas.

El consumo promedio de cada artefacto se obtiene con datos del estudio (CDT, 2011), donde, por ejemplo, el consumo en refrigeración se estima en 516,7 kWh para todas las regiones. En cambio, otros artefactos como iluminación o aire acondicionado presentan consumos distintos para cada una de las 3 zonas térmicas consideradas. El consumo unitario se proyecta con una tendencia a la baja, suponiendo que existen mejoras tecnológicas.

La tenencia de artefactos por hogar se proyecta a partir de los datos obtenidos por el estudio (CDT, 2011), el cual se utiliza como año base y se proyecta en función del PIB de Chile. Para ello se realiza una interpolación lineal entre tenencia actual de cada artefacto y el PIB objetivo (35.000 USD/hab) y la tenencia de países de referencia (España y EEUU).

Finalmente, se agregan consumos adicionales en el consumo de departamentos que corresponden a la iluminación, ascensores y sistemas de bombeos de los condominios. Y otro consumo adicional denominado “Otros” para representar consumos no considerados y cuyo fin practico es el de ajustarse al consumo eléctrico informado en el Balance Nacional de Energía respectivo.

**ACS y cocción.**

El cálculo del escenario base de este uso final considera el consumo unitario informado en el estudio (CDT, 2011). Con estos datos se obtiene el consumo unitario para cada una de las 7 zonas térmicas consideradas en ese estudio. Para ambos casos se utiliza el supuesto que no existen mejoras tecnológicas que impliquen cambios en su intensidad energética, por lo que

se mantiene el valor constante en el tiempo. La única diferencia entre ACS y cocción es que ACS está en función del número de habitantes y el consumo de cocción solo del número de viviendas.

La penetración de ACS corresponde a los datos informados en (CDT, 2011) desagregado por zonas térmicas y su proyección se realiza con el supuesto que se alcanzara el 100% de penetración cuando se alcance el PIB de referencia. En tanto, la penetración de la cocción es del 100% para todo el horizonte.

Al igual que para el uso en calefacción existen supuestos basados en criterio experto para proyectar cambio entre combustibles en el tiempo. Estos supuestos son los siguientes:

- En el caso de regiones donde hay presencia de gas natural (incluyendo la VI), la presencia del uso de gas natural aumenta.
- La electricidad aumenta su uso debido a su facilidad de uso, y a la tendencia de equipamiento eléctrico en edificaciones nuevas los precios competitivos de las tecnologías.
- En el caso del gas licuado (GLP), que corresponde al principal combustible para los usos de ACS y cocción, se estima que mantiene su alta presencia, pero disminuye algo su penetración, como resultado del incremento del gas natural y la electricidad.

### 3.1.3 Sector público

El principal driver que impulsa el consumo de energía el sector público corresponde al parque total de unidades representativas de cada segmento, lo que se proyecta de acuerdo a la caracterización inicial de cada uno de éstos para todas las regiones del país. Por unidades representativas nos referimos al número de colegios, universidades y hospitales. En el proceso de actualización también se incluye edificios públicos y alumbrado público. Otros tipos de edificaciones del sector público son incluidos en forma genérica en la categoría "otros" debido a la falta de información disponible. En base a este stock de unidades representativas, se proyecta el parque futuro en base a indicadores de otros países que presentan un nivel de PIB mayor al caso chileno. Adicionalmente se dispone de la intensidad energética de los principales usos para cada uno de los segmentos definidos, lo que permite llevar a cabo la proyección de consumo de manera desagregada.

En este sector se reconocen cuatro (4) segmentos: colegios, universidades, hospitales y Otros.

Con respecto a la metodología se puede señalar que, para los segmentos Colegios, Universidades y Hospitales:

- Se proyecta el número de unidades de cada segmento linealmente de acuerdo al crecimiento de la población regional.
- Se considera un consumo específico anual para cada segmento en kWh por metro cuadrado de superficie. Este consumo específico varía para cada año del horizonte de evaluación, sin embargo, no está diferenciado por región.
- Se considera una unidad tipo con una determinada superficie representativa para cada segmento. Esta superficie es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.
- Luego, el consumo del energético $k$ del segmento $s$ se calcula como:

$$E_{s,k} = N_s \cdot S_s \cdot I_{s,k} \cdot C_s$$

Donde:

  - $E_{s,k}$: Consumo del energético $k$ del segmento $s$ [kWh]
  - $N_s$: Número de unidades del segmento $s$
  - $S_s$: Superficie de la unidad tipo [m$^2$]

- $I_{s,k}$: Intensidad del uso del energético $k$ en el segmento $s$ [%]
- $C_s$: Consumo específico del segmento $s$ [kWh/m$^2$]

- Se considera que la proporción de usos finales de energía de cada segmento es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.

- Asimismo, la proporción de los energéticos utilizados para cada uso final de cada segmento es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.

En cuanto al segmento "Otros":

- El consumo de energía de este segmento en el primer año se calcula como la diferencia entre el consumo de energía según el Balance Nacional de Energía y la suma de los consumos de los segmentos Colegios, Universidades y Hospitales.
- Para los demás años, se proyecta el consumo de energía de acuerdo a una proyección lineal del consumo energético en función del PIB per cápita.
- No se considera una representación de usos finales de este segmento.
- No obstante lo anterior, el segmento Otros representa aproximadamente el 70% del consumo del sector Público.

### 3.1.4 Sector comercial

El principal driver que impulsa el consumo de energía en el sector comercial corresponde al parque total de unidades representativas de cada segmento, lo que se proyecta de acuerdo a la caracterización inicial de cada uno de éstos para todas las regiones del país. Por unidades representativas nos referimos al número de supermercados, malls, clínicas y bancos. Otros tipos de comercios son incluidos en forma genérica en la categoría "otros" debido a la falta de información disponible. En base a este stock de unidades representativas, se proyecta el parque futuro en base a indicadores de otros países que presentan un nivel de PIB mayor al caso chileno. Adicionalmente se dispone de la intensidad energética de los principales usos para cada uno de los segmentos definidos, lo que permite llevar a cabo la proyección de consumo de manera desagregada.

Con respecto a la metodología se puede señalar los siguientes supuestos:

- Se reconocen cinco (5) segmentos: supermercados, malls, clínicas, bancos y otros. La categoría "otros" incluye aquellos comercios que no es posible caracterizarlos debido a la falta de información disponible.
- Son considerados supermercados los locales comerciales con tres (3) o más cajas registradoras.
- Son considerados malls aquellos centros comerciales cuya superficie arrendable es mayor a 7.000 $m^2$.
- Son consideradas clínicas aquellos establecimientos de salud no pertenecientes al Sistema Nacional de Servicios de Salud.
- Son considerados bancos aquellos reconocidos por la Superintendencia de Bancos e Instituciones Financieras.

Además, es posible observar que, para los segmentos supermercados, malls, clínicas y bancos:

- Se proyecta el número de unidades de cada segmento linealmente de acuerdo al crecimiento de la población regional.

- Se considera un consumo específico anual para cada segmento en kWh por metro cuadrado de superficie. Este consumo específico varía para cada año del horizonte de evaluación, sin embargo, no está diferenciado por región.
- Se considera una unidad tipo con una determinada superficie representativa para cada segmento. Esta superficie es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.

- Luego, el consumo del energético $k$ del segmento $s$ se calcula como:

$$E_{s,k} = N_s \cdot S_s \cdot I_{s,k} \cdot C_s$$

Donde:

  - $E_{s,k}$: Consumo del energético $k$ del segmento $s$ [kWh]
  - $N_s$: Número de unidades del segmento $s$
  - $S_s$: Superficie de la unidad tipo [$m^2$]
  - $I_{s,k}$: Intensidad del uso del energético $k$ en el segmento $s$ [%]
  - $C_s$: Consumo específico del segmento $s$ [$kWh/m^2$]
- Se considera que la proporción de usos finales de energía de cada segmento es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.
- Asimismo, la proporción de los energéticos utilizados para cada uso final de cada segmento es la misma a nivel país, y no varía en el tiempo.

En cuanto al segmento “Otros”:

- El consumo de energía de este segmento en el primer año se calcula como la diferencia entre el consumo de energía según el Balance Nacional de Energía y la suma de los consumos de los segmentos supermercados, clínicas, malls y bancos.
- Para los demás años, se proyecta el consumo de energía de acuerdo a una proyección lineal del consumo energético en función del PIB per cápita.
- No se considera una representación de usos finales de este segmento.
- No obstante lo anterior, el segmento Otros representa aproximadamente el 60% del consumo del sector comercial.

### 3.1.5 Sector industria y minería

Este sector corresponde a las industrias de: azúcar, cemento, papel y celulosa, pesca, petroquímica, siderurgia e industrias varias. El consumo energético es impulsado por diversas variables en cada una estas industrias. A modo de ejemplo, a continuación se describe brevemente las metodologías para las industrias del cemento, papel y celulosa e industrias varias:

- Industria del cemento: Se utiliza un modelo econométrico que relaciona la cantidad de toneladas procesadas de cemento con el PIB nacional, mientras que el consumo de energía se estima a partir de estimaciones de intensidad energética (TJ/t material procesado) y la proyección de material procesado.
- Industria de papel y celulosa: El consumo energético depende de la proyección de la producción de celulosa. El consumo de energía se estima a partir de estimaciones de intensidad energética y la producción de celulosa.
- Industrias varias: Debido a la falta de información para desagregar esta categoría, se utiliza un modelo que correlaciona el consumo energético con el PIB nacional.

En síntesis, la proyección de producción de cada subsector está basada principalmente en modelos econométricos y proyecciones de organismos expertos.

**Tabla 15: Drivers utilizados para proyectar demanda energética para cada subsector del sector industria y minería**

| Sector | Driver | Modelo |
|---|---|---|
| **Hierro** | Producción | M. Econométrico sobre PIB Asia Pacifico. |
| **Salitre** | Producción | M. Econométrico sobre PIB Asia Pacifico. |
| **Minas Varias** | Producción | M. Econométrico sobre PIB Mundial. |
| **Celulosa** | Producción | Intensidad por disponibilidad de suelos. |
| **Siderurgia** | Producción | Saturación de mercado. |
| **Cemento** | Producción | M. Econométrico sobre PIB de Chile |
| **Azúcar** | Producción de remolacha | Modelo sobre mejoras en renidimiento de la hectárea. |
| **Pesca** | Producción | Proyección constante por información del mercado. |
| **Industrias Varias** | PIB de Chile | Modelo de intensidad. |
| **Petroquímica** | Producción | Saturación de mercado. |

La metodología utilizada para la proyección energética es del tipo top-down donde para cada sector se desagrega el balance energético regional por uso final y energético. Luego, se calcula la intensidad del uso final con respecto a la energía útil y la producción regional. Con estos cálculos y la proyección de la producción se calcula la demanda energética.

#### 3.1.5.1 Descripción de modelo del sector cobre

El sector cobre tiene como driver el material procesado para cada subproceso modelado (dependiente de ley del cobre, recuperación de material, etc.), con excepción del sector servicios que se calcula respecto a la Producción fina. La siguiente figura describe los principales procesos modelados.

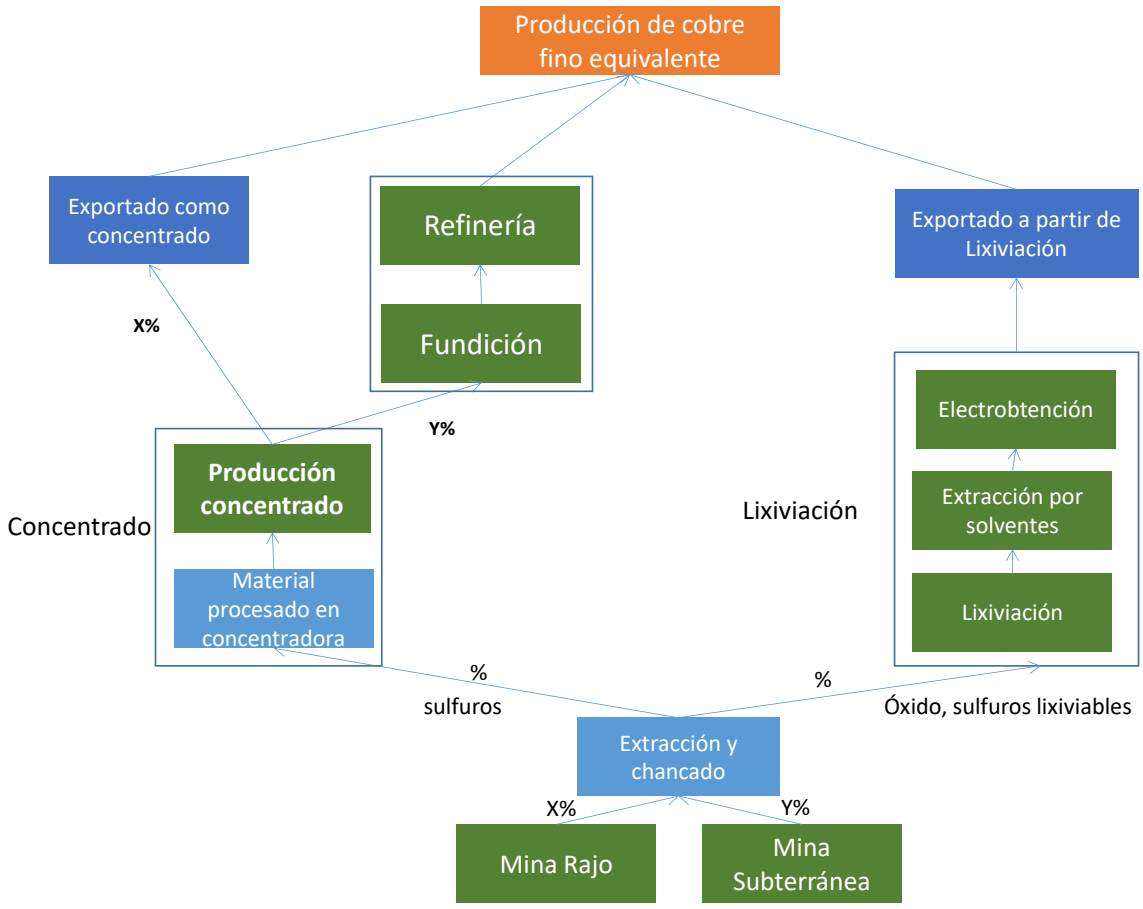



**Figura 23: Descripción general de procesos representados**

Las principales características del modelo se describen a continuación:

- La metodología usada se basa en los antecedentes generados por COCHILCO (COCHILCO, 2017).
- Los procesos considerados corresponden a: Mina Rajo, Mina Subterránea, Concentrado, Lixiviación, Fundición, Refinería, Servicios y Desalinización.
- Entre los energéticos considerados se encuentran: Petróleo Diésel, Gas Licuado, Electricidad, Gas Natural, Biogás, Hidrógeno, Energía Solar, Petróleos Combustibles, Coque de Petróleo, Carbón Coque, Mineral Leña, Biomasa Kerosene.
- Para el cálculo de energía demandada según cada energético i se realiza cálculo de la Energía en base al total del Material Procesado (MP), considerando la Participación y Eficiencia del Energético i en cada Proceso j:
  - $Consumo\ regional\ Energético\ i = \sum_j^{Procesos} \left( MP_j \cdot I_j \cdot \frac{Participación_{ij}}{Eficiencia_{ij}} \right)$
- En el caso del sector de Servicios se realiza el cálculo respecto a la Producción de Cobre fino total por región:
  - $Consumo\ regional\ Energético\ i = \sum_j^{Procesos} \left( Prod_j \cdot I_j \cdot \frac{Participación_{ij}}{Eficiencia_{ij}} \right)$
- El proceso de desalinización es calculado considerando un factor de planta proporcional a las horas de servicio y ponderado por la suma de las potencias de desalinización más la de bombeo a una altura promedio de las faenas en la cordillera.

Principales comentarios a metodología:

- Modelo detallado en términos de usos finales, sin embargo, varios parámetros son difíciles de actualizar y requieren supuestos importantes (intensidades energéticas, leyes de los minerales, participación de combustibles, participación rajo abierto/mina subterránea, participación sulfuros/óxidos, etc.).
- Supone que las leyes de los minerales son iguales para todas las regiones.

#### 3.1.5.2 Descripción de otros modelos

Los otros sectores industriales modelados son: salitre, hierro, papel y celulosa, siderurgia, petroquímica, cemento, azúcar, pesca, industrias y minas varias. Para cada sector se identifican los principales drivers que describen el comportamiento del sector económico y son proyectados en función de sus respectivas series macroeconómicas. Esta metodología es aplicable a todos los sectores mencionados. Adicionalmente, cada sector se desagrega en tres usos finales: motrices, térmicos y otros consumos eléctricos para representar los principales procesos demandantes de energía. Con esta desagregación y con datos de eficiencias por energéticos se calcula la energía útil de la industria que corresponde a la fracción de la energía demandada que es transformada en la energía necesaria para producir una unidad del bien. El cálculo de la energía útil es importante puesto que es la variable utilizada para el cálculo de la intensidad real del sector económico. Con la intensidad real es posible calcular cambios en la demanda energética del sector, aplicando medidas de eficiencia energética o cambios tecnológicos en los procesos.

La desagregación en usos finales es realizada con información de estudios previos y su proporción es constante para cada sector, es decir, no depende de la ubicación geográfica y es la misma para todo el periodo. Esta es una de las variables que el consultor actualizó en el modelo con información de estudios recientes llevados a cabo por el Centro de Energía.

Las principales variables utilizadas para proyectar demandas de estos sectores industriales se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 16 Descripción de variables utilizadas en modelación del sector industria y minería**

| Variable proyectada | Descripción |
|---|---|
| Nivel de actividad | • Variable que mejor representa la actividad del sector. Por ejemplo, producción de remolacha para el sector azúcar.<br>• Las fuentes de información dependen de cada sector. Fueron utilizados datos existentes a la fecha del estudio.<br>• La desagregación regional depende de los datos existentes. Por ejemplo, los datos relativos a producción minera se encuentran desagregados regionalmente en el anuario de Cochilco. En caso de que no exista desagregación regional se aplican supuestos adicionales. |
| Demanda de energía. | • Corresponde al consumo energético de cada sector modelado. Su desagregación es por energético y regional. |

| Variable proyectada | Descripción |
|---|---|
| | • Los datos del año base se obtienen directamente del BNE del año respectivo.<br>• La proyección depende de la intensidad calculada, la proyección del nivel de actividad, eficiencias por uso final y energéticos y fracción de uso por combustible. |
| Fracción del energético destinado a cada uso final | • Variable que representa que porcentaje del consumo de un energético es utilizada en cada uno de los tres usos finales modelados. Por ejemplo, porcentaje del consumo eléctrico destinado a motores en el sector hierro.<br>• Los datos fueron obtenidos de encuestas realizados a empresas el año 2011.<br>• Su valor es único para cada sector y se mantiene constante en el tiempo. |
| Rendimiento | • Variable que determina la fracción de la demanda del energético para cada uso final que es transformada en energía útil.<br>• Corresponde al driver más importante para modelar medidas de eficiencia energética y recambio de tecnologías.<br>• Los datos son obtenidos de diversas fuentes para cada energético y uso final. |
| Intensidad | • Variable que representa el consumo de energía por cada unidad producida para cada sector.<br>• Es calculada en función de los datos anteriores. |

Comentarios:

- Los consumos energéticos del año base se encuentran disponibles con desagregación regional, por lo que es una variable fácil de actualizar.
- La calidad de información del nivel de actividad depende de cada sector. Para algunos sectores, como el minero, esta información se encuentra bien documentada con desagregación regional. Otros sectores cuentan con menos información y es necesario hacer cálculos adicionales.
- Los modelos de proyección son sensibles a la calidad y cantidad de información histórica disponible. El consultor evaluara la necesidad de actualizar los modelos econométricos utilizados.
- La desagregación por uso final fue realizada en base a encuestas a empresas el año 2011. El valor utilizado en el estudio previo podría no ser representativo del sector en su conjunto.

## 3.2 Actualización de modelo transporte

### 3.2.1 Metodología de cálculo de demanda de transporte caminero

El proceso de actualización consideró la actualización de la serie histórica de PKM y TKM. El último año para el cual se cuenta información de balances de energía (tanto nacional como regional) e informes estadísticos de consumo de combustible de SEC, requeridos para la actualización del modelo es el año 2017, por lo tanto, será este el considerado como nuevo año base.

El resumen de los parámetros analizados para actualización del modelo transporte para el subsector caminero son presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 17: Actualización del modelo de transporte – Modo Caminero**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Consumo de combustible por modo ($CC_i$) | Informes Estadísticos de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles | Regional | Anual 1998 – 2017 |
| | Balance Regional de Energía del Ministerio de Energía | Regional | Anual 2014 – 2017 |
| Número de vehículos por categoría ($N_{veh}$) | Anuario del parque de vehículos motorizados en Chile del Instituto Nacional de Estadísticas – Agrupable en Vehículos particulares, Taxis, Motos, Buses, Camiones y Tractocamiones. | Regional | Anual 2001 – 2018 |
| Niveles de actividad ($NA_i$) | Niveles de actividad de estudio previo (MODAGEM), Estudio "análisis Sistema de Compensación de Emisiones de Fuentes Móviles" | Regional | Anual 2010 (1 año) |
| | Simulaciones MODEM 2010, 2015 | Ciudades | Anual 2010, 2015 |
| | RETC del Ministerio de Medio Ambiente | Ciudades | Varios años |
| | DTPM Niveles de actividad de buses y Metro | RM | 2012-2018 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | DTPR Niveles de actividad buses | (Por confirmar) | (Por confirmar) |
| | Programa Giro Limpio de la Agencia Chilena de Sostenibilidad Energética | RM | 1 año |
| Rendimiento de combustible ($FdC_i$) | Rendimiento de combustible | Regional | 1 año |
| | RETC del Ministerio de Medio Ambiente | Ciudades | Varios años |
| | Programa Giro Limpio de la Agencia Chilena de Sostenibilidad Energética | RM | 1 año |
| Tasas de ocupación ($TO_i$) y Tasas de Carga ($TC_i$) | Tasa de Ocupación de estudio previo (SINTIA) | Por región | 1 año |
| | Información de EOD actualizadas | Ciudades | 1 año |
| | Programa Giro Limpio de la Agencia Chilena de Sostenibilidad Energética | RM | 1 año |

El procesamiento de la Encuesta Anual de Vehículos en Circulación del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) para el año 2017, permitió actualizar la matriz de vehículos por tipo, región y tipo de motor. Esta información permite actualizar el parámetro ($N_{i,j}$) que permitirá actualizar la matriz de participación en el consumo de combustibles. La tabla actualizada es presentada a continuación:

**Tabla 18 Número de vehículos por tipo, región y tecnología**

| Parque Gasolina INE | | | Vehículo Liviano | Vehículo Mediano | Taxi | Buses Urbanos | Buses Interurbanos | Camiones | Tractocamiones | Moto |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Región I | veh | Parámetro | 71,226 | 2,834 | 2,956 | | | | | 1,997 |
| Región II | veh | Parámetro | 93,117 | 12,475 | 4,860 | | | | | 3,603 |
| Región III | veh | Parámetro | 49,325 | 10,330 | 2,533 | | | | | 2,227 |
| Región IV | veh | Parámetro | 118,758 | 23,740 | 4,000 | | | | | 6,588 |
| Región V | veh | Parámetro | 335,767 | 43,390 | 8,897 | | | | | 15,692 |
| Región VI | veh | Parámetro | 164,455 | 29,921 | 3,587 | | | | | 9,933 |
| Región VII | veh | Parámetro | 183,169 | 42,931 | 2,378 | | | | | 14,019 |
| Región VIII | veh | Parámetro | 312,266 | 67,556 | 5,569 | | | | | 17,822 |
| Región IX | veh | Parámetro | 120,014 | 32,700 | 2,641 | | | | | 6,072 |
| Región X | veh | Parámetro | 120,646 | 24,358 | 4,177 | | | | | 4,659 |
| Región XI | veh | Parámetro | 17,362 | 3,765 | 620 | | | | | 542 |
| Región XII | veh | Parámetro | 38,887 | 4,607 | 805 | | | | | 1,034 |
| Región RM | veh | Parámetro | 1,324,896 | 142,608 | 33,879 | | | | | 89,658 |
| Región XIV | veh | Parámetro | 50,941 | 10,825 | 1,459 | | | | | 2,458 |
| Región XV | veh | Parámetro | 42,602 | 1,714 | 687 | | | | | 1,369 |
| **Parque Diésel INE** | | | **Vehículo Liviano** | **Vehículo Mediano** | **Taxi** | **Buses Urbanos** | **Buses Interurbanos** | **Camiones** | **Tractocamiones** | **Moto** |
| Región I | veh | Parámetro | 24,142 | 15,827 | 760 | 1,098 | 202 | 3,907 | 1,573 | - |
| Región II | veh | Parámetro | 7,235 | 25,029 | 432 | 2,731 | 46 | 7,696 | 3,552 | 3 |
| Región III | veh | Parámetro | 4,074 | 17,045 | 258 | 1,959 | - | 5,771 | 3,733 | 3 |
| Región IV | veh | Parámetro | 10,783 | 33,220 | 1,800 | 1,781 | 385 | 7,862 | 1,403 | 9 |
| Región V | veh | Parámetro | 30,082 | 68,481 | 2,704 | 6,209 | 150 | 14,642 | 5,344 | 34 |
| Región VI | veh | Parámetro | 13,789 | 46,434 | 1,378 | 3,219 | 475 | 11,552 | 3,026 | 15 |
| Región VII | veh | Parámetro | 18,759 | 60,925 | 1,791 | 3,858 | 156 | 14,810 | 4,569 | 5 |
| Región VIII | veh | Parámetro | 26,222 | 84,394 | 1,397 | 7,358 | 265 | 20,209 | 5,555 | 2 |
| Región IX | veh | Parámetro | 11,831 | 43,011 | 826 | 3,103 | 166 | 10,092 | 1,408 | 9 |
| Región X | veh | Parámetro | 13,797 | 44,705 | 713 | 3,222 | 351 | 10,406 | 2,006 | 22 |
| Región XI | veh | Parámetro | 5,952 | 10,065 | 39 | 270 | 1 | 2,010 | 249 | - |
| Región XII | veh | Parámetro | 9,219 | 10,321 | 23 | 382 | 78 | 2,575 | 925 | - |
| Región RM | veh | Parámetro | 98,912 | 231,026 | 3,637 | 8,634 | 3,489 | 52,227 | 13,047 | 42 |
| Región XIV | veh | Parámetro | 5,413 | 16,383 | 471 | 1,326 | 19 | 4,154 | 659 | 6 |
| Región XV | veh | Parámetro | 17,315 | 8,892 | 1,247 | 629 | 53 | 2,179 | 1,137 | - |

Los tipos de vehículos fueron agrupados de acuerdo a la metodología presentada en el estudio previo. En la categoría Vehículo Liviano son considerados las categorías INE: Automóvil y station Wagon. En la categoría Vehículo Mediano son considerados las categorías INE: Camioneta, Furgón, Minibús (Kleinbus, Van) particular y Todo terreno. La categoría Bus Urbano considera: los buses periféricos, rural corriente, urbano corriente y urbano licitado de las estadísticas del transporte público del MTT. La categoría Bus Interurbano considera los servicios interurbanos de las estadísticas del transporte público del MTT. La categoría camiones incluye: camiones simples, tractor agrícola y otros con motor del transporte de carga. La categoría taxi incluye: taxi básico, taxi colectivo y taxi turismo. A partir de la nueva información disponible se opta por desagregar la categoría Tractocamión en una nueva categoría.

Los niveles de actividad ($NA_{i,j}$) de los vehículos fueron actualizados de acuerdo a la nueva clasificación. Se utilizó como información de base, los niveles de actividad de las categorías presentadas en el estudio previo (en proceso de revisión nuevas fuentes de información). La matriz de niveles de actividad actualizada es presentada en la siguiente tabla:

La siguiente tabla muestra los niveles de actividad promedio por categoría y región. Las categorías actualizadas corresponden principalmente a tractocamiones y camiones. La información de niveles de actividad y rendimiento de la categoría tractocamiones fue obtenida a partir de la información agregada del programa Giro Limpio, información provista por la Agencia Chilena de Sostenibilidad Energética. La información, si bien de una muestra acotada, corresponde al promedio de 2.828 camiones de carga interurbana. Esta información fue extendida para todo el resto de las regiones.

Los niveles de actividad de la nueva categoría camiones consideran como nivel de actividad promedio los valores presentados en el estudio "Análisis y Desarrollo de Factores de Deterioro y Caracterización de las Emisiones de la Flota mediante el Sistema *Remote Sensing Devices* (RSD)" para camiones livianos.

Los rendimientos de combustible se mantienen respecto a los utilizados en el estudio previo. Se agrega el rendimiento de la categoría Tractocamión. El rendimiento de combustible para esta categoría utilizado es de 2,27 km/l. Este valor corresponde a información promedio agregada para camiones pertenecientes al programa Giro Limpio.

La información actualizada de los parámetros antes mencionados permitió actualizar la matriz de participación de consumo de combustible de cada categoría ($X_i$), requerida por la metodología utilizada para estimar los pasajeros-kilómetros y las toneladas-kilómetros del modo caminero.

La matriz de participación por categoría vehicular, combustible y región es presentada en la siguiente tabla. Los PKM para cada región en cada año t serán calculadas de acuerdo a:

$$PKM = \sum_{m}^{M} CC_{gasolina} * X_m * TO_m * FdC_{gasolina,m} + \sum_{m}^{M} CC_{diésel} * X_m * TO_m * FdC_{diésel,m}$$

Los modos considerados para cuantificar los PKM por ciudad fueron: Vehículos Particulares, Bus, Motocicletas y Taxis.

La misma metodología se utiliza para cuantificar los TKM por región para cada año de acuerdo a:

$$TKM = \sum_{m}^{M} CC_{gasolina} * X_m * TO_m * FdC_{gasolina,m} + \sum_{m}^{M} CC_{diésel} * X_m * TO_m * FdC_{diésel,m}$$

En este caso, las tonaldas-kilómetros son contabilizadas por los modo camión y tractocamión. La actualización a los parámetros permitió actualizar la serie histórica de pasajeros-kilómetros y toneladas-kilómetros por región. Dichos valores fueron utilizados para actualizar los modelos econométricos. Los valores 2017, fueron utilizados como valor de entrada en el año base.

Se realizaron diversas entrevistas a instuciones públicas orientadas a obtener series de TKM caminero que permitiera utilizar series históricas no derivadas para su proyección, o al menos obtener cifras que permitieran contrastar los valores obtenidos mediante la metodología realizada. Pese a que los resultados, no han sido positivos hasta ahora, quedan reuniones pendientes por realizar.

Para complementar el cálculo de pasajeros-kilómetro de aquellos medios que no utilizan combustibles (gasolina/diésel) y, que por lo tanto, no son considerados dentro de la metodología de cuantificación de PKM (como trenes urbanos y bicicletas), se utiliza información adicional de fuentes exógenas.

Por una parte, para estimar la demanda de transporte en pasasjeros-kilómetros del modo bicicleta, son multiplicados el número de viajes anuales por la distancia media de viaje (ambos datos disponibles en EOD), y la tasa de ocupación media (típicamente 1). Esto permite calcular una partición modal en PKM respecto al total compuesto por todos los otros modos.

Para el caso de las ciudades que cuentan con sistemas de transporte urbano de trenes, los cuales utilizan electricidad, y por tanto no son considerados dentro de la meteodología de cuantificación de PKM, fueron considerados los datos de número de transacciones anuales (equivalente al número de viajes) y la distancia media de viajes en este modo. De este modo se obtiene la demanda de pas-km para esta categoría. Un ejemplo de la información requerida para esta cuantificación es lo presentado en la siguiente tabla:

**Tabla 19 Resumen anual de datos del Sistema de transporte Público de la ciudad de Santiago DTPM**

| Sistema | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Transacciones anuales (millones) | 1.684 | 1.678 | 1.641 | 1.583 | 1.553 | 1.562 | 1.631 |
| Promedio de transacciones en día laboral | 5.307.685 | 5.595.675 | 5.499.232 | 5.304.674 | 5.200.631 | 5.298.120 | 5.509.621 |
| Viajes anuales (millones) | 1.087 | 1.094 | 1.077 | 1.047 | 1.037 | 1.051 | 1.100 |
| Nº de unidades de negocio de buses | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Nº de empresas concesionarias de buses | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Otros operadores de transporte | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Estaciones de Intercambio modal | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| **Buses** | | | | | | | |
| Transacciones anuales (millones) | 1.036 | 1.010 | 973 | 922 | 881 | 868 | 892 |
| Promedio de transacciones en día laboral | 3.184.289 | 3.327.495 | 3.227.563 | 3.061.457 | 2.928.639 | 2.921.837 | 2.984.797 |
| Viajes anuales (millones) | - | - | - | - | 528,0 | 527,9 | 546,6 |
| Nº de buses [1] | 6.298 | 6.493 | 6.513 | 6.550 | 6.646 | 6.681 | 6.756 |
| Nº de servicios | 374 | 368 | 371 | 379 | 378 | 377 | 380 |
| Plazas [1] | 642.964 | 665.980 | 674.391 | 676.685 | 682.642 | 685.257 | 690.954 |
| Kilómetros recorridos (millones) [2] | 469,47 | 463,75 | 459,93 | 460,00 | 458,69 | 452,8 | 449,1 |
| Longitud de la red vial cubierta por buses (km) [3] | 2.766 | 2.770 | 2.790 | 2.817 | 2.821 | 2.834 | 2.946 |
| Nº de paradas | 11.165 | 11.271 | 11.325 | 11.328 | 11.339 | 11.261 | 11.327 |
| Vías segregadas (km) | 62 | 68 | 69 | 70 | 72 | 81 | 83 |
| Vías exclusivas (km) | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 |
| Pistas solo bus (km) | 119 | 119 | 119 | - | - | na | na |
| Pistas Solo Bus (kms -Sentido) [4] | - | - | 161 | 180 | 200 | 203 | 205 |
| Cámaras de fiscalización | 110 | 234 | 234 | 266 | 273 | 405 | 469 |
| **Metro** | | | | | | | |
| Transacciones anuales (millones) | 649 | 668 | 669 | 662 | 672 | 686 | 720 |
| Promedio de transacciones en día laboral | 2.123.396 | 2.268.180 | 2.271.669 | 2.243.218 | 2.271.993 | 2.349.926 | 2.461.469 |
| Viajes anuales (millones) | 477 | 494 | 497 | 497 | 509 | 519 | 542 |
| Número de líneas | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| Nº de trenes | 190 | 186 | 186 | 186 | 186 | 202 | 206 |
| Nº de coches | 1.030 | 1.093 | 1.093 | 1.093 | 1.093 | 1.153 | 1.180 |
| Plazas | 186.294 | 194.429 | 194.429 | 194.429 | 194.429 | 225.715 | 231.287 |
| Kilómetros recorridos (millones) | 132 | 143 | 140 | 138 | 135 | 136 | 147 |
| Longitud de la red (km) | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 119 | 119 |
| Nº de estaciones | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 118 | 118 |
| **MetroTren Nos** | | | | | | | |
| Transacciones anuales (millones) | na | na | na | na | na | 8,1 | 19,37 |
| Promedio de transacciones en día laboral | na | na | na | na | na | 33.558 | 63.355 |
| Viajes anuales (millones) | na | na | na | na | na | 4,8 | 10,9 |

En este caso, la información de transacciones anuales de Metro y la distancia media viajes de 9,1 km promedio (de acuerdo a EDO 2012) para este modo, permiten calcular la demanda anual de pasajeros-kilómetro por este modo. La demanda calculada es sumada a obtenida mediante la metodología propuesta.

### 3.2.2 Actualización de demanda de transporte aéreo nacional

Se revisaron las series históricas de demanda por transporte aéreo a nivel regional obtenidas a partir de los informes de tráfico entre pares de ciudades nacionales publicados por la Junta de Aeronáutica Civil (JAC), entre el periodo 2005-2018. Los datos agregados de cabotaje a nivel nacional para pasajeros (en pasajeros-kilómetros) entre el periodo 1984-2012 fueron obtenidos del estudio "Estimación de Demanda por Transporte Aéreo Nacional e Internacional en Chile" encargado por la JAC en 2013. En las siguientes figuras se presentan los datos de demanda aérea cabotaje regional por transporte de pasajeros (en miles PKM) y carga (en miles TKM).

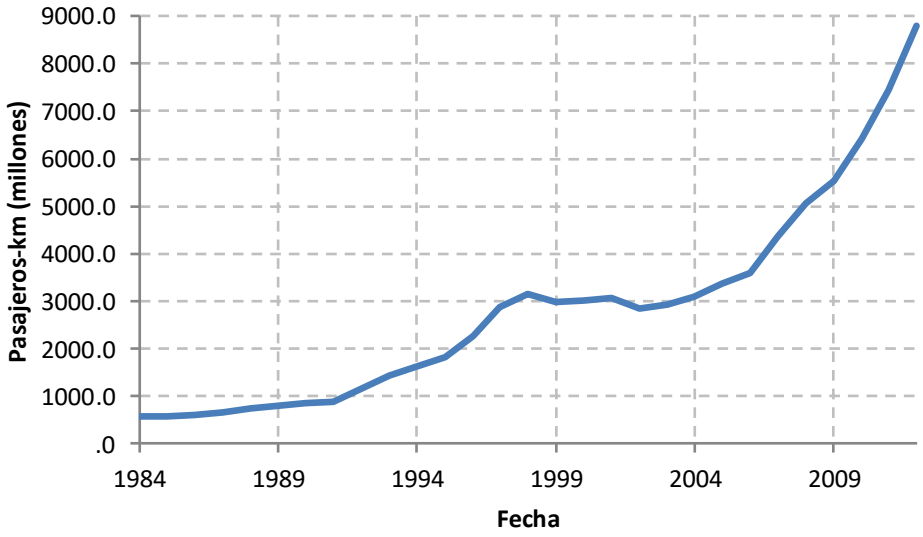



Figura 24 Datos históricos de demanda cabotaje nacional

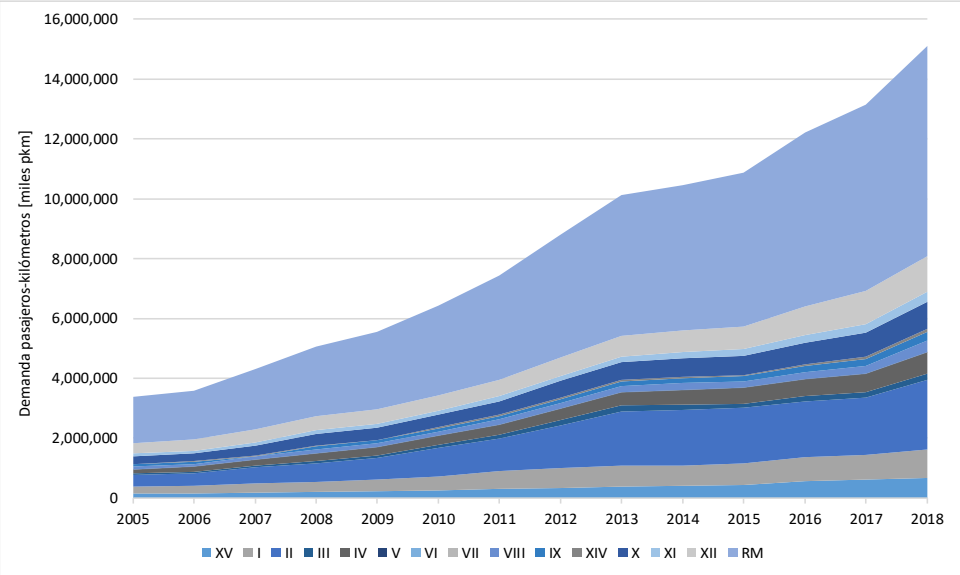



**Figura 25 Demanda nacional de transporte aéreo en pasajeros-kilómetro por región**
Fuente: Elaboración Propia

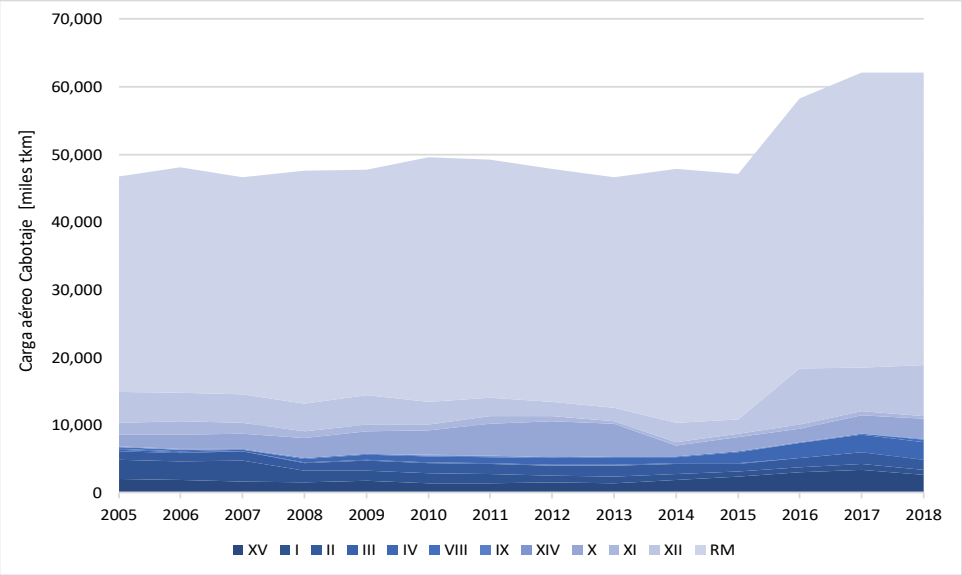



**Figura 26 Demanda nacional de transporte aéreo en toneladas-kilómetro por región**
Fuente: Elaboración Propia

Un elemento importante a destacar es que para este modo es que la información requerida para los modelos econométricos es de uso directo, es decir, no se requieren cálculos adicionales para obtenerlos, lo que reduce la incertidumbre en los datos que alimentan a los modelos econométricos.

### 3.2.3 Actualización de carga ferroviaria

La red del transporte ferroviario de carga está compuesto por la Red Norte, comprendida entre Iquique y La Calera, operan las empresas Ferrocarril de Antofagasta (FCAB), Empresa de Transporte Ferroviario S.A. (FERRONOR), Compañía Minera del Pacífico S.A. (CMP) y Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), y la Red Sur, que se extiende entre La Calera y Puerto Montt, es administrada por la Empresa de Los Ferrocarriles del Estado (EFE), y sobre ella operan los porteadores privados de carga Ferrocarriles del Pacífico S.A. (FEPASA) y Transporte Ferroviario Andrés Pirazzoli S.A. (TRANSAP).

El Observatorio Logístico del Ministerio de Transporte y telecomunicaciones y el Instituto Nacional de Estadística cuentan con información de la demanda ferroviaria por transporte de carga en toneladas-kilómetro, pero agregada a nivel nacional.

Si bien la serie temporal del observatorio logístico es más corta (2014-2017), esta parece ser más precisa. Los datos del INE se basan en información entregada por cada empresa corresponde a la carga en toneladas transportada en el mes. En las toneladas totales, por tanto, puede contabilizarse más de una vez la misma carga que fue transportada por distintas empresas hasta su destino final. Los datos de carga ferroviaria de las distintas fuentes son presentadas en la siguiente tabla:

**Tabla 20 Movimiento de carga ferroviaria nacional en toneladas-kilómetro**

| Año | INE | Observatorio Logístico |
|---|---|---|
| 2010 | 3,833,632,000 | |
| 2011 | 4,118,699,000 | |
| 2012 | 4,089,739,000 | |
| 2013 | 3,981,463,000 | |
| 2014 | 4,103,932,000 | 3,638,000,000 |
| 2015 | 4,085,725,000 | 3,570,000,000 |
| 2016 | 4,076,749,000 | 3,577,000,000 |
| 2017 | 3,790,427,642 | 3,765,000,000 |
| 2018 | 3,861,920,403 | |

Pese a los posibles dobles conteos de la carga en la encuesta mensual del INE, será utilizada la información aportada por esta fuente de información, al ser esta una serie más larga y

consistente con las series observadas en el estudio previo. Esta información es incorporada a las series históricas como datos de entrada para el modelo econométrico.

### 3.2.4 Actualización de la demanda por carga marítima cabotaje

Para la actualización de los datos de demanda de transporte de carga entre puertos chilenos se propone la construcción de una serie derivada a partir de la carga entre puertos (toneladas). Publicadas en los boletines estadísticos marítimos de la DIRECTEMAR y la distancia entre estos.

Los datos de cabotaje marítimo son publicados anualmente por la DIRECTEMAR en su Boletín Estadístico Marítimo. Entre la información publicada en estos boletines, se cuenta con la carga (en toneladas) transportadas por este modo con los puertos de origen y destino). A partir de la información de distancias (en millas náuticas) entre puertos es posible calcular directamente las toneladas-kilómetro asociadas a cada puerto.

Como criterio de asignación de la demanda, las toneladas-kilómetro son imputadas a la región a la cual pertenece el puerto de origen de la carga. La información obtenida es utilizada para actualizar las series históricas de demanda marítima por cabotaje.

### 3.2.5 Incorporación de otros medios de transportes tales como motocicletas

Si bien algunas de las encuestas origen destino-destino el modo motocicleta ha sido incluido, este generalmente ha sido incluido en la categoría otros modos, dada su baja participación. En la actualidad, la participación de este modo ha aumentado y esto no ha sido capturado aun por las EDOs.

A partir de la información de la cantidad de motos por región, su nivel de actividad y tasa de ocupación promedio, puede calcularse la demanda en pasajeros-kilómetros de este modo, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$PKM_{motocicleta} = N_{motocicletas} * NA_{motocicleta} * TO_{motocicleta}$$

Donde $PKM_{motocicleta}$ corresponde a la demanda por este modo en pasajeros-kilómetro; Corresponde al número de motocicletas en cada región; $NA_{motocicleta}$ corresponde a la distancia media recorrida por cada motocicleta en un año por región y $TO_{motocicleta}$ la tasa de ocupación en pasajeros por vehículo.

Esto permitirá establecer la partición modal (en PKM) del este modo respecto a la demanda por transporte total.

### 3.2.6 Transporte aéreo y marítimo internacional

Los modelos búnker internacional aéreo y marítimo se encuentran en proceso de actualización.

El consumo de energía del búnker aéreo internacional histórico fue actualizado, abarcando los años 1990 a 2016. El consumo de energía y la demanda por pasajeros-kilómetros internacional histórico del búnker aéreo internacional son presentados en la siguiente figura:

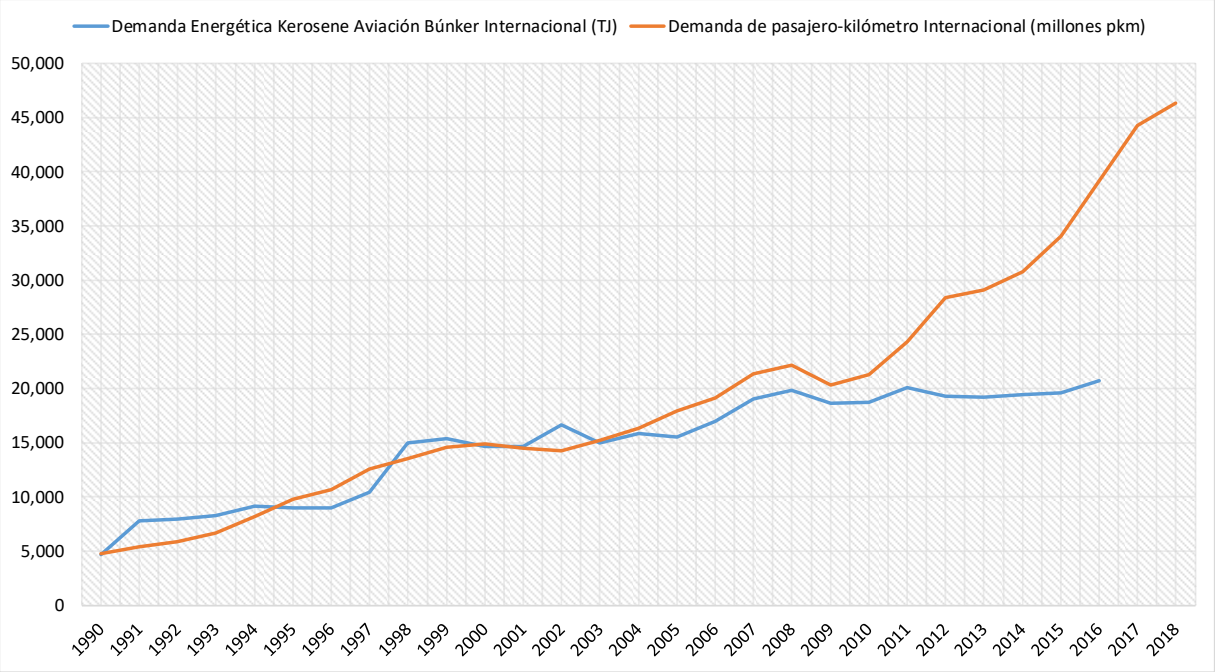



**Figura 27 Consumo de energía del búnker aéreo internacional (1990-2016) y demanda de pasajero-kilómetro internacional histórico (1990-2018).**

Se evaluaron dos metodologías para proyectar la demanda energética asociada a este modo. La primera consideró la proyección econométrica de la demanda por pasajero-kilómetro y la multiplicación posterior de una intensidad energética. La segunda opción consideró la proyección econométrica directa de la demanda de energía (kerosene de aviación), la cual fue finalmente seleccionada. La proyección econométrica de la demanda de energía es presentada en la siguiente figura:

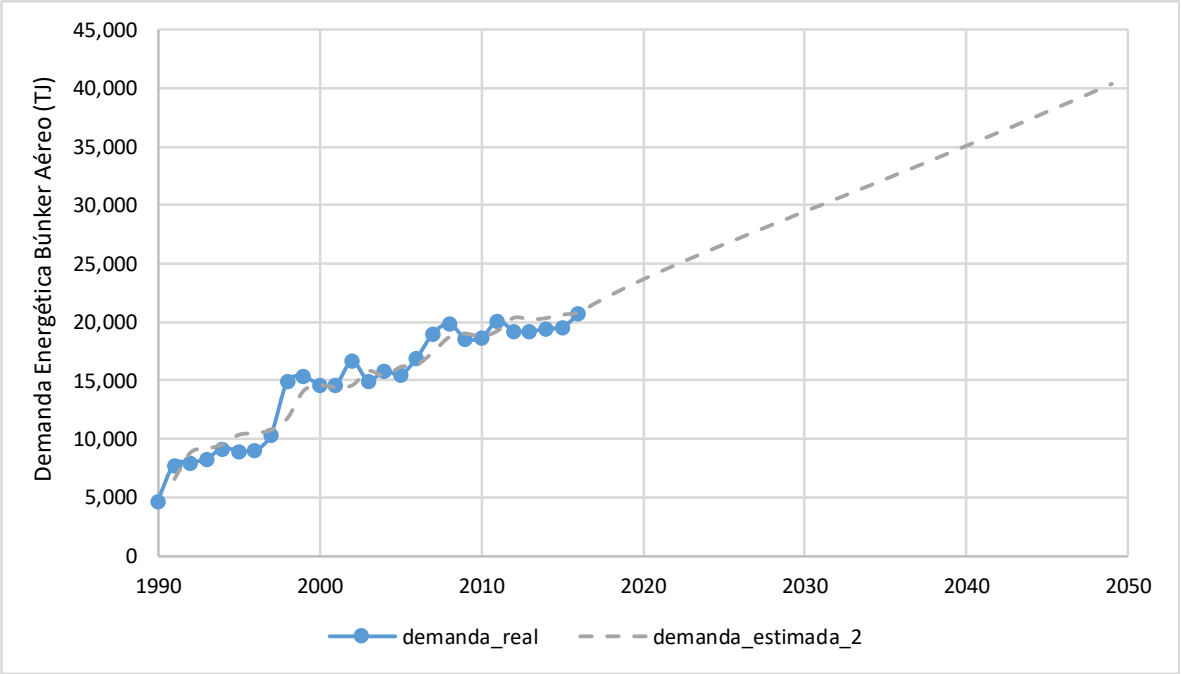



**Figura 28 Proyección de la demanda energética del modo búnker aéreo internacional**

La demanda energética del modo búnker marítimo internacional fue actualizada al periodo 1990-2016, separada por tipo de combustible (diésel y petróleo combustible). Los valores históricos para este modo son presentados en la siguiente figura:

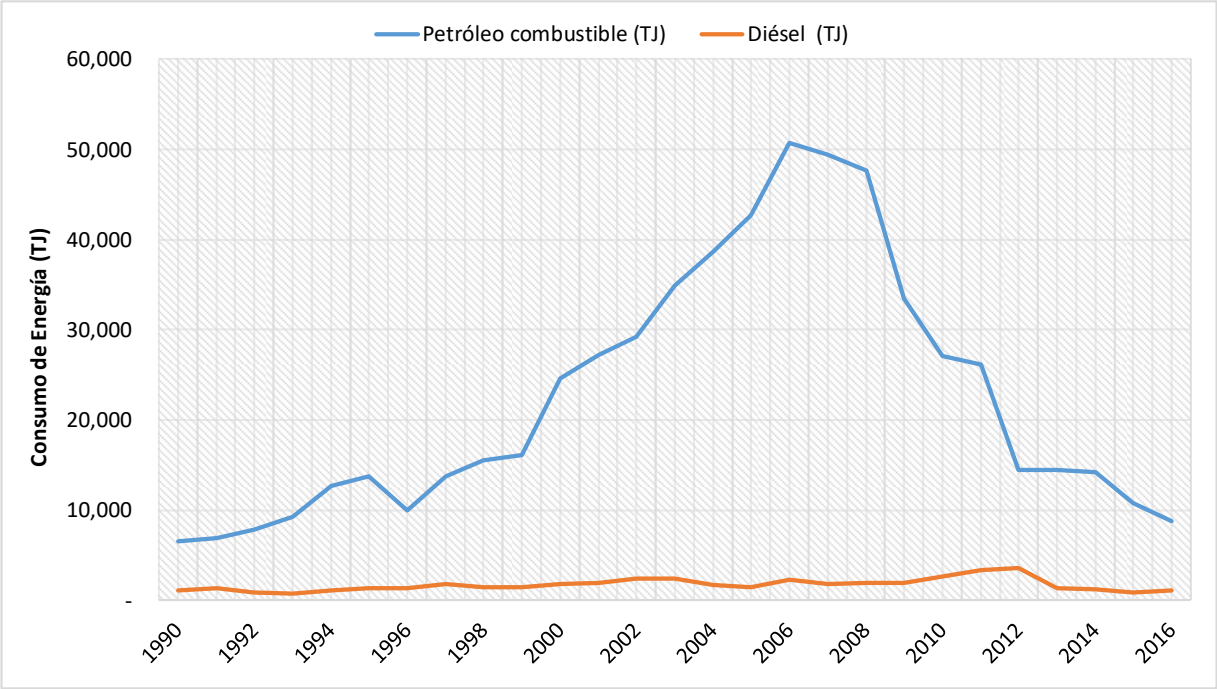



**Figura 29 Consumo de energía del modo búnker marítimo internacional. Fuente: Ministerio de Energía**

En la actualidad el consultor se encuentra explorando opciones para proyectar esta variable.

## 3.3 Actualización de modelo residencial

En esta sección se presenta la propuesta de actualización del modelo del sector residencial. Para ello se considerarán los datos más actualizados existentes para cada uno de los parámetros identificados del modelo descrito en las secciones anteriores.

El proceso de actualización considera la actualización del año base. El año base corresponde al año 2017. El consultor hará todas las modificaciones necesarias a los parámetros de entrada y drivers que utiliza el modelo con el objeto de que el modelo replique los resultados de la demanda energética del último Balance Nacional de Energía disponible y el último Balance Regional de Energía disponible (año 2017).

La siguiente tabla muestra los datos a considerar en el proceso de actualización.

**Tabla 21 Variables utilizadas en modelación de la demanda del sector residencial.**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Número de Viviendas (NV) | Censo 2017, Censo 2002<br>Casa y departamento. | Comunal, regional. | Interpolación entre 2002 y 2017 |
| Porcentaje de uso final | Estudio Demanda Leña (Minenergía, 2014), | Regional | 2014 |
| | CDT 2010 | Regional | 2010 |
| | CDT 2019 (confirmar disponibilidad) | | 2019 |
| Consumo de Energía | BNE 2014 - 2017 | Regional | Anual |
| Participación por tipo de combustible | Balance regional de energía más estudios previos CDT | | |
| Población | Censo 2017, Censo 2002 | Regional | Anual |

Preliminarmente, las variables más relevantes para actualizar corresponden a la proyección de la población nacional, proyección de la tasa de crecimiento del PIB y el Balance Nacional de Energía del año 2017. El número de viviendas se actualiza a partir de la información del Observatorio Urbano que cuenta con datos detallados del año 2017 y 2002, y cuya proyección se realiza en función del PIB y de la población.

La mejor información disponible con respecto a tenencias de equipos y consumos unitarios corresponde a los estudios (CDT, 2011) y Leña (CDT, 2015), por lo que esos datos serán utilizados nuevamente, a menos que se tenga información más reciente. No obstante, como la metodología es del tipo bottom-up, al momento de realizar el ajuste al balance de energía del último año, estas intensidades son calibradas de tal forma de aproximarse a los datos del año 2017. Luego, las intensidades en kWh/viv serán actualizadas con respecto al estudio

anterior para reflejar el cambio en el consumo total del sector residencial y los cambios demográficos.

Los cálculos realizados en el estudio anterior para calcular el consumo teórico no se esperan sean actualizados puesto que las características constructivas para cada tipología considerada y los grados días siguen vigentes. Con los datos más recientes de participación de tipologías se actualizará la proporción de viviendas por tipología y año constructivo por lo que se espera el cálculo del consumo teórico casa y departamento medio sean actualizados. El consumo real será recalculado con nueva información disponible como se comentó en el párrafo anterior. Los valores de la demanda energética teórica para calefacción se compararán con las estimaciones teóricas de calefacción que se estimarán sobre la base de los parámetros del MINVU para certificación energética de viviendas (https://www.calificacionenergetica.cl/).

Con respecto a la metodología de proyección, los supuestos utilizados en el estudio anterior son razonables, ya que reflejan cambios conductuales y socioeconómicos esperables de países en vías de desarrollo. No obstante, se revisarán algunos supuestos realizados con criterio experto, como el PIB referencial para alcanzar el confort térmico, las tasas de recambio de energéticos en el largo plazo, fórmulas para interpolar valores, entre otros.

Adicionalmente, se espera sean modeladas medidas adicionales y actualizadas medidas existentes, como la incorporación de calefacción distrital, electrificación del consumo residencial, medidas de eficiencia energética, como recambio de calefactores, mejorar calidad térmica del consumo de leña, entre otras. Estas medidas en su mayoría pueden ser incorporadas directamente con la metodología presentada realizando algunos cálculos adicionales de forma exógena. Por ejemplo, la mejora de eficiencia energética de artefactos puede ser representada como un factor adicional al momento de proyectar intensidad energética de cada consumo. En el caso de nuevos energéticos estos serán agregados con una trayectoria adicional y una intensidad representativa del proceso nuevo. Estos pueden ser calefacción distrital, incorporación de energías renovables en distribución, electrificación de consumos, etc.

En el caso de la calefacción distrital, existen diversos estudios para distintas localidades del país que serán revisados para establecer los tipos de proyectos que se analizan (dimensiones y emplazamiento, tipo de energéticos usados, etc.). Estas características servirán para modelar y definir las variables presentes en el modelo que permitan evaluar y dimensionar los proyectos de calefacción distrital.

Existe una alta tendencia a la electrificación en el consumo residencial. Dentro de este crecimiento, el uso de cocinas eléctricas y el aire acondicionado son dos de los principales usos energéticos que han aparecido. Sin embargo, existen otros consumos como climatización con

bombas de calor, entre otros que pueden ser considerados en el futuro. Para ello, además de la revisión de los estudios internacionales acerca de nuevos artefactos eléctricos, se entrevistará a empresas distribuidoras (como ENEL) e importadoras de equipos eléctricos para conocer las tendencias futuras que se esperan en el país. Esta metodología y las propuestas de penetración de estos equipos serán validadas con la contraparte técnica del estudio.

## 3.4 Actualización de modelo sector público

### 3.4.1 Actualización general

El proceso de actualización también considera la actualización del año base. El año base corresponde al año 2017. La siguiente tabla muestra los datos a considerar en el proceso de actualización.

**Tabla 22: Actualización sector público**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Población Nacional | Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 total país (INE). | Regional. | Proyección entre 2017 – 2050. |
| Número de Colegios | Directorio de Establecimientos (MINEDUC). | Comunal | 2017 – 2018 |
| Número de Universidades | INDICES Base de Datos Institucional. (CNED) | Comunal | Anual (2017 – 2018) |
| Número de Hospitales | Listado de Establecimientos pertenecientes al SNSS. (Departamento de Estadísticas e Información de Salud) | Regional, Comunal. | Julio 2019 |

El proceso de actualización considera una revisión del cálculo del consumo de energía del segmento Otros de los sectores Comercial y Público, para esto, se cuenta con un modelo econométrico que correlaciona la demanda de energía a nivel país con el Producto Interno

Bruto, de esta forma, se obtiene una estimación del consumo nacional de energía según la proyección del PIB. Además, se considera que la participación a nivel regional en el consumo país de energía se mantiene constante en el tiempo, con lo cual se puede contar con una proyección estimada del consumo de energía por región. A partir de esto se puede calcular el consumo del segmento otros como:

$$E_{otros,k,s.t} = ConsumoProyectado_{k,s,t} - \sum_{i} E_{i,k,s,t}$$

Donde:

- $E_{otros,k,s.t}$: Consumo del energético $k$ en el segmento otros del sector $s$ en el año $t$
- $ConsumoProyectado_{k,s,t}$: Consumo proyectado total del energético $k$ del sector $s$ en el año $t$
- $E_{i,k,s,t}$: Consumo del energético $k$ en el segmento $i$ del sector $s$ en el año $t$

El proceso de actualización también considera la inclusión de 2 nuevas categorías: Alumbrado Público y Edificios Públicos.

### 3.4.2 Alumbrado público

El consumo de energía en el área municipal es uno de los gastos impostergables por el municipio, pues es clave para su funcionamiento. Adicionalmente, al analizar los componentes de este gasto, se evidencia que está fuertemente influenciado por el componente de alumbrado público. De acuerdo, al estudio de "Apoyo a la Eficiencia Energética en el sector Residencial y Municipal" realizado para el Banco Interamericano de Desarrollo a fines del año 2013, el parque de luminarias instaladas en las 345 comunas del país es de alrededor de 2.420.000 y equivale a un consumo total estimado de 125.925 MWh al año. Se estima que, del total de luminarias, el 11 % son consideradas ineficientes (266.000 luminarias), con un ahorro potencial de 51,6 MWh por año.

La siguiente tabla muestra los datos a considerar en el proceso de actualización.

**Tabla 23: Actualización alumbrado público**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Número de luminarias públicas instaladas | Apoyo a la eficiencia energética en el sector residencial y municipal. Consultoría técnica – alumbrado público (BID). | Regional, Provincial, Comunal. | 2014 |
| Horas de uso de luminaria | | Comunal. | 2005 - 2009 |

Luego, el consumo de electricidad del segmento Luminaria Pública se calcula como:

$$E_L = N_L \cdot C_L$$

Donde:

- $E_L$: Consumo de electricidad del segmento Luminaria Pública [kWh]
- $N_L$: Potencia instalada en Luminaria Pública [kW]
- $C_L$: Consumo específico del segmento Luminaria Pública [kWh/kW]

Adicionalmente, la cantidad de luminarias públicas en la región $R$ se indexa a la población respectiva como:

$$N_{L,R,t} = I_{L,R} \cdot H_{R,t}$$

Donde:

- $N_{L,R,t}$: Potencia instalada en Luminaria Pública en la región $R$ en el año $t$
- $I_{L,R}$: Indicador de kW/habitante de la región $R$
- $H_{R,t}$: Número de habitantes de la región $R$ en el año $t$

### 3.4.3 Edificios públicos

En el caso de la participación de los edificios públicos, se cuenta con la información del programa Gestiona Energía del Ministerio de Energía. Para el 2018, del total de edificios registrados, se obtuvo información de consumo energético de 2.738 edificios, de los cuáles 2.573 corresponden a edificios que consumen solamente electricidad y 165 a edificios que consumen en forma mixta electricidad y gas natural. Cabe recalcar que el programa Gestiona Energía sólo cuenta con los datos de aquellos edificios públicos que reportan sus consumos de energía.

La siguiente tabla muestra los datos a considerar en el proceso de actualización.

**Tabla 24: Actualización edificios públicos**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Consumo específico anual (kWh/m2) | Programa Gestiona Energía | Regional. | Mensual (Enero 2017 – Mayo 2019 ) |

El consumo del energético $k$ del segmento Edificios Públicos se calcula como:

$$E_{EEPP,k} = N_{EEPP} \cdot S_{EEPP} \cdot I_{EEPP,k} \cdot C_{EEPP}$$

Donde:

- $E_{EEPP,k}$: Consumo del energético $k$ del segmento Edificios Públicos [kWh]
- $N_{EEPP}$: Número de unidades del segmento Edificios Públicos
- $S_{EEPP}$: Superficie de la unidad tipo [m$^2$]
- $I_{EEPP,k}$: Intensidad del uso del energético $k$ en el segmento Edificios Públicos [%]
- $C_{EEPP}$: Consumo específico del segmento Edificios Públicos [kWh/m$^2$]

Adicionalmente, la cantidad de Edificios Públicos en la región $R$ se indexa a la población respectiva como:

$$N_{EEPP,R,t} = I_{EEPP,R} \cdot H_{EEPP,t}$$

Donde:

- $N_{EEPP,R,t}$: Número de Edificios Públicos en la región $R$ en el año $t$
- $I_{EEPP,R}$: Indicador de Edificios Públicos por habitante de la región $R$
- $H_{R,t}$: Número de habitantes de la región $R$ en el año $t$

## 3.5 Actualización de modelo sector comercial

El proceso de actualización también considera la actualización del año base. La siguiente tabla muestra los datos a considerar en el proceso de actualización.

**Tabla 25: Actualización sector comercial**

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Población nacional | Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 total país (INE). | Regional. | Proyección entre 2017 – 2050. |
| Número de bancos | Información Mensual del N° de oficinas, N° de empleados, N° de sucursales y N° de personas en bancos por región e institución. Disponible desde enero de 2013. (SBIF) | Regional, Comunal. | Enero 2013 – Mayo 2019 |
| Número de supermercados | Índice de Ventas de Supermercados - ISUP / Base Promedio Año 2014=100 (INE). | Regional | Enero 2014 – Junio 2019 |
| Número de malls | Cámara de Centros Comerciales de Chile. | Regional | Julio 2019 |
| Número de clínicas | Listado de Establecimientos no pertenecientes al SNSS. (Departamento | Regional, Comunal. | Julio 2019 |

| Serie | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| | de Estadísticas e Información de Salud) | | |

## 3.6 Actualización de modelo industria y minería

El proceso de actualización se inicia con el ajuste del año base, el que en este caso corresponde al 2017. El consultor ha hecho las modificaciones necesarias a los parámetros de entrada y drivers que utiliza el modelo con el objeto que el modelo replique los resultados de la demanda energética del último Balance Nacional de Energía disponible y el último Balance Regional de Energía disponible (año 2017).

### 3.6.1 Actualización del sector cobre

En base al Anuario Minería 2018 (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018) se han actualizado las producciones de los últimos años utilizadas por el modelo de proyección. La siguiente tabla muestra las producciones de cobre fino equivalente para el año 2017. Además, se toma como conocido el año 2018 dada la información disponible en el anuario.

**Tabla 26: Producción minera de cobre, por región**

| Región | Cobre TM de fino 2017 |
|---|---|
| **I** | 613.55 |
| **II** | 2,897.27 |
| **III** | 511.39 |
| **IV** | 474.10 |
| **V** | 288.08 |
| **VI** | 464.55 |
| **VII** | - |
| **VIII** | - |
| **IX** | - |
| **X** | - |
| **XI** | 0.36 |
| **XII** | - |
| **RM** | 308.26 |
| **XIV** | - |
| **XV** | 0.42 |

Fuente: Anuario Minería 2018

Usando la misma fuente, se actualizaron las leyes promedio de óxidos y sulfuros. La siguiente tabla muestra las leyes actualizadas.

**Tabla 27: Leyes Promedio de Minería de Cobre en Chile, por Tipo de Proceso**

| | Promedio Ley 2017 |
|---|---|
| **Ley Óxidos (LX) %** | 0.61% |
| **Ley Súlfuros (Concentrado) %** | 0.80% |

Fuente: Anuario Minería 2018

Una vez actualizadas las producciones de cobre y leyes de los minerales se calcula la demanda de energía por región del subsector Cobre, sector Minería. Dichos resultados se comparan con la demanda energética real del Balance Regional de Energía del año 2017.

El modelo es calibrado mediante la actualización de parámetros tales como: intensidades de energía final por proceso; participaciones y recuperaciones tanto de óxidos como sulfuros; además de proporciones de energéticos (Petróleo Diésel, Electricidad, Gas Natural, etc.) en los distintos procesos modelados para cada región, de acuerdo a los antecedentes técnicos de las faenas y procesos existentes en las distintas regiones del país.

De este modo los parámetros son ajustados con el fin de obtener un mínimo error en la demanda total por energético para cada región del país.

#### 3.6.1.1 Proyección producción de cobre

A continuación se presenta la metodología para la proyección de la producción de cobre mina del país, tanto para las empresas públicas (Codelco) como las empresas privadas, en tres escenarios con horizonte 2030 y 2050.

La información se basa en los estudios de COCHILCO de inversiones y de producción del año 2018, además de información de estudios internacionales (CRU, Brook Hunt, Mackensie, Blomberg, Teck, Rio Tinto, entre otros).

De acuerdo a estas fuentes internacionales, se espera un importante aumento de la demanda mundial de cobre, principalmente impulsado por el incremento del consumo en China (500 mil toneladas de cobre por año al 2020), entre otras razones, por el desarrollo de redes eléctricas y su meta de 5 millones de vehículos eléctricos al año 2020 (ver figura siguiente).

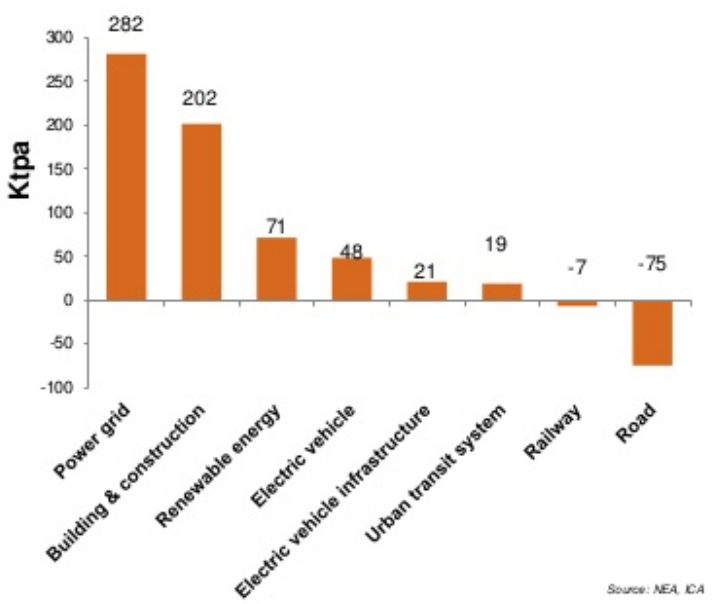



**Figura 30*:* Crecimiento de la demanda de cobre en China en diversos sectores. Fuente: Teck, 2017**

Varios de estos estudios desarrollados últimamente mencionan un déficit de entre 5 y 10 millones de toneladas de cobre al año 2030, que no puede ser absorbido por la producción mundial, donde Chile participó con el 28% en el año 2018 (cobre de mina). Ello se puede apreciar en la figura siguiente, en donde se muestran dos de las proyecciones mundiales recopiladas.

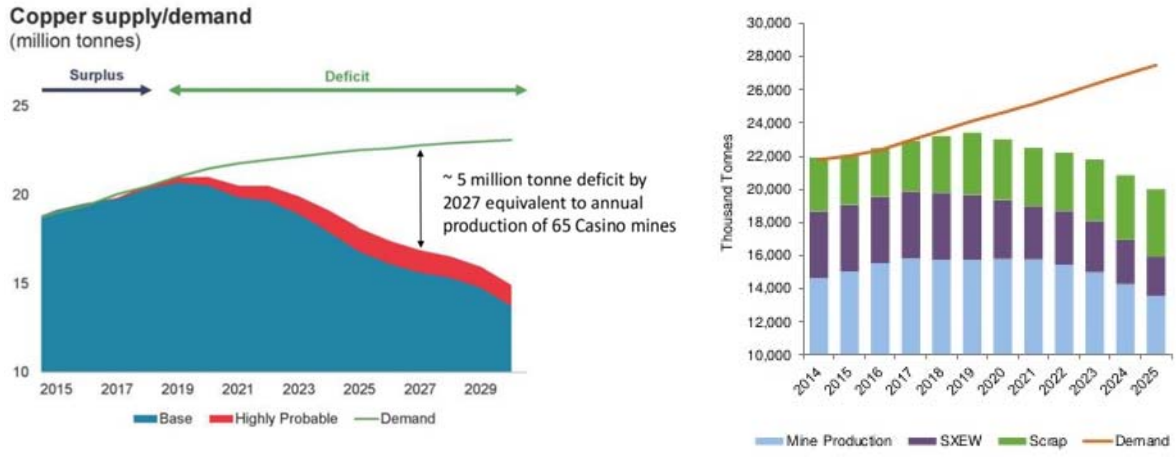



**Figura 31*:* Proyecciones de demanda mundial de cobre. Fuente: Teck y Rio Tinto, 2017**

En este contexto, Wood Mackenzie (Global Copper long-term outlook Q1 2017) prevé que la demanda global de cobre refinado crecerá un 1,8% anual entre 2016 y 2021. En el largo plazo, de 2016 a 2035, se prevé que el consumo mundial de cobre refinado crecerá un 1,2% anual. Se espera que el suministro de cobre en el caso base, antes de las interrupciones, crezca hasta 2020 y disminuya más allá de 2020 a menos que ingrese un nuevo suministro al mercado. Debido al largo tiempo de espera requerido para traer nuevos yacimientos a la producción, se estima que la brecha de suministro alcanzará aproximadamente 4.4 millones de toneladas para 2027.

Lo anterior es posible aplicarlo al horizonte 2030, ya que la información de la mayoría de los estudios relacionados está disponible en el entorno de ese periodo. Luego, para aproximarse al periodo 2050, de acuerdo al director de Estudios y Políticas Públicas de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), Jorge Cantallopts, esta institución estima que la demanda de cobre a nivel mundial llegaría a 38 – 40 millones de toneladas hacia el año 2050, siendo la electromovilidad uno de los mayores impulsores, con un aumento de 4,3 millones de toneladas. De esta forma, si el incremento potencial adicional de la producción de cobre a 2050 son 15 millones de toneladas en el mundo, y si Chile mantuviera su participación de mercado, significaría producir 2,5 millones de toneladas más. Eso implica una tasa de crecimiento de 2% anual.

Basado en estas cifras, se plantea que en un escenario alto, Chile puede mantener un 30% de la producción mundial para una demanda mundial de 40 millones de TMF al 2050. Por su parte, en el escenario base la participación sería de un 25% y el escenario bajo sería de 20%.

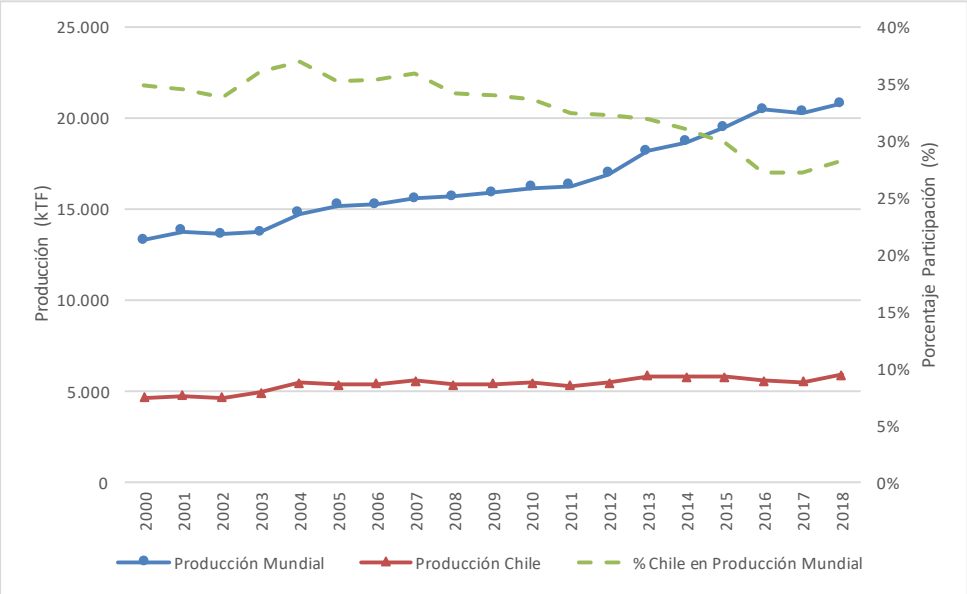



**Figura 32: Producción mundial y chilena de cobre 2000 - 2018. Fuente: Cochilco, 2018**

Asociados a estos escenarios prospectivos, se consideran tendencias de precios del metal, cuyas previsiones están directamente relacionadas con la puesta en marcha de los proyectos en carpeta y las inversiones en proyectos futuros.

Wood Mackenzie estima que los precios del cobre promediarán aproximadamente USD 3,45 / lb (en dólares de 2017) de 2020 a 2025 y promediará aproximadamente USD 3,30 / lb (en dólares de 2017) de 2026 a 2035.

Sobre la base de distintos niveles de precio del metal y la información de Cochilco y otras fuentes relacionadas (A. Elshkaki et al., 2016 y B.W. Schipper et al., 2018), se determinará la participación futura (2050) de la producción de cobre en Chile, que se hagan cargo de la demanda proyectada en el país. El valor de la producción mundial futura (2050) alcanza los 40 millones de toneladas.

Los escenarios propuestos se basan principalmente en la proyección de la producción minera del estudio de COCHILCO (2018b). En dicho estudio, se dispone de la información para 3 escenarios de producción (máxima, esperada y mínima), desagregación regional (entre Arica y Parinacota y O`Higgins) para el escenario esperado y escenarios asociados a la condición de los proyectos (Base, Probable, Posible y Potencial). En el anexo se presentan las series asociadas a estos escenarios.

En el caso del escenario base, se toma el año 2028 como el final de la proyección (de acuerdo con COCHILCO) y se ha considerado un precio proyectado del cobre de 300 cUSD/libra. Se toma ese valor dado que es donde se estabiliza el crecimiento de la producción.

Como se revisó con el Director de Estudios de COCHILCO, para llevar a cabo la proyección al año 2050 se considera que Chile participará con un 25% de la producción mundial estimada al 2050. Para aproximarse a dicho valor, se considera el promedio del crecimiento de la producción nacional de los últimos 10 años (1,9%) y el crecimiento esperado de demanda declarada por China al largo plazo (1,5%). A partir de ello, se determinan los valores de los escenarios base y alto. En el caso del escenario bajo, a sugerencia de COCHILCO, se considera un crecimiento del 1,2% anual. De esta forma, se obtienen participaciones del 30% y 20% para los escenarios alternativos.

Por otro lado, la información de proyectos de COCHILCO y su ubicación a nivel regional permite estimar la proyección de la producción de cobre para las regiones productoras del país. Ello se presenta en el anexo.

Por último, en la figura siguiente se presentan los 3 escenarios de producción futura de cobre (base, alto y bajo) en el periodo 2018 – 2050. La principal diferencia que se aprecia entre el escenario base y alto tiene que ver con el atraso o adelantamiento de los proyectos que está programados para el periodo 2022 – 2026, lo que finalmente provoca la diferencia que se observa en el gráfico. El escenario bajo corresponde al de Producción mínima de COCHILCO, por lo que sigue sus tendencias.

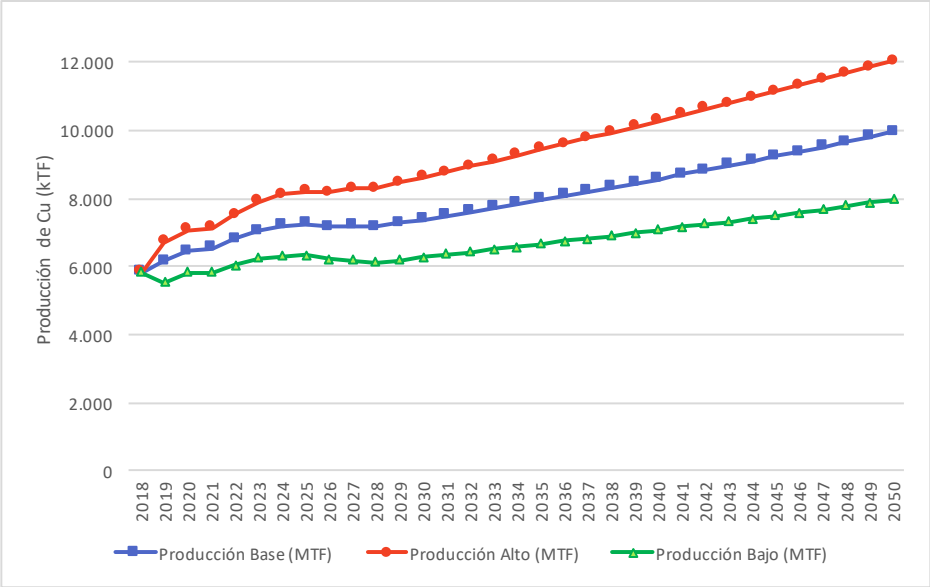



**Figura 33: Producción escenario base, alto y bajo 2017 - 2050. Fuente: Elaboración propia basado en Cochilco (2017)**

COCHILCO comenzará a trabajar una nueva proyección de la producción de cobre al año 2050 para la Política Minera, la que se basará en el ejercicio que se hizo para el proyecto del Minenergía, por lo que se podrá actualizar esta proyección recientemente desarrollada.

### 3.6.2 Actualización otros sectores

La actualización de los otros sectores consiste principalmente en la actualización de parámetros utilizados con la mejor información disponible hasta la fecha manteniendo la metodología utilizada en el estudio anterior. Los parámetros relevantes a actualizar se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 28: Actualización de modelo industria y minería**

| Variable | Información actual disponible | Desagregación espacial | Desagregación temporal |
|---|---|---|---|
| Consumo energético por energético y por región. | BNE 2017 | Regional | 2017 |
| Matriz de usos finales (térmico, motriz, otros eléctricos) | BNE 2017 y Estudio de potencial de EE (basado en estudios sectoriales). | Regional | 2017 |
| Producción por sector. | COCHILCO, CORMA, INFOR, Anuario de la minería, Methanex, Ministerio de Hacienda, Instituto Chileno del Hormigón, FAO, INE, ALACERO, SERNAPESCA. | Nacional y regional. | 1960-2017 (Cobre)<br>1990-2017 (Celulosa) |
| Eficiencias de energéticos | Estudio previo | Nacional y regional. | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Intensidad | Derivada de series anteriores. | Nacional y regional. | 2017 |

En la siguiente tabla se muestran los datos utilizados para recalibrar el modelo industrial y minero. La demanda regional por energéticos fue obtenida directamente del Balance Regional 2017 y los datos drivers de producción fueron obtenidos de las fuentes indicadas en la tabla. En caso de no tener datos de producción regional, la producción nacional se distribuirá proporcionalmente al consumo energético del Balance Nacional de Energía.

**Tabla 29: Actualización de producción y demanda energética del sector industria y minería para el año 2017**

| Sector | Producción | Unidades | Demanda BNE (Tcal) | Fuente |
|---|---|---|---|---|
| Papel y Celulosa | 5.193 | Miles ton | 23.147 | CORMA / INFOR |
| Hierro | 9.549 | Miles TM | 1.943 | Anuario de la Minería |
| Petroquímica | 384 | Mm3 | 50 | BNE y ENAP |
| Minas Varias | 20.070 | Miles TM | 5.699 | Anuario de la Minería |
| Industrias Varias | 147.529 | Mil millones CLP 2011 | 33.099 | Banco Central / Min. de Hacienda |
| Cemento | 3.995 | Ton | 2.566 | Instituto Chileno del Hormigón |
| Azúcar | 1.313 | Miles ton | 907 | ODEPA |
| Siderurgia | 1.253 | Miles ton | 1.395 | Instituto Chileno del Acero y ALACERO |
| Pesca | 4.753 | Miles ton | 2.566 | Anuario Estadístico SERNAPESCA |
| Salitre | 3.039 | Miles ton | 1.343 | Anuario de la Minería |

El driver del sector papel y celulosa corresponde a la suma de la producción de pulpa con datos de CORMA e INFOR. Esta producción de pulpa incluye: pulpa mecánica, pulpa termodinámica y pulpa química. Los datos de producción están a nivel nacional por lo que la desagregación a nivel regional se realiza proporcionalmente al consumo energético regional de este sector.

Los datos del sector hierro se obtienen directamente del anuario de la minera 2018 de Cochilco, del cual se utiliza la producción de hierro en miles de toneladas con una desagregación regional.

Para el sector petroquímica se utiliza la producción de etileno a nivel nacional. Debido al cierre de plantas entre el estudio anterior y este estudio no existen datos de producción de etileno en el último balance nacional de energía. Luego, se utiliza la producción informada en la memoria anual de ENAP de otros productos industrial que incluye etileno, propileno, nafta, solventes, asfaltos, entre otros. Esta producción se mantiene constante en el horizonte de evaluación.

La producción utilizada en minas varias se obtiene del anuario de la minería 2018 de Cochilco. La producción corresponde a la suma de todos los minerales que no son considerados en el sector cobre, hierro y salitre. Estos datos se encuentran desagregados a nivel regional y considera la producción de más de 20 tipos de minerales.

El sector industrias varias corresponde al consumo industrial que no pertenece a los consumos desagregados. Dado que abarca una gran diversidad de rubros, el driver utilizado corresponde al PIB regional y el modelo corresponde a un modelo de intensidad en el cual se asume existe una intensidad dada entre el consumo energético y el PIB. El PIB es actualizado con datos del Banco Central mientras que la proyección de la tasa de crecimiento del PIB es proyectada por el Ministerio de Hacienda.

La producción de cemento se obtiene de los datos de despacho de cemento de la cámara chilena de la construcción para el año 2017. Los datos son a nivel nacional por lo que son desagregados a nivel regional proporcionalmente al consumo informado en el balance para este sector.

Los datos de actividad pesquera se encuentran disponibles en el anuario estadístico de SERNAPESCA para la pesca extractiva y acuicultura. Los datos a nivel nacional fueron desagregados regionalmente de acuerdo con consumo del balance nacional de energía. La proyección de la producción se mantiene constante para todo el horizonte.

El driver de la producción de azúcar corresponde al producto entre las hectáreas cultivadas de remolacha azucarera con el rendimiento de la hectárea. Para este sector fueron utilizados los datos del Índice de cultivos anuales regionales de ODEPA 2017. Para proyectar este sector se utiliza el mismo supuesto que el estudio anterior, el cual corresponde a mantener las hectáreas plantadas constante en el tiempo, mejorando el rendimiento de la hectárea en 0.9% anual.

Adicionalmente a los datos de producción y consumos de energía, fueron actualizadas las matrices de usos finales de cada sector analizado. Estas matrices se calcularon en el marco del estudio de estimación del potencial de eficiencia energética en sectores productivos del Centro de Energía, estudio en cual se llevó a cabo la primera encuesta de eficiencia energética a nivel nacional.

A continuación se describe en forma detallada las metodologías utilizadas para actualizar las proyecciones de producción para cada subsector.

#### 3.6.2.1 Proyección producción de papel y celulosa

Dado que la industria del papel y la celulosa es una de las más relevantes en la demanda energética del sector, se ha hecho un esfuerzo por estimar su producción proyectada.

Para la proyección de la producción de la industria del papel y la celulosa se considera como driver principal para la modelación la producción de la pulpa de madera. Como se aprecia en el cuadro siguiente, la capacidad instalada de producción del país corresponde a 5,82 millones de toneladas. En plantas ubicadas en las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía y Los Ríos.

**Tabla 30: Plantas productoras de pulpa de madera, 2017.**

| Razón social<br>*Commercial name* | Comuna<br>*County* | Tipo de pulpa<br>*Type of pulp* | Capacidad instalada / *Installed capacity* (t) |
|---|---|---|---|
| Total/ *Total* | | | 5.820.000 |
| PULPA MECÁNICA Y TERMOMECÁNICA/ *MECHANICAL AND THERMOMECHANICAL PULP* | | | 575.000 |
| REGIÓN DEL MAULE | | | |
| Cartulinas CMPC S.A. (Planta Maule) | Yerbas Buenas | Termomecánica, Pino radiata/ *Thermomechanical, Radiata pine* | 380.000 |
| REGIÓN DEL BIOBÍO | | | |
| Papeles Biobío S.A. | San Pedro de la Paz | Termomecánica, Pino radiata/ *Thermomechanical, Radiata pine* | 125.000 |
| REGIÓN DE LOS RÍOS | | | |
| Cartulinas CMPC S.A. (Planta Valdivia) | Valdivia | Termomecánica, Pino radiata/ *Thermomechanical, Radiata pine* | 70.000 |
| PULPA QUÍMICA/ *CHEMICAL PULP* | | | 5.245.000 |
| REGIÓN DEL MAULE | | | |
| Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Constitución) | Constitución | Cruda, Pino radiata/ *Unbleached, Radiata pine* | 355.000 |
| Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Licancel) | Licantén | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine* | 150.000 |
| REGIÓN DEL BIOBÍO | | | |
| Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Arauco) | Arauco | Blanqueada, Eucalipto/ *Bleached, Eucalyptus* | 290.000 |
| | | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine* | 500.000 |
| Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Nueva Aldea) | Ránquil | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine*<br>Blanqueada, Eucalipto/ *Bleached, Eucalyptus* | 1.070.000 |
| CMPC Pulp S.A. (Laja) | Laja | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine* | 330.000 |
| CMPC Pulp S.A. (Santa Fe) | Nacimiento | Blanqueada, Eucalipto/ *Bleached, Eucalyptus* | 1.500.000 |
| REGIÓN DE LA ARAUCANÍA | | | |
| CMPC Pulp S.A. (Pacífico) | Collipulli | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine* | 500.000 |
| REGIÓN DE LOS RÍOS | | | |
| Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Valdivia) | San José de la Mariquina | Blanqueada, Pino radiata/ *Bleached, Radiata pine*<br>Blanqueada, Eucalipto/ *Bleached, Eucalyptus* | 550.000 |

Fuente/ *Source*: INFOR.

Sin embargo, la producción histórica, como se aprecia en el siguiente cuadro, ha sido menor a esta máxima capacidad, llegando a 5,2 millones de toneladas en el año 2017. El principal producto corresponde a pulpa química, sin blanquear de pino radiata.

**Tabla 31: Producción de pulpa de madera (miles de t)**

| Año | Producción | Pulpa mecánica | Pulpa termomecánica | Pulpa química | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Blanqueada Pino radiata | Sin Blanquear Pino radiata | Blanqueada Eucalipto |
| 1990 | 159,8 | | 614,3 | | 30 | 804,1 |
| 1991 | 179 | | 777,6 | | 156,4 | 1113 |
| 1992 | 181 | | 1223,3 | | 276 | 1680,3 |
| 1993 | 182,7 | 5 | 1006,1 | 383,4 | 287 | 1864,2 |
| 1994 | 183,7 | 5,4 | 1099,9 | 347,5 | 316,1 | 1952,6 |
| 1995 | 183,8 | - | 1227,1 | 372,9 | 328,6 | 2112,4 |
| 1996 | 190,6 | 23 | 1252,9 | 347,5 | 331,9 | 2145,9 |
| 1997 | 184,3 | 25 | 1256,5 | 286,7 | 325,2 | 2077,7 |
| 1998 | 185,2 | 44,7 | 1175,6 | 362,3 | 441,8 | 2209,6 |
| 1999 | 135,7 | 234,3 | 1258,1 | 366 | 440 | 2434,1 |
| 2000 | 104,2 | 267,8 | 1303,4 | 413,1 | 503,4 | 2591,9 |
| 2001 | 110,2 | 275,5 | 1404,3 | 426,1 | 451,7 | 2667,8 |
| 2002 | 116,6 | 292,6 | 1289,7 | 435,2 | 553,3 | 2687,4 |
| 2003 | 130,5 | 314,5 | 1384,6 | 393,8 | 535,9 | 2759,3 |
| 2004 | 137,6 | 369,4 | 1661,7 | 389,4 | 780,6 | 3338,7 |
| 2005 | 136,6 | 342,4 | 1545,5 | 391 | 821,7 | 3237,2 |
| 2006 | 132,1 | 380,4 | 1642,3 | 376 | 952 | 3482,8 |
| 2007 | 138,3 | 355,7 | 1945,8 | 407,3 | 1828,4 | 4675,5 |
| 2008 | 137,6 | 357,4 | 2041,7 | 393,6 | 2050,1 | 4980,4 |
| 2009 | 134,3 | 368,4 | 2038,4 | 433,5 | 2017,9 | 4992,5 |
| 2010 | 104,5 | 353,7 | 1586,9 | 372,7 | 1684,3 | 4102,1 |
| 2011 | 120,6 | 364,5 | 1941,3 | 441,4 | 2028,4 | 4896,2 |
| 2012 | 127,4 | 321,1 | 1904 | 467,2 | 2260,6 | 5080,3 |
| 2013 | 131,3 | 232,4 | 2043,4 | 489,5 | 2259,5 | 5156,1 |
| 2014 | 134,3 | 180 | 2166,2 | 489,6 | 2238,7 | 5208,8 |
| 2015 | 127,4 | 183 | 2000,4 | 482,4 | 2323,4 | 5116,6 |
| 2016 | 124 | 161,8 | 2118,9 | 461,5 | 2279,2 | 5145,4 |
| 2017 | 119,8 | 151,7 | 2039,5 | 467,3 | 2414,7 | 5193,0 |

Fuente: Anuario Forestal 2018, Instituto Forestal (INFOR), 2018.

Se prevé que con la puesta en marcha de la modernización y ampliación de la planta Arauco (Proyecto MAPA), la capacidad anual aumente a 7,3 millones de toneladas hacia el año 2021-

2022[6]. Con ello se podría llegar a una producción anual de 6,4 millones de tonelada. De esta forma, la evolución de la producción se estima de la siguiente manera.

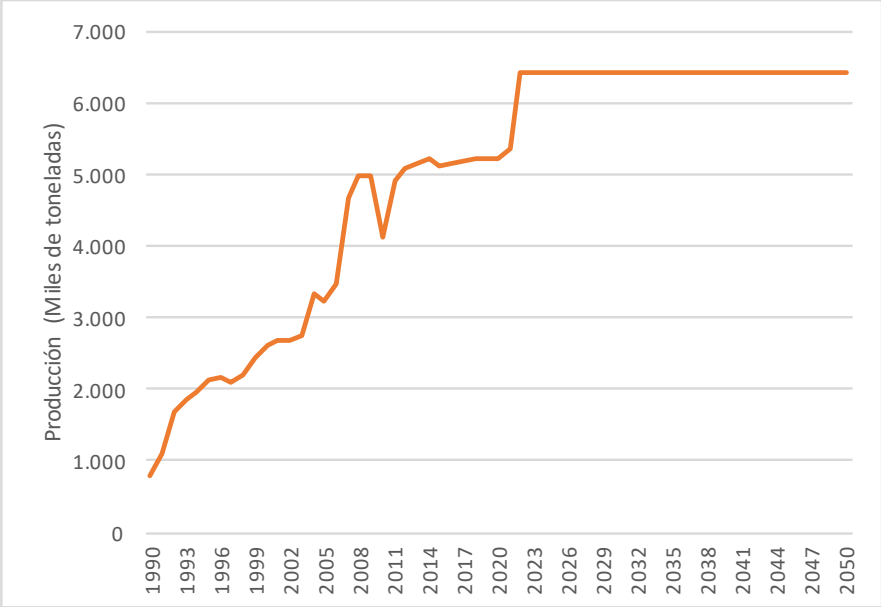



**Figura 34: Producción de celulosa 2017 - 2050. Fuente: Elaboración propia basado en INFOR (2018) y CORMA.**

Como contraste, este resultado es consecuente con la oferta proyectada de plantaciones, de acuerdo a las Proyecciones de Disponibilidad de Madera de Pino radiata y Eucaliptos (2017 – 2047), del Proyecto Disponibilidad de Madera desarrollado por INFOR, que se resume en el siguiente gráfico.

[6] Ver https://www.arauco.cl/chile/este_es_arauco/mapa/

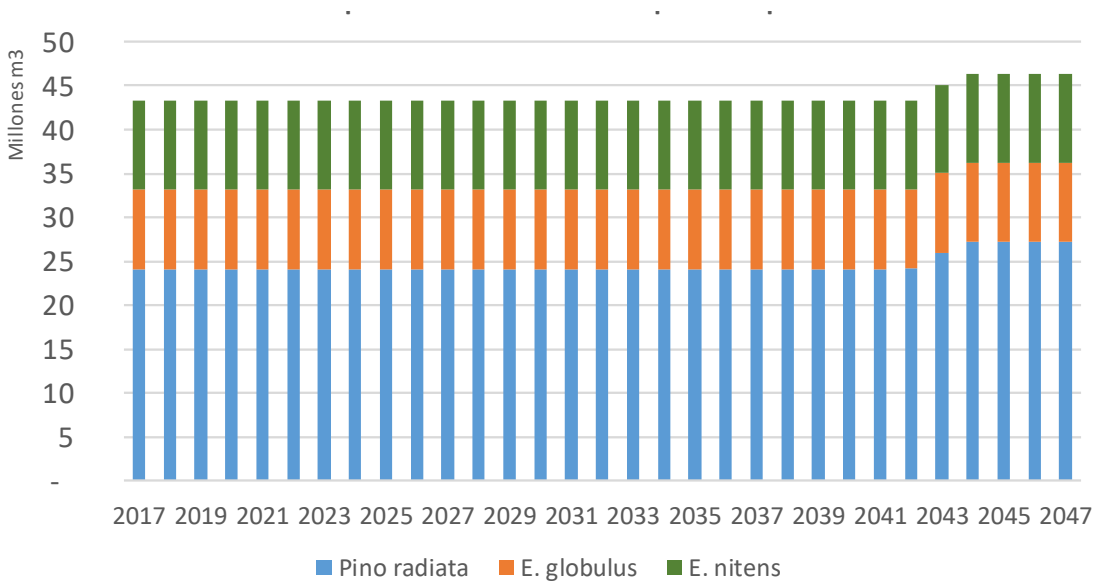



**Figura 35: : Disponibilidad Total por Especie 2017 - 2047. Fuente: INFOR (2018).**

#### 3.6.2.2 Proyección producción de hierro

La siguiente figura muestra la producción histórica de hierro (medido miles de tones de hierro fino) para el período 1998 y 2018 (COCHILCO, 2018a). Salvo el incremento de producción entre los años 2009 y 2011, en los últimos años no se ha observado un incremento en la producción. Entre los años 2012 y 2018 la producción de hierro ha variado entre 9,4 y 8,9 millones de ton anuales.

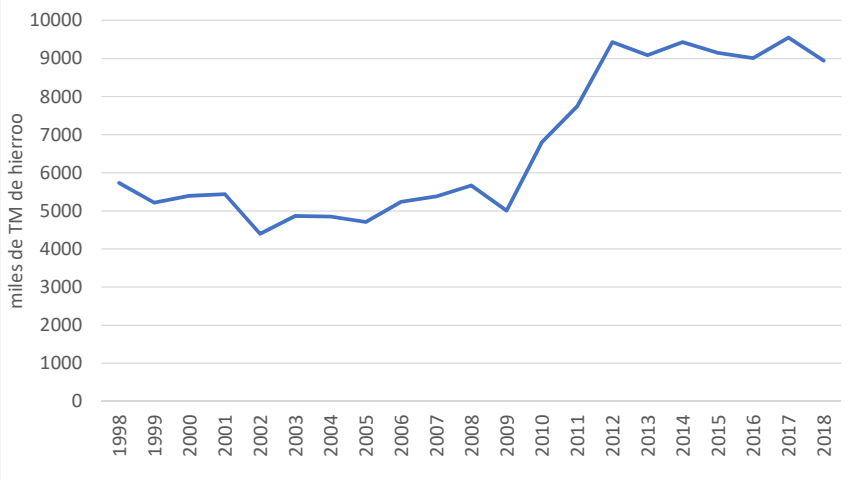



**Figura 36: Producción histórica de hierro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de COCHILCO**

De acuerdo al catastro de proyectos de COCHILCO (COCHILCO, 2018b), existen 2 proyectos nuevos que podrían aumentar la producción de hierro para el periodo 2019-2023. El proyecto MARIPOSA, actualmente en construcción, tiene una producción proyectada de 0,7 millones de ton anuales y el proyecto Dominga tiene una producción anual proyectada de 7,2 millones ton anuales. Ambos proyectos aumentarían la producción en 7,24 millones de toneladas de hierro fino. El proyecto Dominga está proyectado para el año 2023. Para el periodo 2024-2027 no se proyecta la entrada de nuevos proyectos. El desarrollo del proyecto Dominga podría aumentar significativamente la producción de hierro en Chile y la demanda de energía asociada a esta industria. El desarrollo de este proyecto se ha judicializado y su futuro es indeterminado, escapando del alcance de esta consultoría.

De acuerdo a (DIRECON, 2018), el hierro se exporta casi en su totalidad para el continente asiático, donde China representa el 61,4% de las exportaciones, Japón representa 14,6%, Corea del Sur representa 9,5% y Bahré y 7,3%. Considerando estos antecedentes, en estudio se proyectó la producción de hierro a partir de un modelo econométrico que correlaciona la producción de hierro y el PIB de Asia. No obstante, a opinión del consultor, los resultados

muestran el PIB de Asía resulta ser una variable poco significativa. En efecto, como muestran las estadísticas nacionales, la producción de hierro se ha mantenido relativamente constante durante el periodo 2012-2018, a pesar que durante dicho período ha aumentado el PIB de Asia. Asimismo, los aumentos de producción han estado marcados por el desarrollo de proyectos específicos, tal como ocurrió para el periodo 2009-2012.

Considerando la incertidumbre asociada a la utilización de un modelo econométrico, para proyectar la producción de hierro se propone aumentar la producción de acuerdo a las producciones esperadas de los nuevos proyectos, de manera similar a la metodología utilizada en el sector cobre y celulosa. De esta forma, para el periodo 2019-2027 la producción podría aumentar desde 8,9 millones toneladas en 2018 a 16 millones de toneladas hacia el año 2027.

#### 3.6.2.3 Proyección producción de cemento

La siguiente figura muestra la producción histórica de cemento para el período 1991 y 2018. El año 2011 se produjo la máxima producción de cemento alcanzando 4,8 millones de toneladas anuales. Si bien el PIB ha crecido en los últimos años, en los últimos años ha habido una disminución de la producción de cemento, alcanzando en el año 2018 una producción anual de 3,9 millones de toneladas.

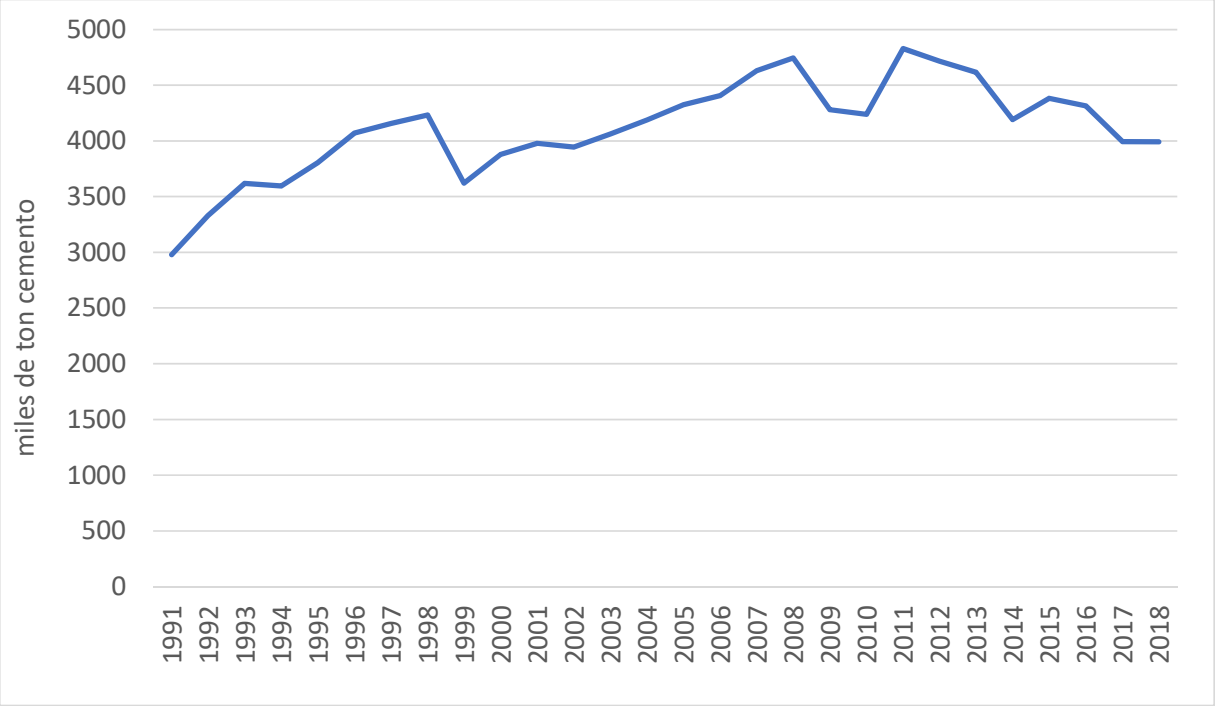



**Figura 37: Despacho anual de cemento. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Cámara Chilena de la Construcción.**

Para la proyección se realiza estimado un modelo econométrico que correlaciona el cemento despacho con el PIB. La siguiente figura muestra los resultados del test estadístico[7].

```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.05976 -0.02920  0.00506  0.02837  0.08596

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   1.0514     0.8144   1.291 0.209555
Cemento_1     0.7853     0.1269   6.187  2.6e-06 ***
PIB           1.7607     0.3807   4.624 0.000119 ***
PIB_1        -1.7023     0.3771  -4.514 0.000156 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.04009 on 23 degrees of freedom
  (1 observation deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.8309,    Adjusted R-squared:  0.8089
F-statistic: 37.67 on 3 and 23 DF,  p-value: 4.821e-09
```

**Figura 38: Test estadístico para estimar producción de cemento.**

[7] Cemento_1 es la producción de cemento rezagada en 1 año. De manera análoga, PIB_1 es la PIB rezagado.

La siguiente figura muestra la comparación entre la producción real de cemento y el modelo estimado.

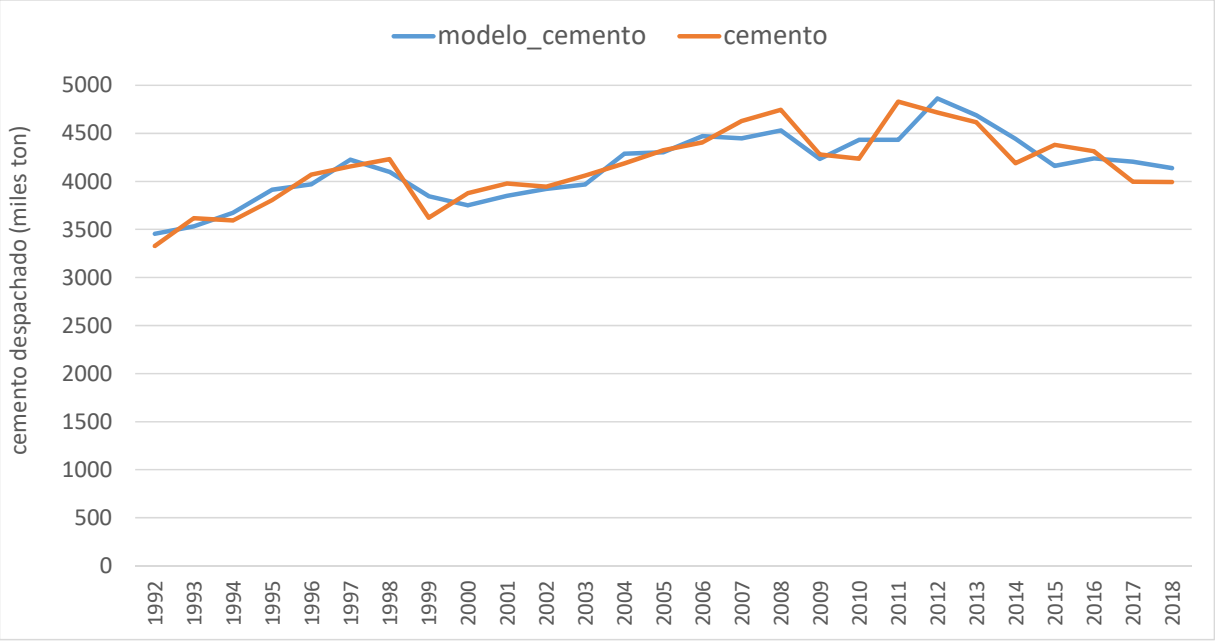



**Figura 39: Comparación entre producción real de cemento y modelo estimado.**

La siguiente figura muestra la proyección de cemento. No se espera un incremento significativo en la proyección de producción de cemento.

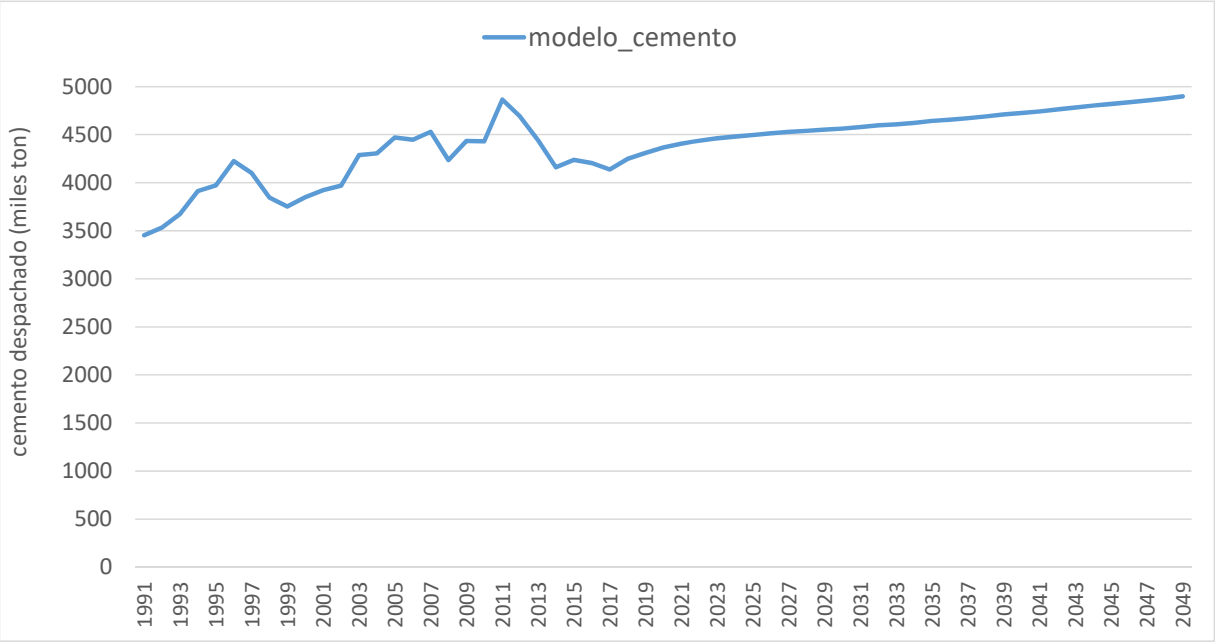



**Figura 40: Proyección de producción de cemento.**

#### 3.6.2.4 Proyección industrias varias

Para proyectar la demanda de energía del sector industrias varias se estima un modelo econométrico que correlaciona la demanda energética de este sector con el PIB nacional. En estudio previo se supuso que la tasa de crecimiento de la demanda energética crece a la misma tasa de crecimiento del PIB. Sin embargo, el análisis de los datos históricos muestra que la tasa de crecimiento de la demanda energética del sector industrias varias es menor que la tasa de crecimiento del PIB. El modelo estimado permite recoger esta evidencia observada en los datos históricos, es decir, la proyección de la demanda energética del sector industrias varias crece a una tasa menor que el PIB.

La siguiente figura muestra la estimación del modelo econométrico.

```
Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    2.5886     1.8034   1.435   0.1693
LN_Energia_1   0.4540     0.1905   2.384   0.0291 *
LN_PIB         0.2579     0.1081   2.386   0.0290 *
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.101 on 17 degrees of freedom
  (1 observation deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.5399,    Adjusted R-squared:  0.4858
F-statistic: 9.975 on 2 and 17 DF,  p-value: 0.001362
```

**Figura 41: Estimación de modelo econométrico. Don LN_Energia_1 es la demanda energética rezagada en un año.**

La siguiente figura muestra la proyección de demanda energética del sector industrias varias.

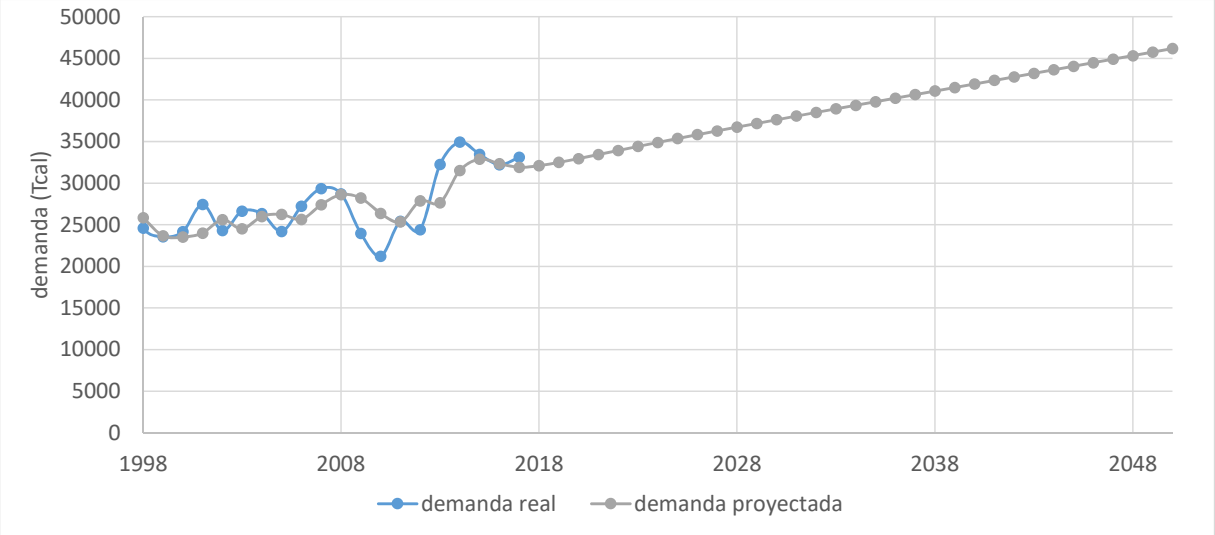



**Figura 42: Proyección de demanda energética sector industrias varias.**

### 3.6.2.5 Proyección minas varias

La proyección de producción de minas varias se estima a partir de un modelo econométrico que correlaciona la producción con el PIB nacional. La siguiente figura muestra la estimación realizada.

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.56058    0.83895   4.244 0.000488 ***
PIB          0.53955    0.07241   7.451 6.64e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.07494 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7552,    Adjusted R-squared:  0.7416
F-statistic: 55.52 on 1 and 18 DF,  p-value: 6.641e-07
```

La siguiente figura muestra la proyección de la producción del sector minas varias.

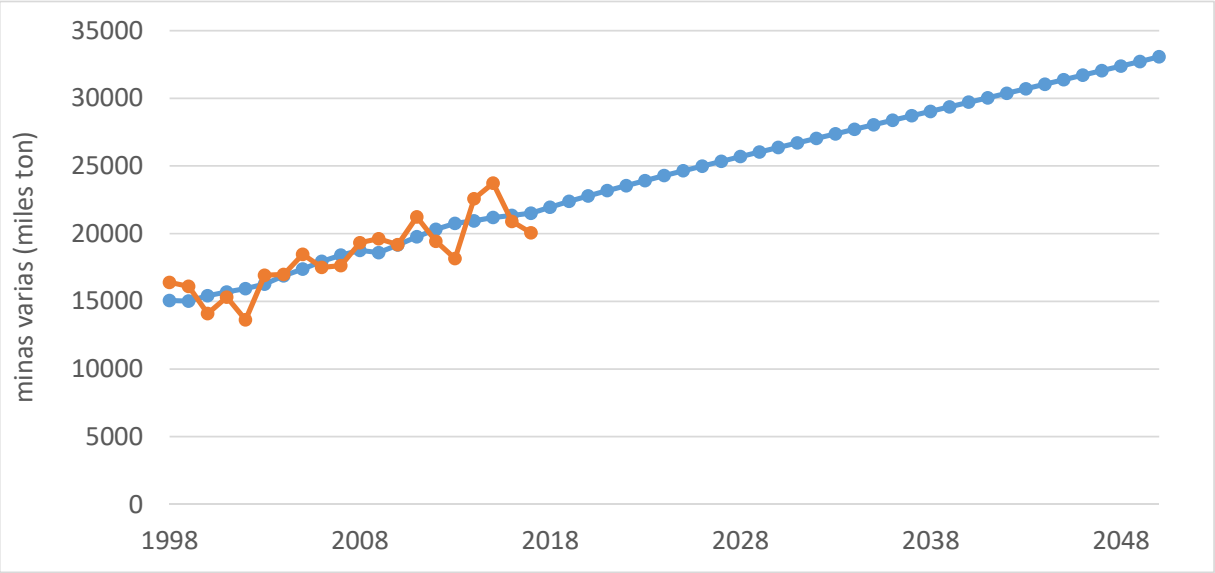



**Figura 43: Proyección de producción de minas varias.**

## 3.7 Incorporación de las variables de precios y costos en el modelo

### 3.7.1 Revisión de antecedentes previos

La revisión de la literatura internacional muestra que la inclusión de la variable precio a los modelos de proyección se pueden realizar mediante distintas maneras:

- Mediante la estimación de modelos econométricos que correlación la demanda energética con el precio de los energéticos (elasticidad precio de la demanda).
- Mediante el uso de modelos de optimización que seleccionan las tecnologías más costo eficientes (tecnologías generalmente asociadas a un tipo de energéticas) para satisfacer la demanda por servicios energéticas. Ver por ejemplo, modelo TIMES, modelo SATIM, modelo energético PMR.
- Mediante el uso de modelos de selección discreta donde la probabilidad de selección de las distintas tecnologías que satisfacen la demanda por servicios energéticos esta correlacionada con los costos relativos de cada tecnología. Ver por ejemplo modelo FORECAST y ENERGY 2020.
- Mediante el uso de modelos macroeconómicos del tipo CGE o DSGE.

Las elasticidades precio de la demanda pueden ser obtenidas de estudios previos o mediante la estimación de estas elasticidades basadas en los datos históricos disponibles. En el proyecto MAPS-Chile se utilizaron las elasticidades estimadas en estudio previo (Benavente J. y., 2012) y fueron incorporadas de manera exógena en la proyección de demanda energética del sector industria y minería. La siguiente tabla muestra las elasticidades y elasticidades cruzadas estimadas en dicho estudio.

**Tabla 32: Elasticidades de demanda de largo plazo, zona centro**

| | Gas | Petróleo | Gasolina | Electricidad |
|---|---|---|---|---|
| **Gas**[8] | -1,54<br>(-2,04:-1,04) | 0,22<br>(0,15:0,40) | 0,62<br>(0,02:1,11) | 0,7<br>(0,59:0,87) |
| **Petróleo** | 0,20<br>(0,15:0,33) | -1,28<br>(-1,63:0,76) | 0,16<br>(0,05:0,24) | 0,92<br>(0,37:1,28) |
| **Gasolina** | 0,55<br>(0,66:0,77) | 0,15<br>(0,13:0,22) | -1,40<br>(-1,62:1,06) | 0,7<br>(0,59:0,87) |

[8] De acuerdo a estudio esta categoría incluye: gas por cañería, gas licuado y gas natural. Con respecto al petróleo, el estudio no dice a qué tipo de combustible corresponde, sin embargo, se presume que hace referencia al diésel.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Electricidad** | 0,14 (0,11:0,19) | 0,20 (0,11:0,29) | 0,16 (0,05:0,24) | -0,49 (-0,61:0,37) |

**Fuente: MAPS-Chile (2014)**

En (Coordinador Eléctrico Nacional, 2018) se estimó una elasticidad del precio de la electricidad que varía entre -1,3 y -1,1 para la demanda eléctrica de clientes regulados. En estudio previo desarrollado por consultor se estimó una elasticidad precio de la gasolina igual -0,77 para la demanda de gasolina. En (Lim, Kim, Kim, & Yoo, 2012) se hace una revisión de distintas electricidades precio para la demanda de combustible en distintos países. En (de Jong et al., 2010) se estimaron elasticidades precio para la demanda de combustible asociadas al transporte de carga en Europa. La siguiente tabla muestra las elasticidades estimadas. Se estima una elasticidad precio de -0,3 para la demanda de combustible y una elasticidad precio de -0,1 para la demanda TKM.

**Tabla 33: Elasticidades precio estimada para el transporte de carga. Fuente: (de Jong et al., 2010)**

| Price change | Impact on | | |
|---|---|---|---|
| | Fuel use | Vehicle kilometres | Tonne kilometres |
| Fuel price | -0.3 | -0.2 | -0.1 |
| Vehicle kilometre price | | -0.9 | -0.6 |
| Tonne kilometre price | | | -1.0 |

Considerando la revisión de las experiencias internacionales, en la siguiente sección se ha presenta la propuesta metodológica para la incorporación de la variable precio en los modelos de proyección.

## 3.7.2 Propuesta metodológica

### 3.7.2.1 Sector transporte

En el sector transporte se analiza el impacto de las proyecciones de precios de los combustibles en las proyecciones de PKM y TKM. En el archivo Excel del modelo del sector transporte se encuentran las estimaciones de los modelos econométricos (ver hoja "Econometrías") del modelo del sector transporte, incluidas las elasticidades de precio. A modo de ejemplo, para la proyección de PKM urbano en la región Metropolita es estimó una elasticidad PIB igual a 0,8 y una elasticidad precio de la gasolina igual a -0,2. A nivel nacional se estima una elasticidad PIB igual a 1,1 y una elasticidad precio de la gasolina igual a -0,3. Es importante destacar que la variable precio no resultó significativa para todas las regiones. Asimismo, se descartaron aquellas estimaciones en las cuales se obtenía una elasticidad precio con signo positivo. La siguiente tabla resumen las elasticidades precio estimadas para la proyección de PKM urbano.

**Tabla 34: Resumen elasticidades PIB y elasticidades para proyección de PKM urbano. Se utiliza la antigua agregación de regiones.**

| Región | Elasticidad PIB regional | Elasticidad precio gasolina regional |
|---|---|---|
| I | 2,0 | -0,8 |
| II | 1,3[9] | -0,2 |
| III | 1,7 | -0,1 |
| IV | 1,2 | -0,5 |
| V | 0,9 | -0,3 |
| VI | 1,3 | -0,6 |
| VII | 1,5 | -0,5 |
| VIII | 1,0 | -0,2 |
| IX | 0,7 | -0,2 |
| X | 1,3 | -0,5 |
| XI | 1,5 | -1,1 |

[9] Para la I, II y III región se utiliza el PIB nacional para la estimación del modelo econométrico.

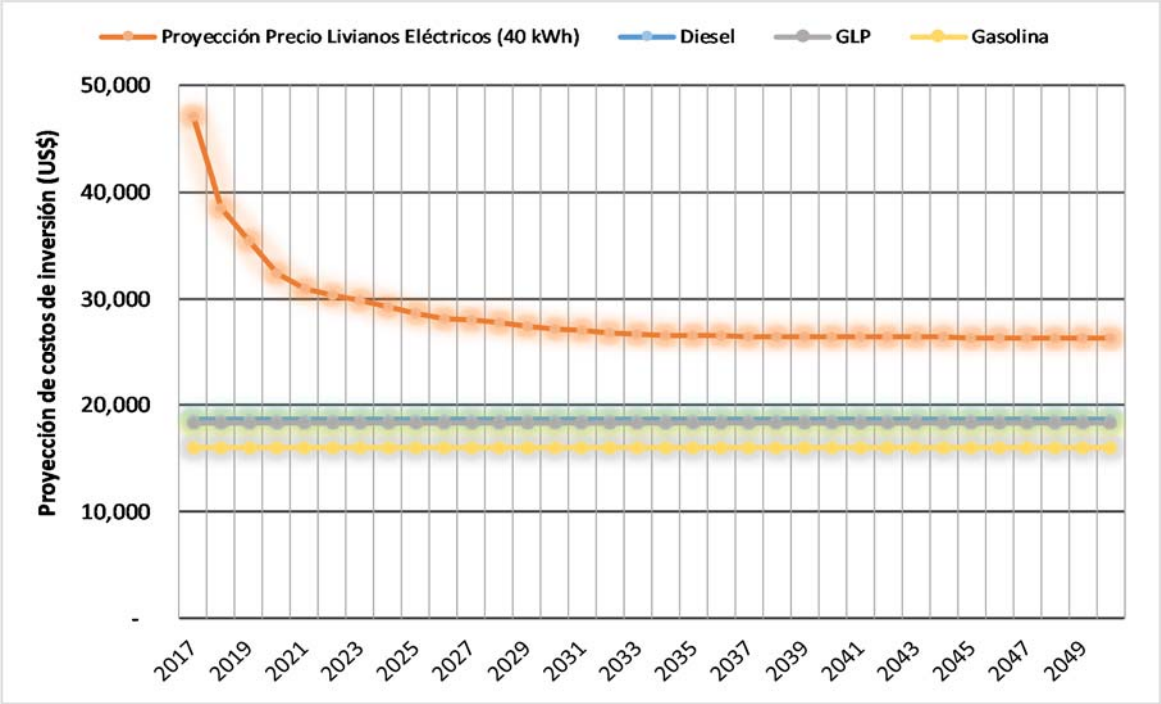
| Región | Elasticidad PIB regional | Elasticidad precio gasolina regional |
|---|---|---|
| XII | 3,9 | -0,8 |
| RM | 0,8 | -0,2 |
| Nacional | 1,1 | -0,3 |

Adicionalmente, se utiliza un modelo de optimización para incluir la variable precio de los energéticos y costos asociados al consumo de energía. Para ello se utiliza el modelo energético PMR descrito en la sección 2.2. El modelo de optimización tiene como función objetivo minimizar el costo asociado al consumo de energía y la inversión en equipos y nuevas tecnologías, pago por impuesto a las emisiones, entre otras variables. El modelo permite proyectar la demanda energética y analizar el impacto de distintas políticas energéticas y climáticas. El modelo permite capturar el impacto en la demanda energética debido a, por ejemplo, la baja en los costos de desarrollo de paneles fotovoltaicos instalados en viviendas, la baja en los costos de desarrollo de vehículos eléctricos, el recambio de combustible de calderas industriales, el uso de hidrógeno en la minería, entre otras políticas. El modelo recibe como parámetros de entrada las proyecciones de precios de los combustibles, los costos de inversión de distintas tecnologías, entre otros parámetros.

En el caso del sector transporte, el modelo de optimización se aplica para proyectar la participación por tipo de tecnología (y por ende por tipo de energético) para vehículos particulares, buses, taxis y camiones. Para los vehículos particulares se consideran las siguientes tecnologías: vehículos a gasolina, diésel, híbrido y eléctricos. Para taxis se consideran las proyecciones de las siguientes tecnologías: vehículos a gasolina, diésel, GLP, GNC, híbrido y eléctricos. Para buses se consideran buses diésel, GNC, GLP y eléctricos. Para camiones se consideran buses diésel y buses que utilizan celdas de hidrógeno. Considerando los costos inversión por tipo de tecnología, los costos de operación y mantenimiento y los precios de los combustibles (gasolina, diésel, precio electricidad, GLP, GNC, electricidad), el modelo selecciona las tecnologías económicas para satisfacer la demanda de transporte.

A modo de ejemplo, para la categoría taxis del transporte caminero, el modelo incluye las tecnologías óptimas con las que debe ser satisfecha la demanda por taxis (en veh-km), considerando las capacidades ya instaladas (taxis en circulación) en el periodo 2017-2050. Las proyecciones de vehículos kilómetros se obtiene a partir de las proyecciones de PKM descritas en las secciones anteriores y el nivel de actividad promedio de los taxis (km anuales recorridos

desagregados por región). Para este caso, el modelo considerará los costos de inversión y operación de los taxis en el horizonte de evaluación. La siguiente figura muestra las proyecciones de costos de inversión (o costo por vehículo) para cada tecnología modelada.




La siguiente figura muestra las proyecciones de precio de los energéticos. A partir de los precios de los combustibles del año base, las proyecciones se indexaron a las tasas de crecimiento de los precios de los combustibles utilizados por el Ministerio de Energía en el proceso de actualización de la PELP. Para el caso del precio de la electricidad se supuso que este precio se mantiene constante.

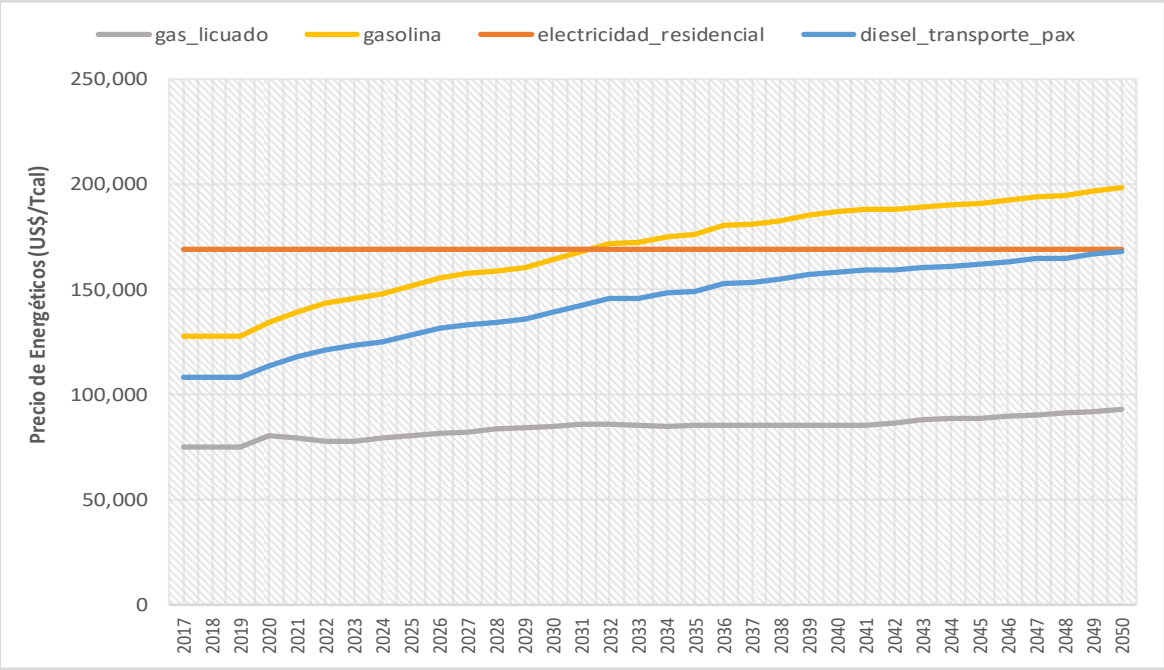



**Figura 44: Proyección del precio de los energéticos utilizados en el transporte de vehículos livianos y taxis.**

La siguiente figura muestra los resultados de la penetración tecnológica para un taxi cuyo nivel de actividad promedio es de 45.000 km/año. Como resultado del modelo, se observa que los taxis a GLP/GNC son la solución óptima entre el periodo 2017-2027, por lo tanto, su participación va aumentando. A partir del 2027, los EV se vuelven la mejor opción, y comienzan a penetrar en forma natural (principalmente debido a su reducción de costos de inversión). A partir del 2030, comprar un EV es incluso mejor que mantener un taxi a gasolina existente, y por lo tanto, desplaza a toda la demanda dejando al sistema con vehículos con capacidad ociosa.

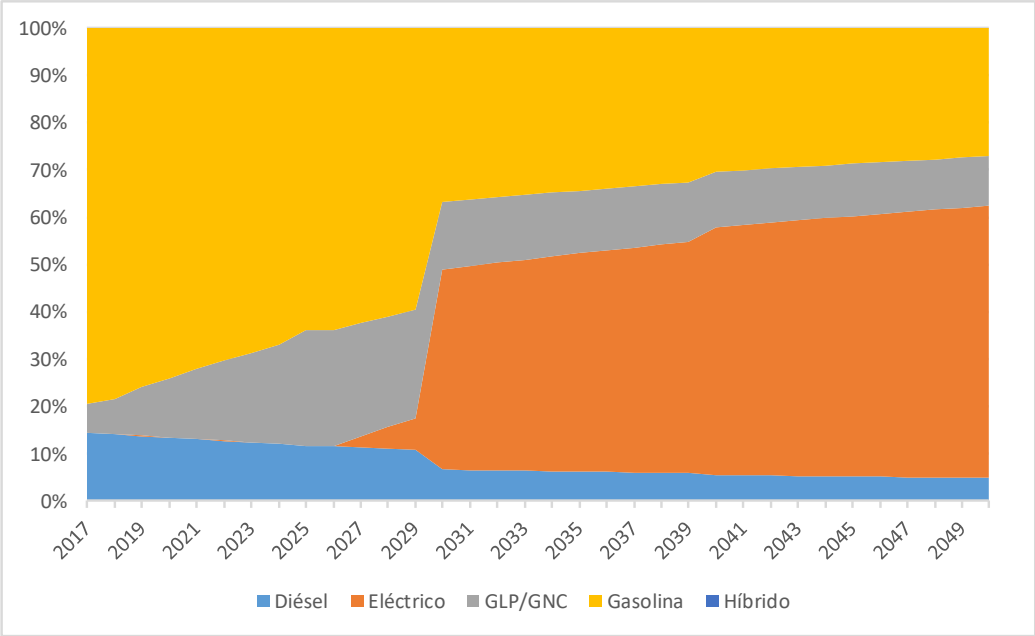



**Figura 45 Proyección tecnológica óptima de parque de taxis**

A partir de los resultados anteriores, se suaviza la curva de penetración tecnológica, considerando como punto de inflexión el año en que la tecnología más económica empieza a tener una mayor participación. La siguiente figura muestra la curva de penetración suavizando los cambios bruscos de participación tecnológica. Posteriormente, esta participación tecnológica por tipo de combustible se ingresa de manera exógena al modelo implementado en Excel, para posteriormente cargar estor resultados en el modelo LEAP. Un tratamiento similar se realiza para los sectores industria, minería y residencial que se describen a continuación.

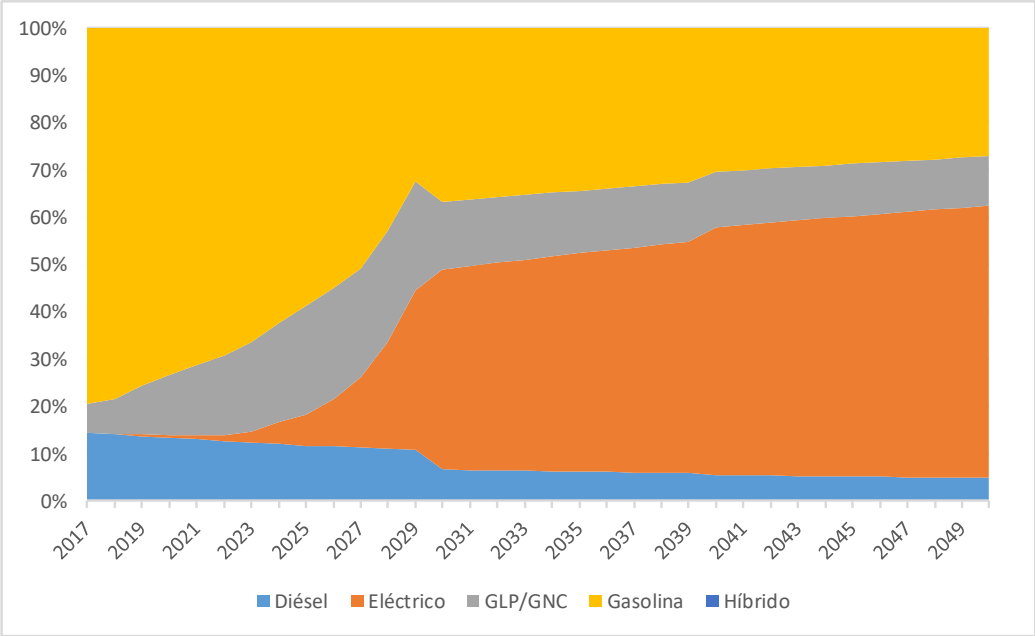



**Figura 46 Ejemplo de propuesta de trayectoria línea base taxis considerando precios y suavizando la entrada de nuevas tecnologías.**

#### 3.7.2.2 Sector industria y minería

A continuación se describe la metodología para incluir la variable precio en el modelo del sector industria y minería. De acuerdo a la descripción metodológica de las secciones anteriores, en este sector se representan los siguientes usos finales de la energía: calor, motriz y otros usos eléctricos. La demanda por uso térmico se desagrega en calor hornos y calor calderas debido a que son 2 tecnológicas con costos de inversión distintos.

El modelo de optimización debe determinar cuál es tecnología más costo efectiva que permite satisfacer la demanda energética asociada a cada uso final. La demanda energética está correlacionada con las proyecciones industriales que se describieron en las secciones anteriores. Para hornos y calderas se pueden utilizar las siguientes tecnologías (o combustibles): horno o calderas a diésel, gas licuado, electricidad y gas natural. Para uso motriz se pueden utilizar las siguientes tecnologías: motores eléctricos y a diésel.

El modelo minimiza el gasto en energía considerando los costos de inversión en caldera, hornos y motores, y las correspondientes proyecciones de precio de los energéticos asociadas a cada tecnología. La siguiente figura muestra las proyecciones de precio de los energéticos para el sector industria y minería.

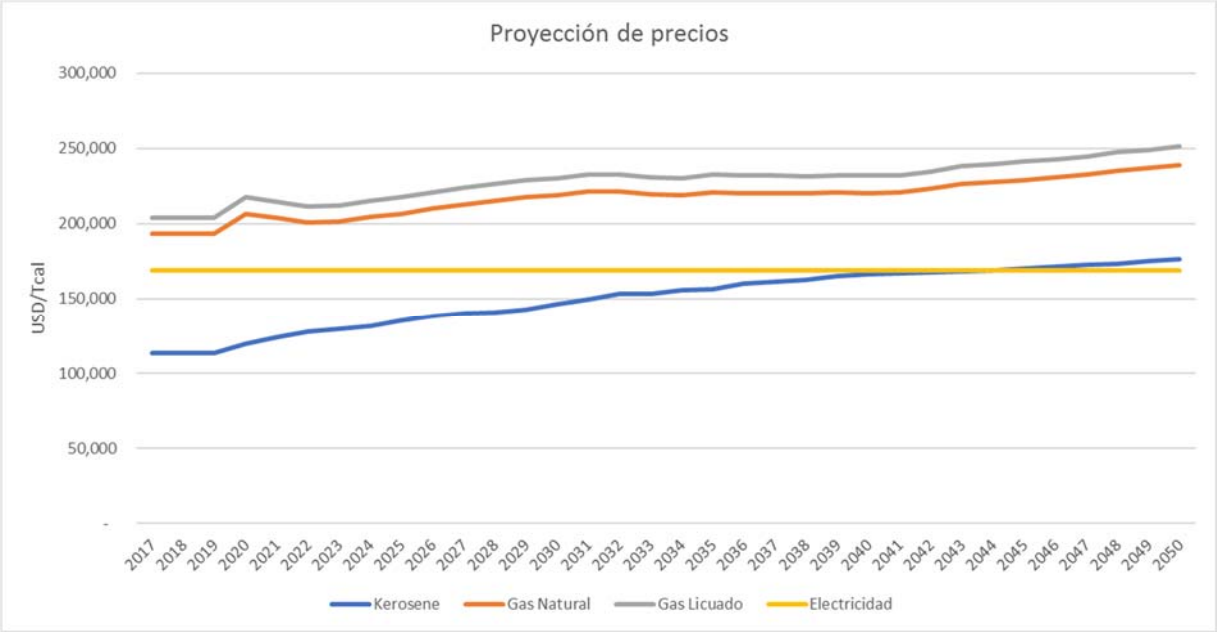



**Figura 47: Proyección del precio de los energéticos utilizados en el sector industria y minería.**

Para ejemplificar la modelación del sector industria y minería, la siguiente figura muestra los resultados obtenidos para la Región Metropolitana y para la demanda por tipo de combustible para satisfacer la demanda de calor. Los resultados muestran que el gas natural es la tecnología que tiene una mayor participación y reemplaza paulatinamente otros tipos de combustibles. Por ejemplo, el uso de diésel se elimina hacia el año 2022, y el uso de electricidad y el gas licuado para el año 2019. El uso de biomasa se restringe en esta región, limitando que nuevas instalaciones hagan uso de este tipo de combustible. La biomasa solo se utiliza en las instalaciones existentes reduciendo su participación gradualmente durante todo el periodo de evaluación.

Estas participaciones por tipo de combustible posteriormente se ingresan como dato de entrada en los modelos implementados en formato Excel. En el modelo LEAP se ingresan los cambios de penetración de forma gradual teniendo en consideración los resultados entregados por el modelo de optimización.

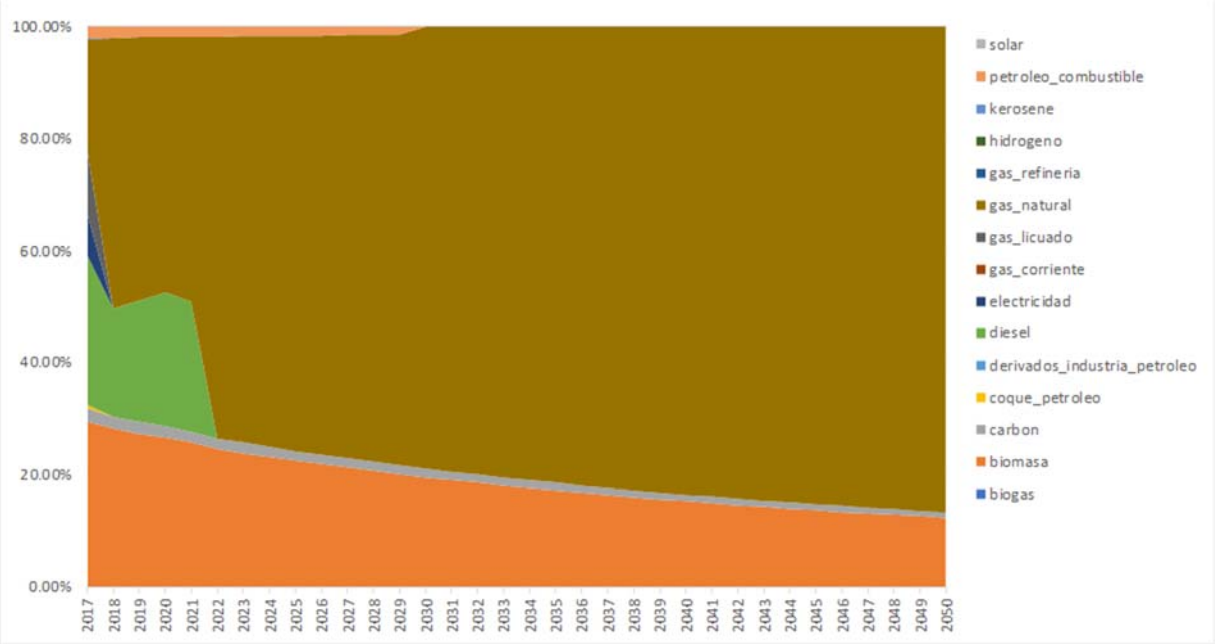



**Figura 48: Proyección de la participación por energético en procesos térmicos del sector industrias varias.**

Los resultados anteriores no consideran la potencial entrada del uso de energía solar para satisfacer la demanda de calor en la industria. Al incluir la energía solar como parte de las tecnologías que permiten satisfacer la demanda de energía por uso final, se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente figura. Se observa que la energía solar térmica empieza a entrar a partir del año 2026, consecuentemente disminuyendo la participación de gas natural.

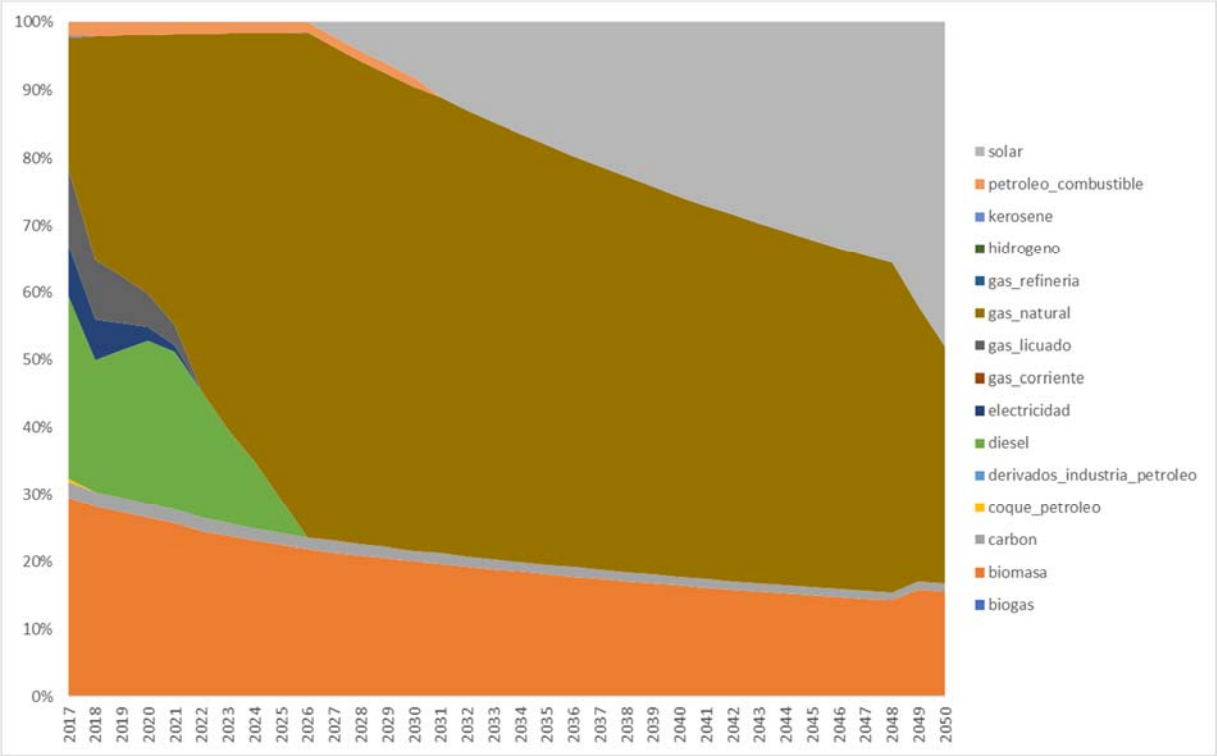



**Figura 49: Proyección de la participación por energético en procesos térmicos del sector industrias varias.**

#### 3.7.2.3 Sector residencial

A continuación se describe la metodología para incluir la variable precio en el modelo del sector residencial. Como se explica en las secciones metodológicas anteriores, en el sector residencial se identifican los siguientes usos finales: calefacción, ACS, cocción y artefactos eléctricos.

El modelo de optimización debe determinar cuál es tecnología más costo efectiva que permite satisfacer la demanda energética asociada a cada uso final. La proyección de demanda por uso final se obtiene a partir de los resultados de la metodología descrita en secciones anteriores y que se utiliza para cargar el modelo LEAP (en función del crecimiento del número de vivienda, confort térmico, etc.). Para la demanda energética por calefacción se consideran las siguientes tecnologías: calefacción en base a parafina, gas natural, gas licuado y electricidad. El modelo minimiza el gasto en energía considerando los costos de inversión en equipos de calefacción y las correspondientes proyecciones de precio de los energéticos asociadas a cada tecnología.

La modelación del sector residencial es realizada en los usos finales de calefacción puesto que esta información es más fácil de conseguir. No obstante, el modelo también podría ser aplicado para representar todos los usos finales como ACS y cocina. La modelación contempla la distinción entre casas y departamentos para representar la restricción de la leña en edificios multifamiliares y otras condiciones características del tipo de vivienda, como es la demanda energética por confort térmico.

## 3.8 Análisis de diversas medidas de eficiencia energética y otras políticas

El Centro de Energía hará un análisis de diversas medidas de Eficiencia Energética contenidas en el Plan de Acción de Eficiencia Energética. El Plan de Acción identifica una serie de medidas con el objetivo de aumentar la eficiencia energética en el país. A continuación, se describe brevemente cada medida propuesta por el Plan de Acción y las cuales podrían potencialmente se modeladas tanto en el modelo LEAP como en el modelo MAED. La lista de medidas de eficiencia energética que serán modeladas es acordada en común acuerdo con la contraparte técnica, previo análisis previo desarrollado por el consultor. El análisis previo considera la disponibilidad de información, el potencial impacto de la medida (basado en la experiencia del consultor o basada en resultados de estudios previos), entre otras variables. La lista de medidas propuestas se describe a continuación.

### 3.8.1 Sector industria y minería

**Promover la implementación de Sistemas de Gestión de Energía en el sector industrial y minero.** La implementación de medidas de eficiencia energética en los sectores productivos tiene como objetivo reducir las emisiones, tanto directas como indirectas, mediante la disminución del consumo de energéticos para producir algún tipo de trabajo necesario para la producción industrial o minera. Esto se puede conseguir de muchas formas, entre ellas con medidas de eficiencia energética en equipos existente o en recambio de tecnologías antiguas por tecnologías más eficientes.

Una de las medidas que se puede implementar en modelos prospectivos corresponde a la implementación de un estándar mínimo de eficiencia energética para motores eléctricos Según el diagnóstico realizado por (River Consultores, 2014) el parque actual de motores es equivalente a una eficiencia del tipo IE1 (equivalente a 84,7% para motores menores a 10 HP). De acuerdo con este estudio esta medida resulta ser costo-efectiva y su implementación implica una mejora en el parque de motores de aproximadamente un 2% cuando los motores de hasta 10 HP y estándar IE1 son reemplazados por motores con estándar IE2.

| Rangos de Potencia (X) | Motor representativo | Estándar actual de la industria | MEPS | Beneficio Presente Neto (Millones USD) |
|---|---|---|---|---|
| ≤10 HP | 5,5 HP | C-IE1 | B-IE2 | 67.2 |
| 10 HP < X ≤50 | 30 HP | C-IE1 | | 210.4 |
| 50 HP < X ≤100 | 75 HP | C-IE1 | | 206.8 |
| 100 HP < X ≤500 | 150 HP | C-IE1 | | 91.0 |
| Total | | | | 575 |

**Figura 50 Beneficio presente neto de aplicación de medida MEPS en motores eléctricos para distintos rangos de potencia**

En este estudio se estima que al aplicar esta medida el parque de motores puede ser actualizado completamente para el año 2030 de acuerdo con la figura siguiente.

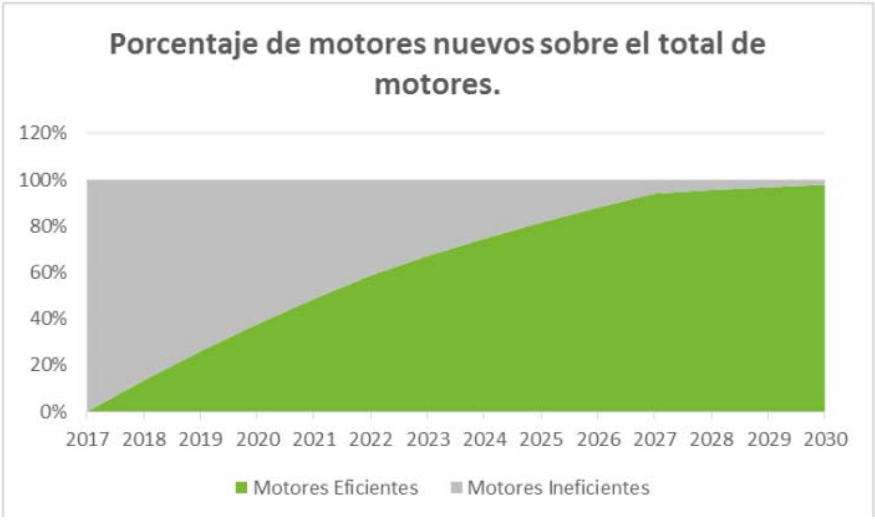



**Figura 51 Gráfico de la proyección de reemplazo de motores ineficientes por motores eficientes al aplicar medid de MEPS en motores eléctricos**

Para todos los sectores industriales se puede modelar esta medida utilizando los datos de eficiencia del uso final denominado motriz. Mediante cálculos exógenos al modelo se puede determinar la trayectoria que la eficiencia del parque instalado tendría si se aplica la medida de MEPS en motores eléctricos. Adicionalmente, se pueden generar distintas trayectorias de acuerdo con que tan restrictiva puede ser la medida, por ejemplo, si se aplica a un rango más amplio de potencias o si la medida exige una eficiencia mínima mayor.

Además de mejorar la eficiencia de motores eléctricos, es posible la aplicación de medidas de eficiencia energética en procesos térmicos en el sector industrial y minero. En particular,

existen grandes oportunidades de reducción de costos y de emisiones de GEI en procesos de generación de vapor o agua caliente. Se estima que es posible reducción de consumo de un 15 % aplicando medidas como:

- Reparación de fugas en líneas de vapor.
- Control de carga en calderas.
- Mejorar la operación de las calderas.
- Instalación de economizadores.
- Instalación de recuperadores de calor.
- Mejorar la eficiencia en los quemadores.
- Eliminar impurezas.

Al igual que lo comentado de medidas del tipo MEPS, mejoras en la eficiencia de tecnologías existentes pueden ser representadas en el modelo mejorando la trayectoria de eficiencia de cada uso final. En el caso de medidas en procesos térmicos se calcula la mejora agregada de la eficiencia del parque instalado de acuerdo con potenciales de eficiencia energética.

**Promover y fomentar la cogeneración:** el objetivo es aumentar la inversión en cogeneración, eliminando barreras regulatorias para alcanzar el potencial de penetración de esta tecnología en el país.

La medida modela el potencial de cogeneración, asumiendo que es un subproducto de la generación eléctrica, reemplazando consumos térmicos basados en combustibles tradicionales por energía térmica proveniente de la producción eléctrica. Los datos utilizados en el estudio anterior provienen del Estudio para el Desarrollo de la Cogeneración en Chile realizado por PRIEN en 2010, actualizando los datos para el año 2014. En la tabla siguiente se muestran los potenciales determinados en este estudio.

**Tabla 35 Potencial de cogeneración (PRIEN 2010)**

| Región | Hierro | Cobre | Salitre | Celulosa y papel | Siderurgia | Petroquímica | Cemento | Azúcar | Pesca | Ind. varias | Minas varias |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,0 | 50,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,3 | 51,7 | 0,0 |
| 2 | 0,0 | 313,1 | 40,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,2 | 491,0 | 0,0 |
| 3 | 329,9 | 214,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,3 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,1 | 187,8 | 0,0 |
| 5 | 0,0 | 143,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,1 | 0,0 | 0,0 | 17,3 | 439,8 | 0,0 |
| 6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 265,7 | 0,0 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **7** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 96,7 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 200,2 | 0,0 |
| **8** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,8 | 0,0 | 474,3 | 954,2 | 0,0 |
| **9** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 124,7 | 0,0 |
| **10** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,0 | 371,2 | 0,0 |
| **11** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,8 | 0,0 | 0,0 |
| **12** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **RM** | 0,0 | 49,3 | 0,0 | 1061,8 | 1,6 | 0,0 | 44,9 | 0,0 | 0,0 | 1414,7 | 0,0 |
| **14** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,6 | 88,3 | 0,0 |
| **15** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 18,6 | 32,0 | 0,0 |

Para incorporar esta medida se supone un porcentaje de penetración anual y un año de inicio definidos por el usuario. El cálculo se realiza en función del potencial de cogeneración de la tabla mostrada. En el modelo se cuantifica el ahorro de esta medida como una reducción en la intensidad del consumo térmico de cada sector.

**Incorporación de tecnologías eficientes:** Se busca apoyar la adquisición y reemplazo de tecnologías más eficientes por parte de la industria, mediante mejoras en la relación entre proveedores y consumidores, asistencia técnica, cofinanciamiento, entre otras iniciativas. Esta medida representa cambios tecnológicos en procesos existentes por otros que presentan alguna ventaja comparativa, que, sin embargo, por costos, desconocimiento, u otras razones no han sido masificados. Entre las medidas consideradas para modelar se encuentran el recambio de combustibles altos en emisiones por energéticos más limpios como impulsar el uso de gas natural, biomasa o energía solar en procesos térmicos. La introducción de energía solar presenta un gran potencial de reducción de emisiones en el país debido a los altos niveles de radiación solar en la zona norte del país. En el caso de la minería del cobre en (Moreno Leiva, 2016) se muestra que grandes reducciones en emisiones pueden ser alcanzadas incorporando energía solar térmica en hidro procesos de la minería del cobre, permitiendo reducir hasta 2090 kgCO2e/tCu, con hasta un 75% de penetración en procesos térmicos.

Para modelar esta medida se modifican las trayectorias de penetración de cada tecnología. Por ejemplo, que en regiones con presencia de gas natural se alcancen niveles de penetración superiores a los del escenario base. O que en regiones en las que se tengan buenos niveles de radiación solar se alcancen metas de penetración solar para el año 2050.

**Introducción de hidrógeno**; El reemplazo de combustibles fósiles por combustibles no convencionales como el hidrogeno ha sido considerado como una medida clave para reducir emisiones GEI en el largo plazo. En el estudio desarrollado por (CORFO, 2018) plantean un

escenario 100% renovable para el año 2035, identificando como medida necesaria para alcanzar esta meta la aplicación de hidrogeno en celdas de combustibles para vehículos pesados, utilización de hidrogeno en procesos térmicos, entre otras aplicaciones. Además, se analiza la incorporación de tecnología solar en la producción de hidrogeno como se ve en la cadena de producción del H2 mostrada en la figura

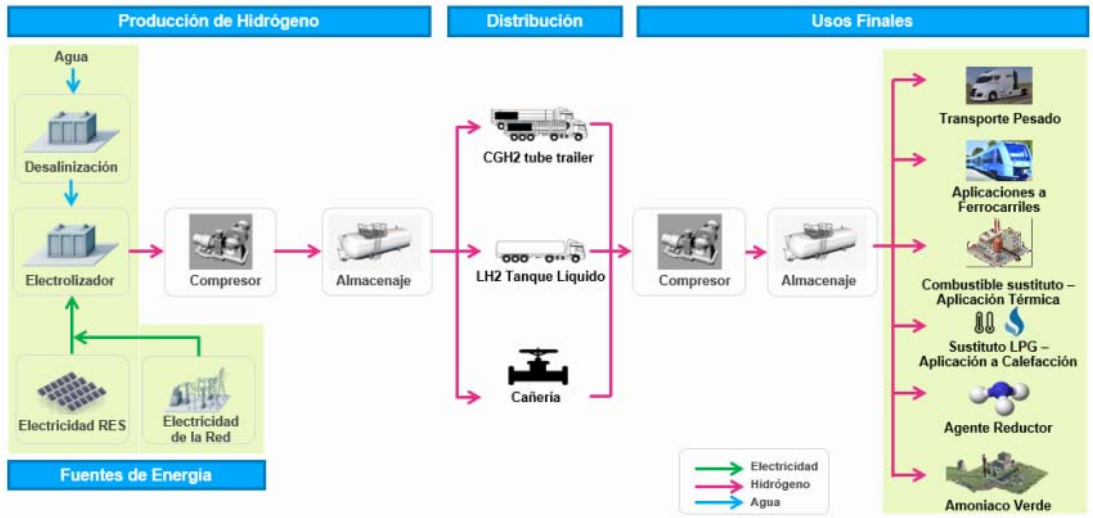



**Figura 52 Esquema de cadena de producción de Hidrogeno en escenario 100% renovable**

En la figura se muestra la cadena de producción analizada por el estudio del comité solar de CORFO y las aplicaciones de este combustible en transporte pesado y usos térmicos para reducir emisiones de GEI en procesos productivos.

Esta medida puede ser aplicada tanto en procesos motrices (transporte pesado en minería) o en procesos térmicos. En el modelo la medida se incorpora agregando el hidrogeno como combustible adicional a procesos motrices y térmicos.

### 3.8.2 Sector transporte

**Mejorar la eficiencia de vehículos livianos y medianos que ingresan al país**: La medida tiene como objetivos incentivar la compra de vehículos más eficientes mediante la promoción de estándares de eficiencia energéticos y mecanismos de información.

A partir del año 2012, se implementó en Chile el programa de etiquetado vehicular para vehículos livianos nuevos, y a partir de 2017 se inició el programa de etiquetado para vehículos medianos. La información generada a partir de este programa ha sentado las bases para el establecimiento de estándares de rendimiento energético mínimos para este el segmento liviano. Actualmente, se encuentra en trámite legislativo la ley de eficiencia energética, la cual facultaría al Ministerio de Energía para establecer estándares de rendimiento energético mínimos.

En su primera etapa se espera el establecimiento de estándares de rendimiento mínimo sobre el segmento de vehículos livianos. El estándar es aplicado sobre los vehículos nuevos vendidos, y es aplicado a los promedios corporativos. Lo anterior tiene como enfoque mejorar el rendimiento promedio de los vehículos nuevos que ingresan al mercado nacional. Se espera que en el futuro los estándares sean extendidos a medianos y pesados.

Esta medida puede ser modelada ya sea aumentando la tasa de mejora anual de rendimientos de las tecnologías de combustión interna, o aumentando la participación de tecnologías de alto rendimiento energético como, por ejemplo, la participación de vehículos eléctricos. La dificultad de implementar esta medida dada la estructura del modelo, es que el rendimiento de los vehículos es característico de todo el parque.

**Mejorar eficiencia del parque actual de vehículos pesados:** Para alcanzar esta meta, se busca capacitar choferes de vehículos pesados sobre técnicas de conducción eficiente y uso de sistemas de gestión de flota para disminuir el consumo de combustible. Esta medida será modelada aumentando la tasa de mejora de rendimiento de los segmentos camiones.

**Incentivar el cambio hacia el transporte más eficiente:** El objetivo es el traspaso de pasajeros del transporte tradicional al transporte público y transporte no motorizado. Esta medida considera que la demanda por transporte (por ejemplo, en pasajeros-kilómetro) sea cubierta por modos de transporte más eficientes. La medida puede ser incluida en el modelo, cambiando la partición modal de los distintos modos.

**Iniciación a la movilidad eléctrica**: La medida busca reducir el consumo energético debido a la mayor eficiencia de los vehículos eléctricos en comparación al uso de combustibles tradicionales.

Esta medida tiene como objetivo evaluar los efectos de masificación del uso de vehículos eléctricos. La medida contempla la meta inicial planteada en [2]. Se alcanza un 100% buses eléctricos urbanos al 2050, y se mantiene la meta del 40% vehículos eléctricos particulares al 2050.

Figura 53 Meta inicial de electromovilidad Chile 2050. (Ministerio de Energía, 2017)

Las trayectorias evaluadas son presentadas a continuación:

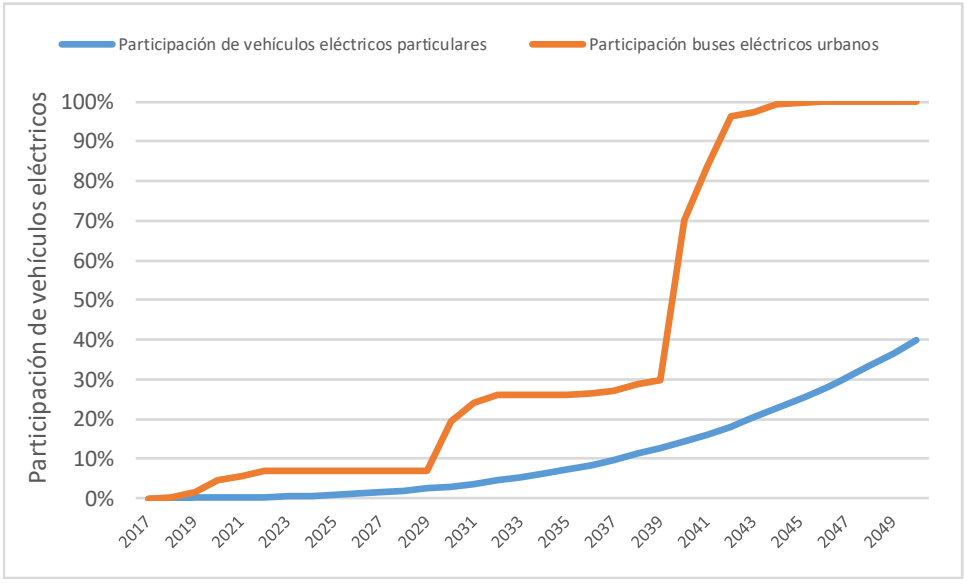



Figura 54: Proyección de penetración de vehículos eléctricos considerados en trayectoria 1

La medida será evaluada cambiando la participación tecnológica de las categorías vehículos particulares y buses. Dado que la medida es aplicada sobre los buses de transporte urbano,

será aplicado sobre el porcentaje de buses del transporte urbano de cada de cada región. Los porcentajes de participación de los buses urbanos en la categoría buses son presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 36 Participación de buses urbanos en categoría buses por región**

| Región | Buses + Minibús total 2017 | Buses Urbanos 2017 | Porcentaje de participación de Buses Urbanos |
|---|---|---|---|
| Región de Arica y Parinacota | 402 | 285 | 70.9% |
| Región de Tarapacá | 968 | 392 | 40.5% |
| Región de Antofagasta | 1,226 | 994 | 81.1% |
| Región de Atacama | 360 | 116 | 32.2% |
| Región de Coquimbo | 1,605 | 680 | 42.4% |
| Región de Valparaíso | 3,840 | 2,134 | 55.6% |
| Región del Libertador Bernardo O'Higgins | 1,695 | 388 | 22.9% |
| Región del Maule | 2,628 | 630 | 24.0% |
| Región del Bío Bío | 4,694 | 2,546 | 54.2% |
| Región de La Araucanía | 2,261 | 878 | 38.8% |
| Región de Los Ríos | 946 | 314 | 33.2% |
| Región de Los Lagos | 2,661 | 898 | 33.7% |
| Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo | 350 | 13 | 3.7% |
| Región de Magallanes y la Antártica Chilena | 257 | 84 | 32.7% |
| Región Metropolitana | 12,061 | 6,671 | 55.3% |

### 3.8.3 Sector CPR

**Mejorar calidad energética de la envolvente térmica** El objetivo es reducir el consumo energético mediante la mejora en el rendimiento térmico, lumínico, ventilación, hermeticidad de la construcción. Esta medida evalúa la mejora de envolvente térmica que consiste en aumentos de exigencia en la reglamentación térmica de la construcción de viviendas nuevas. La mejora en la reglamentación térmica se traduce como una disminución en la demanda de energía destinada a calefaccionar el hogar reduciendo el consumo energético del sector residencial.

El modelo en su línea base considera una mejora natural en la envolvente térmica de las casas debido a la construcción de nuevas viviendas con la última reglamentación térmica. Las medidas de recambio se modelan incorporando un porcentaje anual de recambio de viviendas existentes. Esto significa que cada año una fracción de las viviendas va a disminuir sus pérdidas térmicas (en el estudio anterior fue considerada una mejora del 10%)

La mejora de la envolvente térmica también puede ser modelada implementando una reglamentación térmica más exigente para viviendas. Por ejemplo, una trayectoria ambiciosa consistiría en aplicar el estándar *passivhaus* alemán, que corresponde a la reglamentación térmica más exigente en el mundo. Bajo este estándar se proyectan reducciones de demanda en calefacción y enfriamiento de cerca de un 80% con respecto a la situación actual[10].

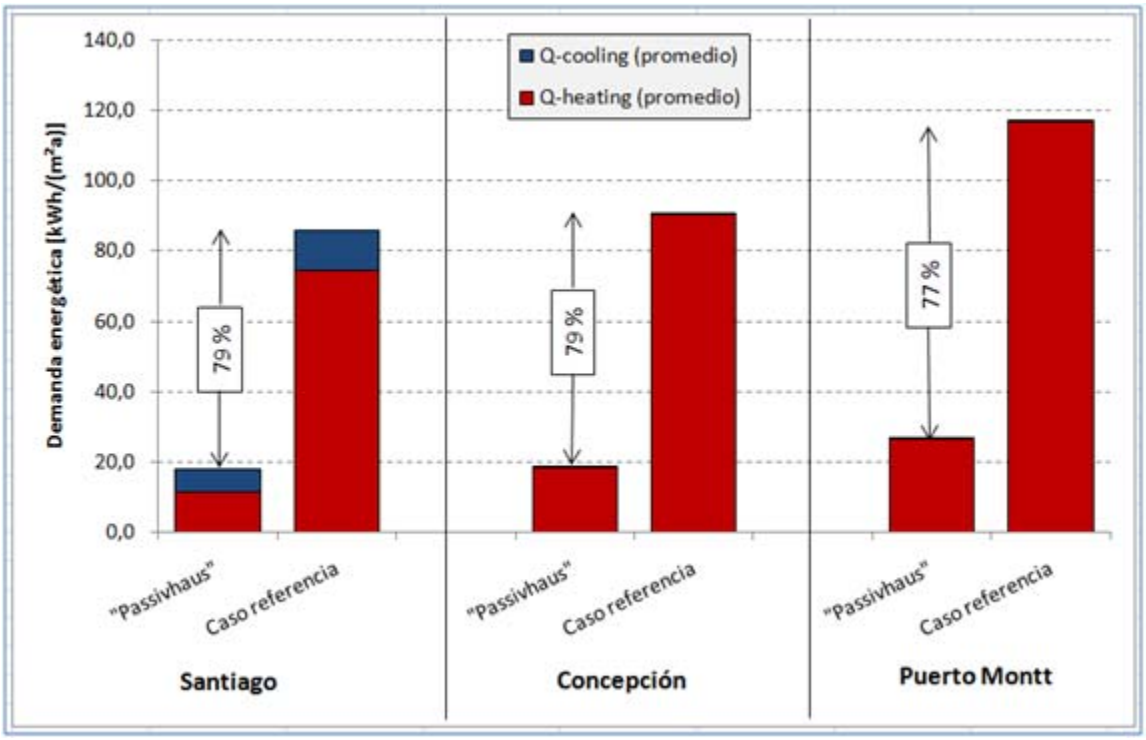



**Figura 55 Disminución de la demanda en calefacción y enfriamiento al aplicar estándar de diseño *passivhaus* con respecto al consumo actual.**

[10] http://passivhaus-chile.cl/#Que_es

Esta medida se modela reduciendo el coeficiente de perdidas térmicas GV calculado para viviendas existentes (si hay reacondicionamiento) o de viviendas nuevas (si existe una reglamentación más exigente).

**Promover eficiencia energética en alumbrado de vías vehiculares y zonas peatonales de áreas urbanas:** La medida tiene como objetivo apoyar a los gobiernos municipales en el proceso de recambio de alumbrado público por alumbrado eficiente. La medida se modela reemplazando un porcentaje de las luminarias de alumbrado por luminarias más eficientes. En el estudio anterior esta medida aplicaba como un porcentaje del subsector "otros". El usuario ingresa una trayectoria de reemplazo de luminarias y se recalcula el consumo eléctrico de este subsector en base a la mejora de la eficiencia.

**Promover el aumento del consumo de biomasa con formas más eficientes como pellets y briquetas.** Esta medida tiene como objetivo reducir el consumo energético de biomasa en calefacción residencial, utilizando formas de biomasa más eficientes. Por ejemplo, el pellet presenta un poder calorífico de 4.300 tcal/kg, mientras que la biomasa en general de 3.500 tcal/kg.

Esta medida se representa en el modelo mediante una mejora en la eficiencia de los calefactores en base a biomasa.

**Autoconsumo a nivel residencial**: Esta medida consiste en la introducción de energía renovable en sistemas de distribución en baja tensión. En particular, se modela la introducción de paneles fotovoltaicos en viviendas para reemplazar parte del consumo eléctrico de las viviendas. Estudios muestran que en el corto plazo va a comenzar la masificación de este tipo de sistemas en el país debido a la existencia de zonas con alta radiación solar y las proyecciones a la baja de los paneles fotovoltaicos como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 37 Reducción de costos de inversión (USD/W) de tecnologías fotovoltaicas publicado en proceso PELP 2017 del Ministerio de Energía**

| Año | Optimista | Conservador |
|---|---|---|
| 2016 | 1.66 | 2.7 |
| 2020 | 1.27 | 1.9 |
| 2025 | 0.99 | 1.5 |
| 2030 | 0.84 | 1.3 |
| 2035 | 0.73 | 1.1 |
| 2040 | 0.64 | 1 |
| 2045 | 0.59 | 0.9 |
| 2050 | 0.56 | 0.8 |

De acuerdo con la figura, aun en el escenario más conservador existe una reducción importante de los costos de inversión en tecnologías fotovoltaicas a nivel residencial.

En los gráficos de la siguiente figura se muestra la tendencia actual de instalaciones inscritas y la evolución de la potencia instalada a nivel residencial de los últimos 3 años. Estas cifras muestran el interés creciente en este tipo de tecnologías y que con las proyecciones a la baja de los costos se espera se masifique aún más.

**Figura 56: Gráficos que muestran aumento en las instalaciones inscritas de autoconsumo eléctrico en distribución.**

Esta medida se modela mediante la incorporación de un artefacto eléctrico adicional con consumo energético negativo. La producción de energía eléctrica para autoconsumo se calcula utilizando una potencia instalada por vivienda característica (por ejemplo 2 kW/viv) y un factor de planta calculado en el explorador solar para cada región.

**Electrificación a nivel residencial**: Esta medida consiste en el aumento paulatino de artefactos eléctricos (cocina, ACS y calefactores), reemplazando artefactos con altas emisiones de GEI. La medida se incorpora en el modelo modificando el nivel de penetración del uso de la electricidad como principal energético utilizado en los usos ya mencionados. Cálculos preliminares muestran que del consumo energético para calefaccionar los hogares solo el 0.3% fue mediante calefactores eléctrico. La medida se modela modificando la trayectoria de penetración de la electricidad como energético en cada uno de los usos finales.

## 3.9 Analizar las posibles variabilidades en los datos de entrada y sus salidas de la herramienta.

La incertidumbre que rodea las variables económicas y los fenómenos físicos complica considerablemente el análisis económico de los problemas. Como no siempre es posible tomar decisiones sobre la base de una evaluación objetiva de los datos científicos, a veces es necesario recurrir a métodos más subjetivos para compensar las faltas de información. Sin embargo, la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre no es totalmente subjetiva, ella puede enmarcar el conocimiento disponible, tomar en cuenta el grado de incertidumbre y estimar la extensión de la falta de conocimiento (ignorancia). El análisis en condiciones de alta incertidumbre debería estar orientado a seleccionar la mejor estrategia sobre la base de una evaluación imparcial de los datos cuantitativos y cualitativos disponibles. [Group Economic Experts 1991]

El propósito central en la toma de decisiones, y en la formulación y análisis de políticas, es identificar los factores relevantes y fuentes de desacuerdos en un problema, de tal forma de poder anticipar lo inesperado. El tratamiento consciente de la incertidumbre nos obliga a pensar más cuidadosamente acerca de estos temas y en las eventualidades y contingencias del problema [Morgan y Henrion 1990].

La incertidumbre afecta el modelo determinístico al incorporar aleatoriedad en variables de entrada. Errores en los resultados del modelo pueden deberse a variabilidad natural (por ejemplo, la hidrología), como también a errores en los datos de entrada, los parámetros del modelo o del modelo mismo. La figura siguiente muestra una clasificación posible de tipos de incertidumbre.

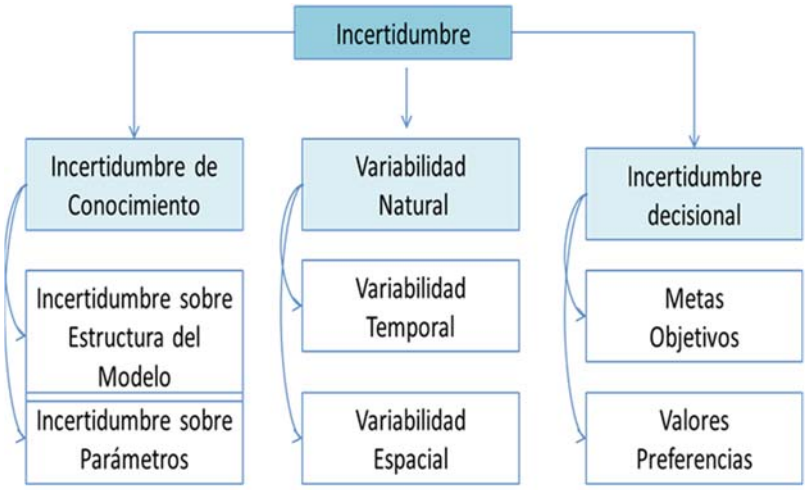



**Figura 57: Una Clasificación de Tipos de Incertidumbre. Fuente: Water Resources Systems Planning and Management –UNESCO.2005.**

La incertidumbre asociada a la representación adecuada del proceso bajo estudio en el modelo suele conocerse como incertidumbre estructural.

Una alternativa de clasificación, en vez de comparar variabilidad natural versus incertidumbre del conocimiento, distingue entre fuentes de incertidumbre. Por ejemplo, incertidumbres de información, incertidumbre asociada a los modelos y errores numéricos.

### 3.9.1 Análisis determinístico

El análisis de sensibilidad a través del uso de escenarios es la alternativa más sencilla y con más aplicaciones. El análisis de sensibilidad explora y cuantifica los impactos de posibles errores en los datos de entrada de un modelo en el resultado. Nuevos supuestos sobre el futuro definen escenarios comparables al caso promedio. Específicamente, se cambian valores de las variables de entrada y se repite el cálculo que entrega la variable de salida. La ventaja principal del análisis de sensibilidad es la simplicidad. La desventaja es que no entrega información respecto de la probabilidad de ocurrencia de cada uno.

Además del escenario valor medio, suelen construirse escenarios asociados al mejor y peor caso tomando el menor peor o mejor valor que cada variable puede tomar. Sin embargo, no

es necesariamente cierto que la evaluación del peor caso en cada variable entregue el peor resultado a la salida del modelo[11].

A pesar de las limitaciones de este enfoque, su uso permite establecer análisis exploratorios. El análisis de sensibilidad también permite identificar como los valores de salida cambian ante modificaciones en los valores de entrada. Por lo anterior, ante la incapacidad de desarrollar análisis de incertidumbre formales, siempre es recomendable sensibilizar las variables principales mediante el uso de escenarios.

En función de la revisión del modelo de referencia, el consultor propone las siguientes sensibilizaciones:

- Proyecciones de PIB (tasa de crecimiento)

  A partir de antecedentes entregados por el Ministerio de Hacienda en Junio del 2019, se propusieron tres trayectorias de tasas de crecimiento del PIB al año 2050 (real). Ellas corresponden a una Banda inferior, nivel Base y Banda Superior. Esta proyección se encuentra en revisión en el Ministerio, así que apenas se disponga de la actualizada, se usará en el modelo.

[11] Para ilustrar el punto, en http://www.strategy-at-risk.com/2011/03/01/plans-based-on-average-assumptions/ se muestra que la distribución conjunta de la suma de dos variables aleatorias normales e independientes X+Y no coincide con la suma de las distribuciones de X y de Y para valores que se alejan de los valores esperados de las variables.

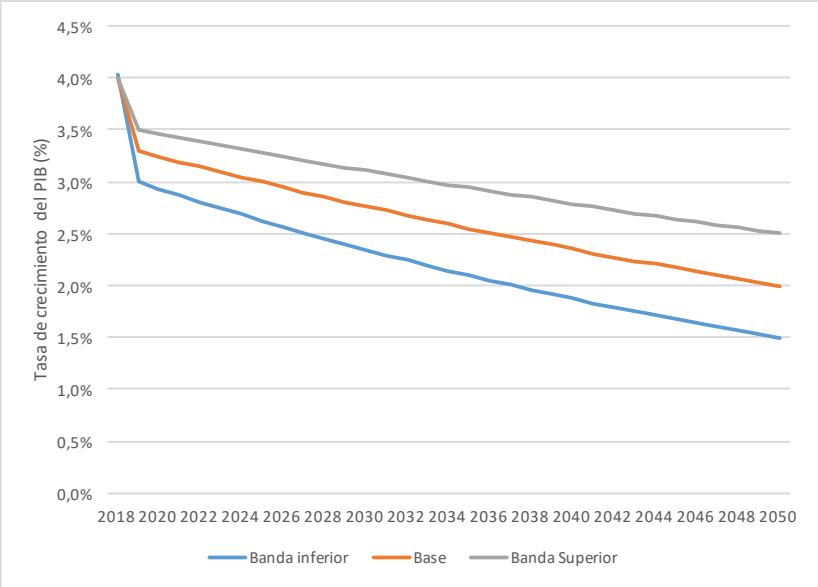



**Figura 58: Variación de la tasa de crecimiento del PIB. Fuente: Ministerio de Hacienda (2019).**

- Sensibilidad de producciones del sector industria y minería

El consultor propone realizar un análisis de sensibilidad de las producciones de cobre, producción de celulosa y producción de hierro. De acuerdo al Balance Nacional de Energía del año 2017, el sector cobre, celulosa e industrias varias representan el 79% de la demanda energía del sector industria y minería. Por tal motivo, se seleccionan las producciones industriales de estos sectores como parámetros a sensibilizar. También se incluye la producción de hierro debido a la incertidumbre asociada al proyecto Dominga. Por último, debido a que proyección de demanda de energía del sector industrias varias dependen de la proyección de PIB, las sensibilidades de PIB afectarán de manera indirecta las proyecciones de este sector.

Como se analizó en la sección 3.6.2, para la proyección de cobre se dispone de tres escenarios de crecimiento de la producción del cobre: base, alto y bajo. Los escenarios alto y bajo serán utilizados como una sensibilización del escenario base.

Como se revisó en la sección 3.6.3, la evolución de la producción de la producción de celulosa a nivel nacional depende de la construcción de una nueva planta en la región del Biobío (proyecto MAPA) que entraría en operaciones en el año 2022. De esta forma, se propone un

escenario de sensibilidad que atrase la entrada de este proyecto hasta el año 2025. Ambos escenarios se observan en la figura siguiente.

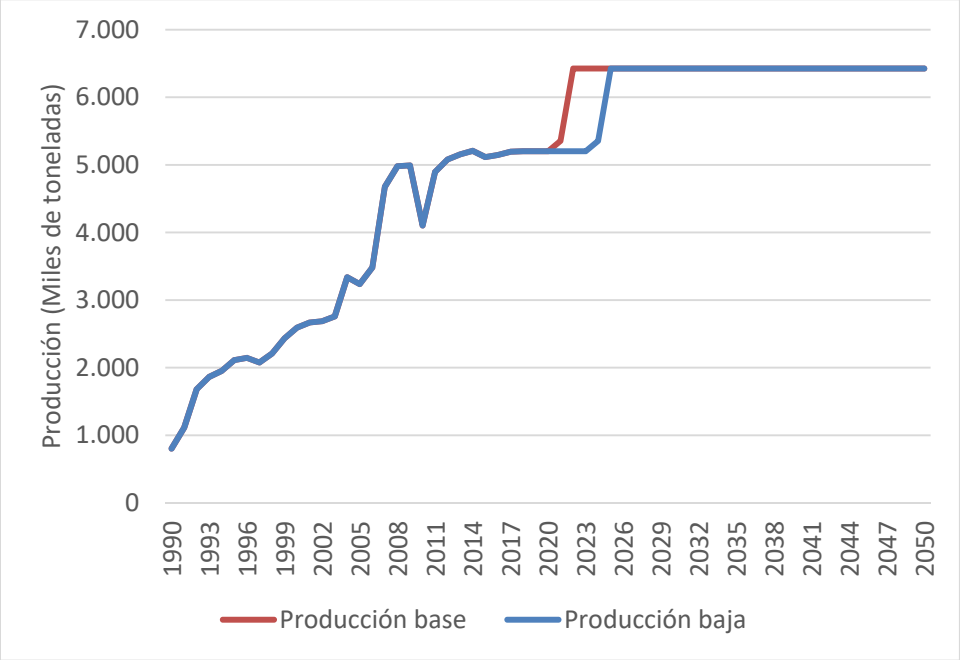



**Figura 59: Escenarios de producción de celulosa 2017 - 2050. Fuente: Elaboración propia basado en INFOR (2018) y CORMA.**

- Curva de crecimiento de confort térmico

El consultor propone realizar sensibilidades con respecto al nivel de confort técnico que se alcanza en el horizonte de evaluación. Para efectos de proyectar el aumento del uso de calefacción, se estiman los consumos energéticos actuales de las viviendas por metro cuadrado, y se proyectan hasta llegar a niveles de confort térmico, de acuerdo a un determinado PIB per-cápita, en cada uno de los escenarios de PIB. Se estima que entre los 30,000 – 35,000 US$/pers/año (MAPS-Chile, 2014), la población prioriza niveles de confort en sus viviendas y que todo el parque de vivienda logra ese status. Para llevar a cabo una sensibilidad en esta variable se proyectan dos escenarios, alcanzando el confort térmico en el primer escenario a los 35,000 US$/pers/año y en un escenario alternativo en los 50,000 US$/pers/año (cerca del año 2050).

Esta proyección se realiza mediante una curva logística (ver figura siguiente), ya que el comportamiento, tanto en el aumento de tenencia de artefactos, como de incremento del confort de las viviendas, presenta un comportamiento en forma de curva "S", donde presenta crecimientos planos al principio, y luego crecimientos pronunciados, para finalmente volver a crecer lentamente al llegar al límite superior.

- Niveles de penetración de electromovilidad (2 trayectorias)

Adicional al escenario base, se propone evaluar una trayectoria alternativa de penetración de vehículos eléctricos, basada en la meta de penetración presentada en la Estrategia Nacional de Electromovilidad desplegada en la siguiente figura.

**Figura 60: Meta inicial de electromovilidad Chile 2050. (Ministerio de Energía, 2017)**

Se propone una trayectoria que alcanza un 100% buses eléctricos urbanos al 2035, mientras se alcanza una penetración del 60% de vehículos eléctricos particulares al 2050.

- Número de viviendas

Para calcular el número de viviendas en el horizonte de evaluación es necesario estimar el número de habitantes por viviendas. A partir de las tendencias históricas que se obtienen de los últimos censos de población (1992, 2002 y 2017) se observa que entre los años 1992, 2002 y 2017 el número de habitantes por vivienda disminuyó de 4.23 a 3.8 y a 2,7, respectivamente y se espera que la tendencia siga hasta llegar a niveles de países de mayor desarrollo y densificación, cuya ocupación es del orden de 2.1 – 2.3 habitantes por viviendas (línea punteada de la figura siguiente).

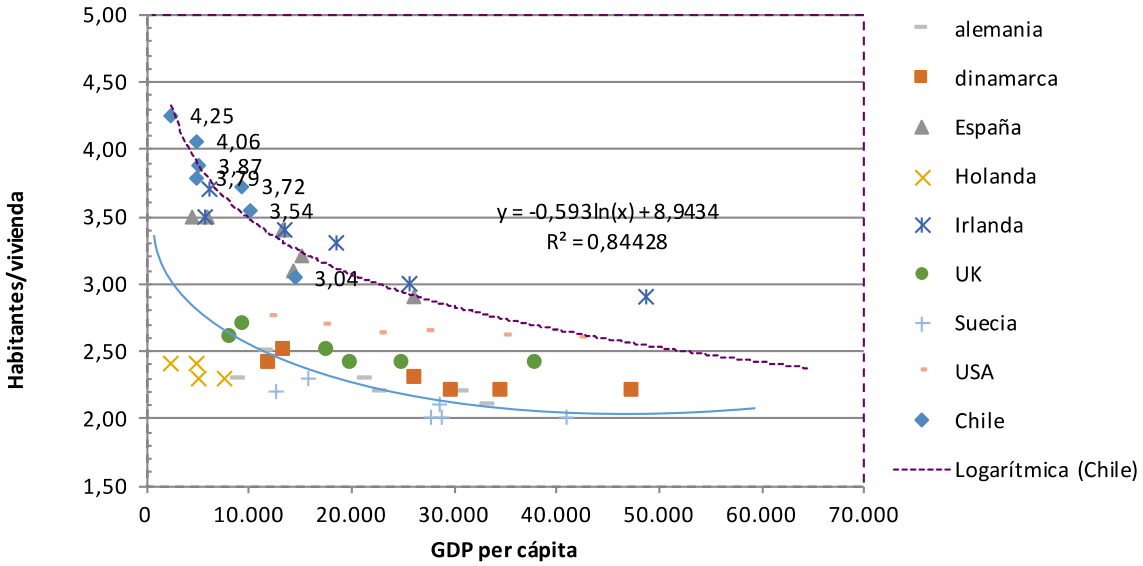



**Figura 61: Escenarios de habitantes por vivienda en función del PIB per cápita. Fuente: Elaboración propia basado en MAPS-Chile (2014)**

Sin embargo, de acuerdo a estas tendencias de disminución de habitantes por vivienda respecto a la variación del PIB per cápita, para diversos países de mayor desarrollo (Alemania, España, Dinamarca. Irlanda, etc.) desarrolladas en MAPS-Chile (2014), existen países que poseen una tendencia más agresiva de reducción, llegando del orden de los 2 habitantes por vivienda para un PIB per cápita de USD 45.000. Esta tendencia se tomará como escenario alternativo a ser evaluado.

### 3.9.2 Análisis probabilístico

El análisis de incertidumbre a través de una simulación es una alternativa mucho más realista para tratar la incertidumbre. Este es un método computacional que permite tratar la incertidumbre cuantitativamente. La simulación entrega al tomador de decisiones con una amplia gama de posibles resultados, sus probabilidades de ocurrencia y revela casos extremos.

La simulación permite construir modelos de los resultados posibles asociados a valores distintos que pueden tomar ciertas variables. A cada variable que conlleva incertidumbre

entonces se le asocia una distribución de probabilidad. Al utilizar distribuciones, las variables pueden asignar distintos pesos a eventos diferentes. Los valores de las distintas variables aleatorias entran a un modelo (función de transformación) para obtener la distribución de variables de salida (resultados). La figura siguiente esquematiza el análisis de incertidumbre realizado en una simulación.

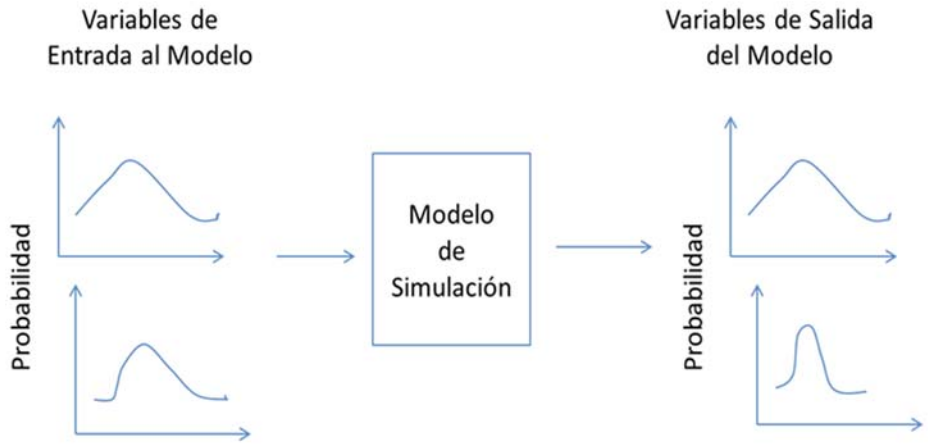



**Figura 62: Modelos de Simulación. Fuente: Replicado de Water Resources Systems Planning and Management –UNESCO.2005.**

Una simulación permite describir el rango de resultados posibles y asociarle alguna medida de probabilidad. También en un contexto de análisis de riesgo permite estimar la probabilidad que una variable de salida sobrepase algún valor crítico[12].

Asimismo, el consultor desarrollará una metodología para realizar proyecciones de demanda tomando en cuenta distintas condiciones de probabilidad de los principales parámetros y driver de los modelos. El prototipo básico será implementado durante el desarrollo de la consultoría. El consultor construirá funciones de probabilidad para representar la incertidumbre de las principales variables de entrada o *drivers* del modelo. Por ejemplo, en estudio recientemente publicado por el consultor en la revista *Climate Policy* ("Using probabilistic analysis to improve greenhouse gas baseline forecasts in developing country contexts: the case of Chile"), el consultor desarrolló una metodología para proyectar demanda de energía de largo plazo considerando incertidumbre en las variables relevante del modelo: PIB, población, producción de cobre, entre otras. Las proyecciones de demanda de energía son

[12] También permite realizar inferencia formal. Estimación de media, varianza, ajuste de una distribución, entre otros.

utilizadas posteriormente para proyectar emisiones de gases de efecto invernadero por sector (industria, comercial, residencial y público). El consultor generará familias de series a partir del uso de distintos modelos (PIB, población, producción minera, etc.). Lo anterior con la finalidad de contar con series de futuros posibles asociados a probabilidades de ocurrencia.

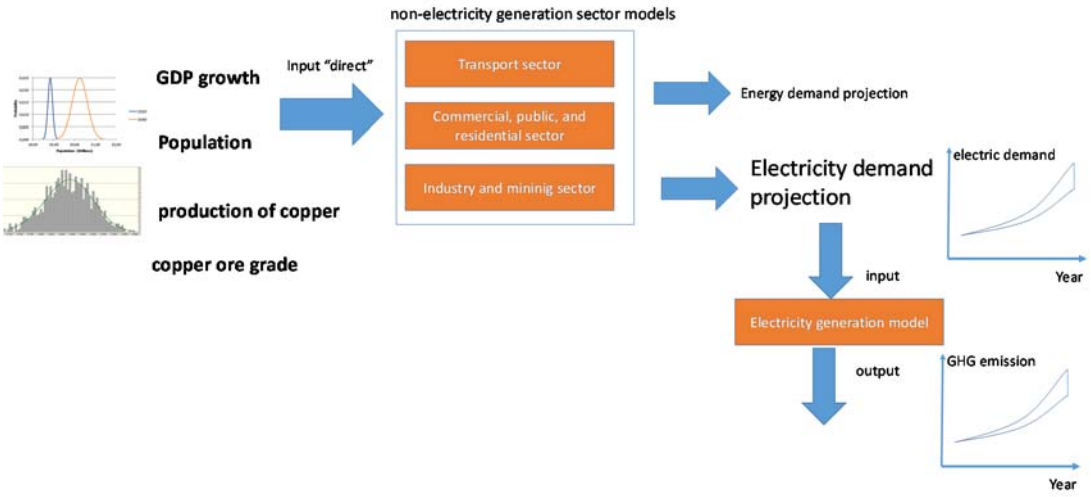



**Figura 63: Metodología utilizada por consultor en estudio previo para proyectar demanda eléctrica considerando incertidumbre en PIB, población, producción de cobre y ley del mineral.**

# 4 Implementación de modelo LEAP

La implementación del modelo LEAP fue realizada mediante una rutina programa en el lenguaje de programación Python. El software desarrollado en Python lee cada una de las hojas Datos LEAP de las planillas sectoriales ubicadas en la carpeta planillas sectoriales. Por medio de los comandos de la API del LEAP cada uno de los datos de la hoja son cargados en el programa LEAP. El tiempo de ejecución de esta rutina es de aproximadamente 50 minutos para la carga completa de todos los sectores.

En la siguiente figura se muestra la proyección de demanda de energía para los sectores modelados en este estudio: industria, minería, transporte, residencial, comercial y público.

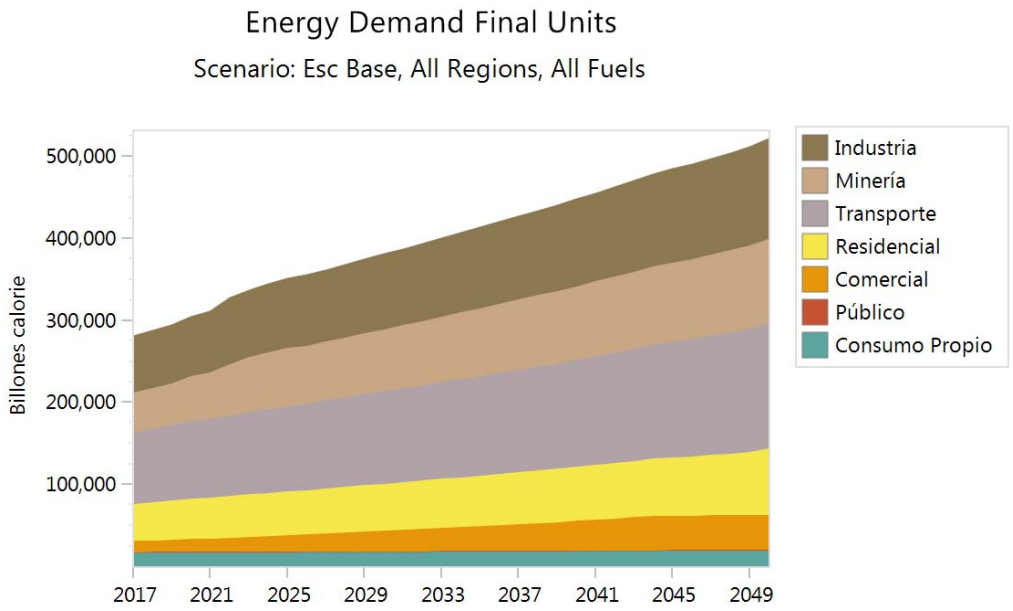



**Figura 64 Proyección en modelo LEAP de la demanda de energía por sector**

Otra salida relevante del modelo corresponde a la distribución geográfica de la demanda energética. Siendo la región metropolitana, la región 2 y la región 8 las regiones con mayores consumos energéticos en el país. La siguiente figura muestra las proyecciones de demanda desagregadas por región.

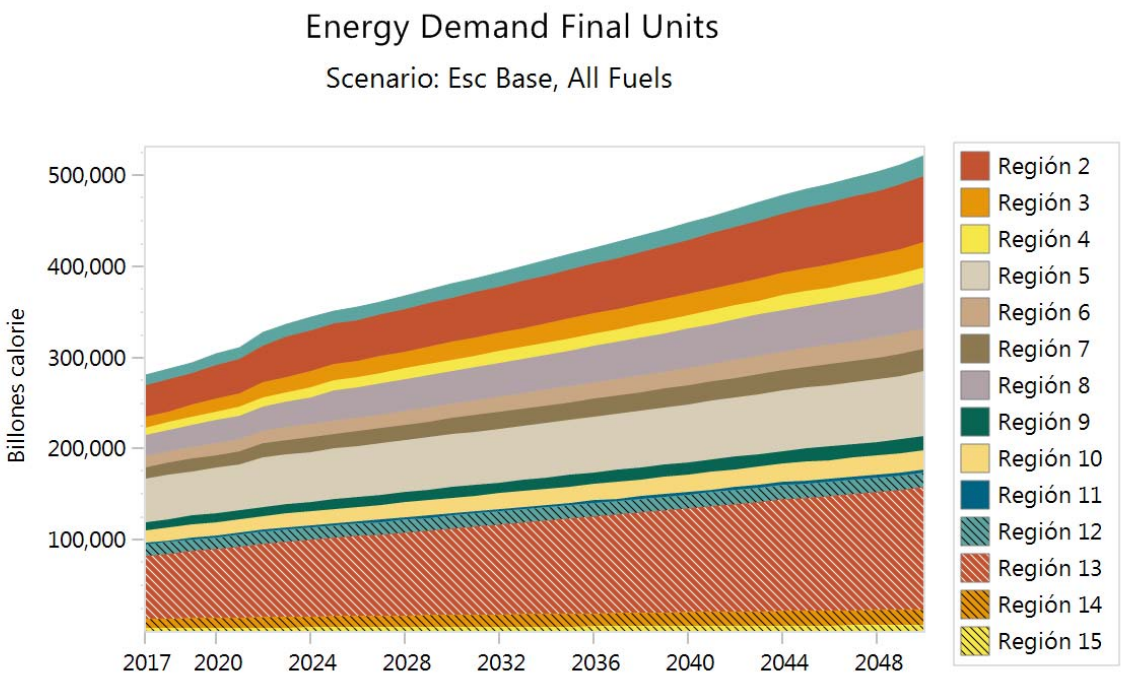



**Figura 65 Proyección en modelo LEAP de la demanda de energía por región**

La proyección de la demanda energética por energético a nivel nacional se muestra en la siguiente figura. Se puede observar la importancia de los consumos de diésel y de electricidad principalmente en la matriz de la demanda de sectores productivos.

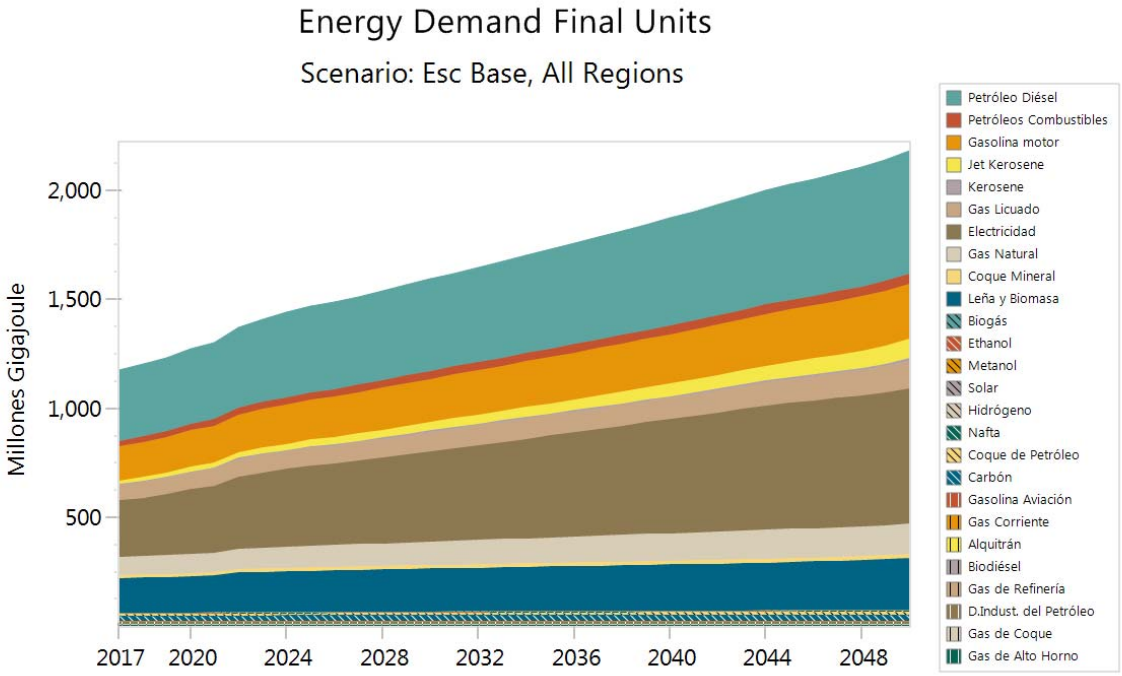



**Figura 66 Proyección en modelo LEAP de la demanda de energía por energético**

A continuación, se muestran los resultados a nivel de un energético. En particular se muestran los resultados obtenidos para la proyección de la demanda eléctrica. En la siguiente figura se muestra la demanda eléctrica total a nivel nacional en GWh.

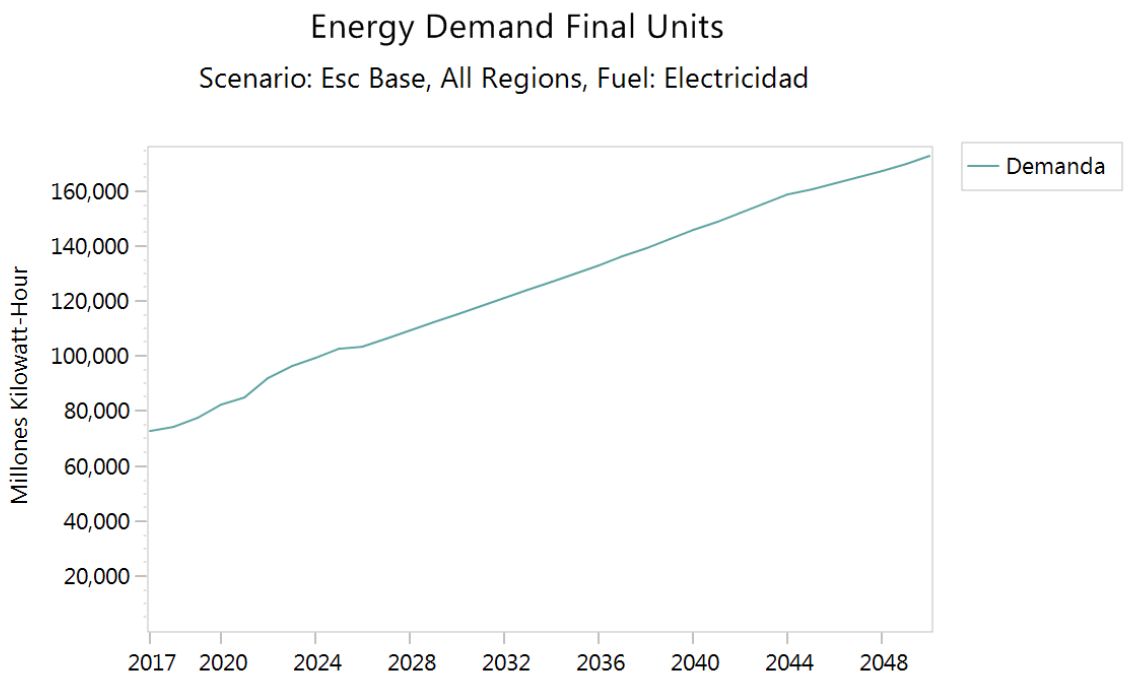



**Figura 67 Proyección de la demanda eléctrica a nivel nacional**

En el siguiente gráfico se muestran la proyección de la demanda eléctrica por sector económico. Siendo la actividad minera la que representa el mayor consumo de electricidad a nivel nacional.

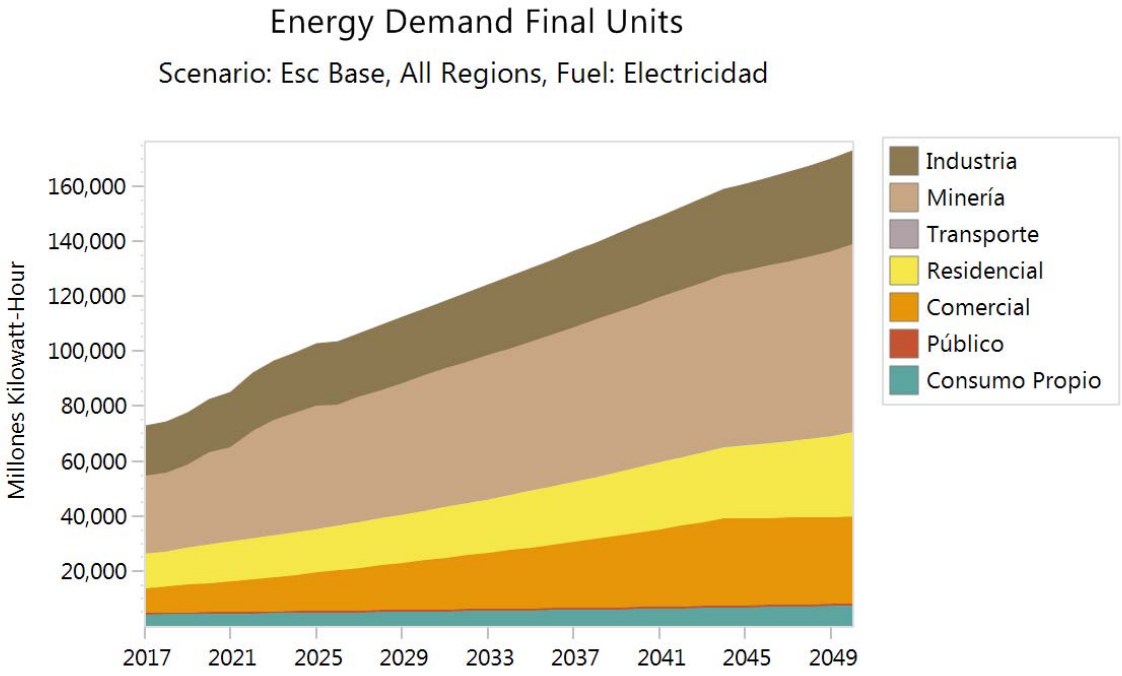



**Figura 68 Proyección de la demanda eléctrica por sector económico**

La distribución geográfica de la demanda se muestra en el siguiente gráfico. En relación con lo anterior la región 2 proporcionalmente concentra gran parte de la demanda junto con la región metropolitana.

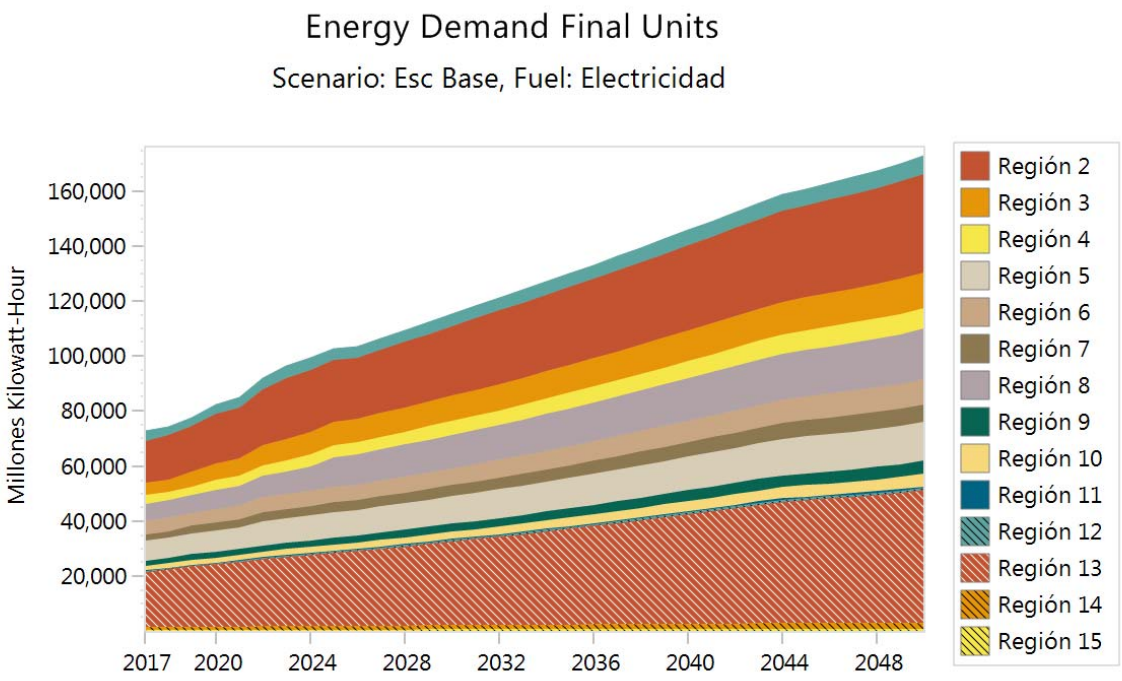



**Figura 69 Proyección de la demanda eléctrica por región**

Finalmente, otro resultado importante de la modelación es la proyección de emisiones de gases de efecto invernadero. En el siguiente gráfico se muestra la proyección de las emisiones por sector económico.

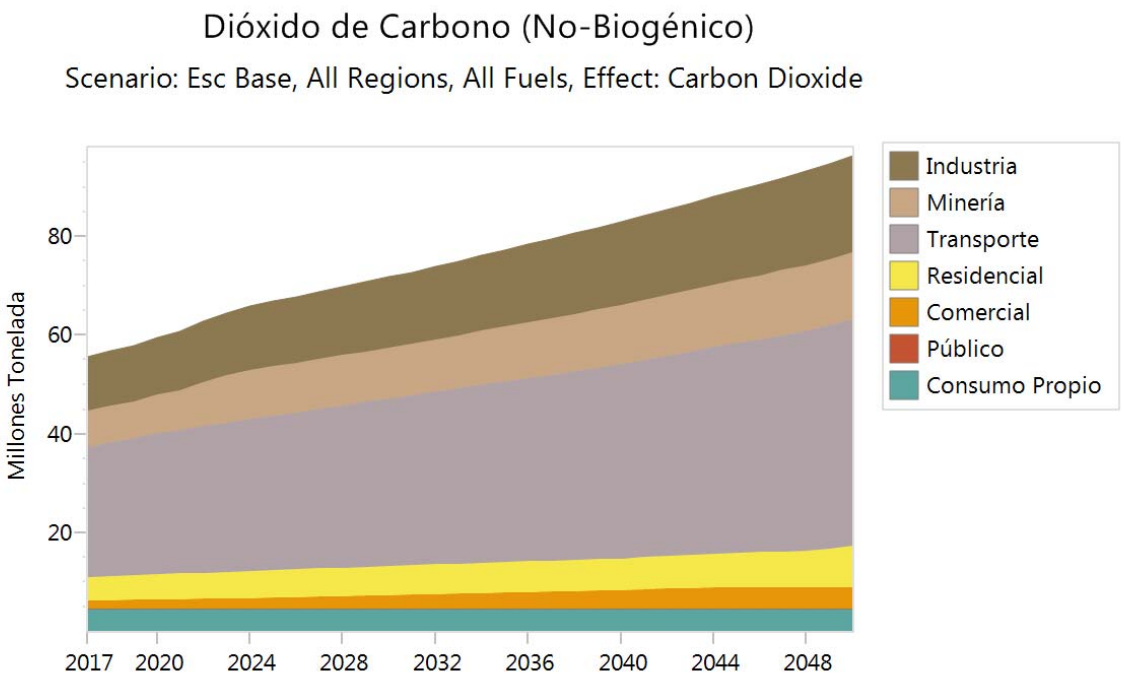



**Figura 70 Proyección de las emisiones por sector económico.**

# 5 Implementación de modelo MAED

El modelo MAED (Model for Analysis of Energy Demand) es una herramienta perteneciente al grupo ENPEP, el cual captura el sistema energético de manera física, económica y ambiental. El MAED corresponde al módulo de análisis de la demanda energética.

a) Alcances del modelo MAED

El modelo MAED evalúa en el mediano a largo plazo la demanda futura de energía en base a escenarios de desarrollo socioeconómico, tecnológico y demográfico, relacionando sistemáticamente la demanda específica de energía para producir los bienes y servicios identificados en el modelo, con los correspondientes factores sociales, económicos y tecnológicos que afectan dicha demanda. La demanda de energía es desagregada en un gran número de categorías de uso final, donde cada una de las cuales corresponde a un servicio dado o a la producción de un determinado bien.

La naturaleza y el nivel de la demanda de bienes y servicios están determinados por múltiples factores, entre los que se encuentran el crecimiento de la población, el número de habitantes por vivienda, el número de artefactos eléctricos usados por los hogares, la movilidad de las personas y las preferencias por determinados modos de transporte, las prioridades nacionales en el desarrollo de ciertas industrias y sectores de la economía, la evolución de la eficiencia de ciertos tipos de equipos, la penetración en el mercado de nuevas tecnologías o formas de energía, etc.

La tendencia futura esperada de dichos factores determinantes, constituye los denominados “escenarios”, los cuales son exógenamente introducidos en el modelo.

Se puede esquematizar de manera sencilla el MAED de la siguiente forma.

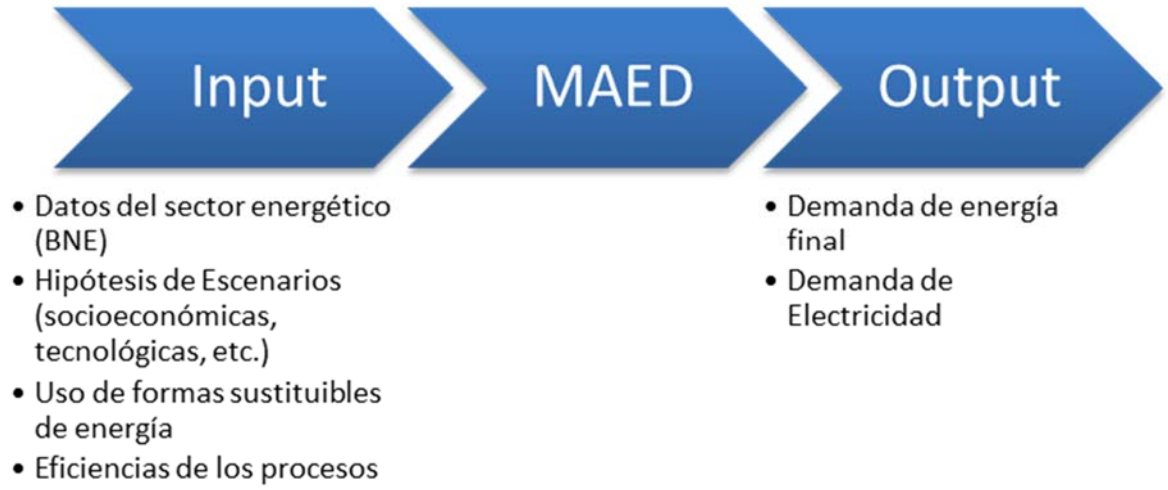



**Figura 71: Organización general MAED. Fuente: Elaboración propia.**

## 5.1 Características del modelo MAED

b) Módulos del modelo MAED

El programa MAED posee dos módulos: MAED_D y MAED_EL. El archivo MAED_D representa los diferentes sectores, subsectores y actividades de uso final incluidas en el modelo. En el Módulo MAED_D se procesa la información que describe el escenario de desarrollo económico, tecnológico y social y calcula la demanda de energía total para los años deseados. El módulo MAED_EL (Demanda horaria de potencia eléctrica) describe la demanda anual de electricidad en términos semanales y horarios. Este Módulo usa la demanda total anual de electricidad de cada sector (calculada en el Modulo de demanda) para determinar la demanda total de electricidad para cada hora del año.

c) Sectores y subsectores económicos considerados en el MAED_D

En el MAED se consideran seis sectores económicos: Agricultura, Construcción, Minería, Manufactura, Servicios (incluyendo transporte) y Energía. Dichos sectores pueden ser

desagregados, a su vez, en diez subsectores[13]. El sector Energía es usado únicamente para describir la formación del PIB. Estos inputs de energía, empleados para conversiones en otras formas de energía final, no son tomados en cuenta por el modelo MAED, el cual únicamente incluye la demanda de energía útil y final en sus proyecciones.

El MAED permite al usuario emplear y expandir una estructura pre-definida de demanda de energía, de acuerdo a sus necesidades y/o a su disponibilidad de datos. Para ello, el modelo presenta un marco para desagregar la demanda de energía en seis sectores económicos. En el modelo, los usuarios pueden:

- Definir hasta 10 subsectores en cada uno de los seis sectores de la economía
- Definir hasta 15 modos de transporte para cada una de las modalidades de transporte predefinidas (urbana, interurbana y transporte de carga).
- Especificar hasta 8 tipos de combustible y asignarlos a cada modo de transporte.
- Definir hasta 10 tipos de vivienda en cada uno de los grupos de hogares (urbanos y rurales).

d) Requisitos y consideraciones del modelo MAED

Para emplear el modelo MAED, el punto de partida consiste en la construcción del patrón de consumo energético del año base, lo cual requiere la compilación y conciliación de información proveniente de diversas fuentes, con el fin de establecer un balance de energía para el año base. Esto ayuda a calibrar el modelo para la situación específica del país. En este proyecto, buen parte de la información proviene de los antecedentes generados en el estudio que alimentan el modelo actual de prospectiva energética presentado en las secciones anteriores.

El modelo se enfoca exclusivamente en la demanda de energía. Cuando varias formas de energía (electricidad, combustibles fósiles, etc.) compiten por la demanda de energía de uso final de una categoría determinada, dicha demanda es calculada primero en términos de la energía útil, y luego es convertida en términos de la energía final, tomando en cuenta tanto la penetración del mercado como la eficiencia de cada una de las fuentes alternativas de energía (ambos factores especificados como parámetros de escenario). La demanda de energéticos no sustituibles, tales como combustible para vehículos, electricidad para usos específicos (iluminación, aire acondicionado) etc., es calculada directamente en términos de la energía final.

[13] Corresponden a subsectores productivos de la Industria o la Minería, como los del Balance Nacional de Energía.

Por lo tanto, la demanda de combustibles fósiles no se descompone en términos de carbón, gas o petróleo, ya que la mezcla de energéticos en la oferta depende en forma importante de las posibilidades tecnológicas de la oferta y de los precios relativos de dichos combustibles, aspectos que se encuentran fuera del alcance del MAED. Sin embargo, la sustitución de combustibles fósiles por formas alternativas de energía no convencionales (solar, geotérmica, etc.) sí es estimada, debido a la magnitud de los cambios estructurales que dichas formas de energía pueden introducir en la demanda de energía en el futuro. Dado que dichas sustituciones son esencialmente determinadas por decisiones políticas, estas deben ser tomadas en cuenta en la etapa de formulación de los escenarios de desarrollo.

## 5.2 Estimación y carga de variables relevantes

En esta sección se presentan las variables clave que el MAED requiere como entrada para realizar la estimación de consumo, las fuentes de información existentes y supuestos realizados. En particular, se presentan las variables macroeconómicas y demográficas generales al modelo y algunas de las variables específicas a cada sector, ya que gran parte de ellas han sido estimadas en las secciones anteriores del estudio.

### 5.2.1 Variables macroeconómicas

Uno de los factores con mayor incidencia en el crecimiento de la demanda energética es el crecimiento económico. Por esto motivo, resulta clave asumir una trayectoria del producto adecuada. En el caso del MAED, dado que no hay consideración alguna de precios, lo correcto es tomar crecimiento del PIB real (a precios constantes).

Para proyectar la tasa de crecimiento del producto entre los años 2017 y 2050, se utilizan los datos disponibles del Banco Central de PIB real hasta el año 2018, las estimaciones de tasas de crecimiento hasta el año 2021 definidas por el mismo Banco Central y la tendencia de crecimiento al año 2050 provista por el Ministerio de Hacienda. En el cuadro siguiente se presentan dichos valores.

**Tabla 38 PIB volumen a precios del año anterior encadenado y tasa de crecimiento**

| Año | Refer. 2013 (10^9 CLP) | Banda inferior | Base | Banda Superior | Año | Banda inferior | Base | Banda Superior |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2017** | 147.530 | | | | **2034** | 2,1% | 2,6% | 3,0% |
| **2018** | 153.431 | 4,0% | 4,0% | 4,0% | **2035** | 2,1% | 2,5% | 2,9% |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2019** | | 2,3% | 2,5% | 2,8% | **2036** | 2,1% | 2,5% | 2,9% |
| **2020** | | 2,9% | 3,3% | 3,5% | **2037** | 2,0% | 2,5% | 2,9% |
| **2021** | | 2,9% | 3,5% | 3,4% | **2038** | 2,0% | 2,4% | 2,8% |
| **2022** | | 2,8% | 3,1% | 3,4% | **2039** | 1,9% | 2,4% | 2,8% |
| **2023** | | 2,7% | 3,1% | 3,4% | **2040** | 1,9% | 2,4% | 2,8% |
| **2024** | | 2,7% | 3,0% | 3,3% | **2041** | 1,8% | 2,3% | 2,8% |
| **2025** | | 2,6% | 3,0% | 3,3% | **2042** | 1,8% | 2,3% | 2,7% |
| **2026** | | 2,6% | 2,9% | 3,2% | **2043** | 1,8% | 2,2% | 2,7% |
| **2027** | | 2,5% | 2,9% | 3,2% | **2044** | 1,7% | 2,2% | 2,7% |
| **2028** | | 2,5% | 2,9% | 3,2% | **2045** | 1,7% | 2,2% | 2,6% |
| **2029** | | 2,4% | 2,8% | 3,1% | **2046** | 1,6% | 2,1% | 2,6% |
| **2030** | | 2,3% | 2,8% | 3,1% | **2047** | 1,6% | 2,1% | 2,6% |
| **2031** | | 2,3% | 2,7% | 3,1% | **2048** | 1,6% | 2,1% | 2,6% |
| **2032** | | 2,2% | 2,7% | 3,0% | **2049** | 1,5% | 2,0% | 2,5% |
| **2033** | | 2,2% | 2,6% | 3,0% | **2050** | 1,5% | 2,0% | 2,5% |

Fuente: Banco Central y Ministerio de Hacienda (2019)

En cuanto a la contribución en el producto de los distintos sectores, para el año base se utilizan los datos disponibles en el PIB sectorial (2018) y la matriz de insumo producto realizada por el Banco Central para el año 2016. Se asume que la proyección al año 2050 de esta estructura permanece constante dado que no se cuenta con mayores antecedentes[14].

El cuadro siguiente del MAED resume las tasas de crecimiento del producto, los niveles de producto real, la estructura sectorial de éste y el PIB per cápita.

[14] Como se ha visto en estudios en los que se corrió un modelo de equilibrio general computable (ECOGEM) hasta el 2050 (Minenergía, 2019 y O`Ryan y Ulloa, 2019) la participación de los sectores se mantiene prácticamente constante en el horizonte.

**Tabla 39 Descomposición Sectorial del Producto Interno Bruto (Total GDP and GDP structure by main economic sectors)**

| Ítem | Unidad | 2017 |
|---|---|---|
| **PIB** | **[mil millones $ del 2013]** | **147.530** |
| **PIB/cap** | **($)** | **8.009.558** |
| **Agricultura** | **[%]** | **0** |
| **Construcción** | **[%]** | **0** |
| **Minería** | **[%]** | **10,58%** |
| **Manufactura** | **[%]** | **22,81%** |
| **Servicios** | **[%]** | **63,36%** |
| **Energía** | **[%]** | **3,25%** |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo convenido con la contraparte técnica del estudio, los sectores Agricultura y Construcción se mantienen con una participación nula en la estructura del modelo, ya que ellos están incluidos en el sector Industrias varias. Ello permitirá hacer comparables ambos ejercicios prospectivos.

### 5.2.2 Variables demográficas

En esta sección se describen las principales variables demográficas. Dentro de estas variables destaca la construcción y proyección de variables como la población total, población y viviendas rurales y urbanas, fuerza laboral tanto potencial como trabajando, entre otras.

**Población Total [millones de habitantes]:** Para su construcción y proyección se ha tomado como referencia el documento "Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 total país" desarrollado por INE.

**Población Urbana y Rural [porcentaje de la población total]:** Para su construcción y proyección se ha tomado como referencia el documento "Estimaciones y proyecciones de la población de chile 2002-2035 totales regionales, población urbana y rural. Síntesis de resultados", desarrollado por el INE.

**Habitantes por casa (urbano y rural) [número de habitantes]**: para su construcción y proyección se ha tomado como referencia la metodología desarrollada en el sector residencial del modelo LEAP.

**Fuerza laboral potencial y trabajando [porcentaje de la población total]**: Para obtener este indicador se utilizan los resultados de la Encuesta Nacional de Empleo, INE-Chile, para el año 2017 y el Trimestre Mayo-Julio 2019.

**Porcentaje de la población en grandes ciudades [porcentaje de la población total]:** Para el año 2017 se calculan, en base al CENSO 2017, como grandes ciudades las que presentan población mayor a 100.000 habitantes además se considera toda la Región Metropolitana como gran ciudad. Se asume que el crecimiento de la población en grandes ciudades es igual al crecimiento de la población urbana.

En el siguiente cuadro se aprecia la evolución de las variables demográficas detalladas.

**Tabla 40 Principales variables demográficas**

| | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Población** | [millón] | 18,42 | 19,46 | 20,21 | 20,74 | 21,14 | 21,41 | 21,57 | 21,63 |
| **Tasa de crec. Pob.** | [%p.a.] | | 1,8% | 0,6% | 0,5% | 0,3% | 0,2% | 0,1% | 0,0% |
| **Pob. Urbana** | [%] | 87,80 | 87,80 | 88,20 | 88,80 | 89,50 | 90,30 | 91,10 | 91,80 |
| **habitantes/casa** | [cap] | 2,93 | 2,84 | 2,70 | 2,57 | 2,44 | 2,32 | 2,21 | 2,10 |
| **Viviendas** | [millón] | 5,52 | 6,01 | 6,60 | 7,17 | 7,74 | 8,32 | 8,89 | 9,45 |
| **Pob. Rural** | [%] | 12,20 | 12,20 | 11,80 | 11,20 | 10,50 | 9,70 | 8,90 | 8,20 |
| **habitantes/casa** | [cap] | 2,33 | 2,26 | 2,15 | 2,05 | 1,95 | 1,85 | 1,76 | 1,67 |
| **Viviendas** | [millón] | 0,96 | 1,05 | 1,11 | 1,13 | 1,14 | 1,12 | 1,09 | 1,06 |
| **Fuerza laboral pot.** | [%] | 48,42 | 47,41 | 45,77 | 44,19 | 42,67 | 41,20 | 39,77 | 38,40 |
| **Fuerza laboral trab.** | [%] | 93,49 | 92,65 | 91,27 | 89,91 | 88,57 | 87,25 | 85,95 | 84,67 |
| **Fuerza laboral activa** | [millón] | 8,34 | 8,55 | 8,44 | 8,24 | 7,99 | 7,70 | 7,37 | 7,03 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **%. Pob. en grandes ciudades** | [%] | 67,30 | 67,30 | 67,61 | 68,07 | 68,60 | 69,22 | 69,83 | 70,37 |
| **Pob. en grandes ciudades** | [millón] | 12,40 | 13,10 | 13,66 | 14,11 | 14,50 | 14,82 | 15,06 | 15,22 |

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 Estimación y carga de variables sector industrial

En esta sección, se presentan las fuentes de información y supuestos realizados para llenar las tablas que el modelo MAED toma como entrada y que utiliza para estimar las demandas finales. En general, las principales fuentes de información son las mismas utilizadas para el modelo LEAP revisado en las secciones anteriores.

El MAED define las variables clave de entrada. Estas variables son fundamentales para que el programa puede realizar la estimación de energía final del sector industrial. Dentro de las variables clave se encuentran:

- Intensidades de Energía útil para Usos Térmicos, Eléctricos y Combustible de Motor.
- Penetración de Portadores Energéticos de Energía Térmica útil en Agricultura, Construcción y Minería
- Eficiencia promedio de distintos combustibles en los usos térmicos en la Agricultura, Construcción y Minería
- Estructura de la demanda de energía térmica útil en la Manufactura
- Penetración de los portadores energéticos en la demanda de energía térmica útil en la Manufactura
- Eficiencias, razones en Sector Manufactura

A continuación se presenta cada una de estas categorías con mayor detalle.

#### 5.2.3.1 Intensidades de Energía útil para Usos Térmicos, Eléctricos y Combustible de Motor.

Los primeros cuadros requeridos en el sector industria corresponden a la estimación de intensidades energéticas de energía útil según uso. Para cada sector se distingue entre usos de combustible de motor, intensidades de usos de electricidad y usos térmicos. Estos valores han sido obtenidos en las secciones anteriores para el modelo LEAP.

El MAED requiere que los consumos de energía sean estimados respecto de la electricidad. Esto quiere decir que asume una eficiencia unitaria para este combustible. Luego, es necesario estimar las eficiencias relativas a la electricidad. Este cálculo considera el cociente entre la eficiencia del combustible y la electricidad.

La intensidad energética se estima a partir de estos consumos y de la participación en el PIB de los distintos sectores considerados. El resumen de los valores se presenta en el cuadro siguiente.

**Tabla 41 Intensidades energéticas de Combustibles motor (Energy intensities of Motive Power)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mining** | kcal/CLP | 0,504 | 0,492 | 0,489 | 0,481 | 0,466 | 0,454 | 0,443 | 0,434 |
| **Cobre** | kcal/CLP | 0,339 | 0,339 | 0,339 | 0,339 | 0,339 | 0,339 | 0,339 | 0,339 |
| **Salitre** | kcal/CLP | 0,749 | 0,712 | 0,627 | 0,557 | 0,498 | 0,449 | 0,408 | 0,373 |
| **Hierro** | kcal/CLP | 1,945 | 1,764 | 2,120 | 2,193 | 1,926 | 1,708 | 1,529 | 1,380 |
| **Minas varias** | kcal/CLP | 2,075 | 1,970 | 1,835 | 1,717 | 1,615 | 1,526 | 1,448 | 1,380 |
| **Manufacturing** | kcal/CLP | 0,122 | 0,110 | 0,109 | 0,095 | 0,084 | 0,074 | 0,067 | 0,060 |
| **Papel y Celulosa** | kcal/CLP | 1,915 | 1,730 | 1,835 | 1,595 | 1,400 | 1,242 | 1,112 | 1,004 |
| **Cemento** | kcal/CLP | 1,679 | 1,605 | 1,458 | 1,307 | 1,172 | 1,062 | 0,966 | 0,886 |
| **Siderurgia** | kcal/CLP | 1,214 | 1,095 | 0,940 | 0,817 | 0,717 | 0,636 | 0,569 | 0,514 |
| **Pesca** | kcal/CLP | 0,938 | 0,846 | 0,727 | 0,631 | 0,554 | 0,492 | 0,440 | 0,397 |
| **Petroquímica** | kcal/CLP | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| **Azúcar** | kcal/CLP | 0,157 | 0,145 | 0,129 | 0,116 | 0,106 | 0,098 | 0,091 | 0,085 |
| **Industrias varias** | kcal/CLP | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 42 Intensidades energéticas de Usos específicos de electricidad (Energy intensities of Electricity specific uses)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mining** | | 2,129 | 2,128 | 2,127 | 2,126 | 2,124 | 2,122 | 2,121 | 2,120 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cobre** | kcal/CLP | 2,106 | 2,106 | 2,106 | 2,106 | 2,106 | 2,106 | 2,106 | 2,106 |
| **Salitre** | kcal/CLP | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,004 |
| **Hierro** | kcal/CLP | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| **Minas varias** | kcal/CLP | 0,011 | 0,010 | 0,010 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,007 |
| **Manufacturing** | | 0,206 | 0,187 | 0,175 | 0,153 | 0,135 | 0,120 | 0,108 | 0,098 |
| **Papel y Celulosa** | kcal/CLP | 0,069 | 0,062 | 0,066 | 0,058 | 0,051 | 0,045 | 0,040 | 0,036 |
| **Cemento** | kcal/CLP | 0,021 | 0,020 | 0,018 | 0,016 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,011 |
| **Siderurgia** | kcal/CLP | 0,083 | 0,075 | 0,065 | 0,056 | 0,049 | 0,044 | 0,039 | 0,035 |
| **Pesca** | kcal/CLP | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,004 | 0,004 |
| **Petroquímica** | kcal/CLP | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,004 | 0,004 |
| **Azúcar** | kcal/CLP | 0,014 | 0,013 | 0,011 | 0,010 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,008 |
| **Industrias varias** | kcal/CLP | 1.7E-5 | 1.5E-5 | 1.4E-5 | 1.3E-5 | 1.2E-5 | 1.1E-5 | 1.1E-5 | 1.0E-5 |

Fuente: Elaboración propia.

### Tabla 43 Intensidades energéticas de Usos térmicos (Energy intensities of Thermal uses)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mining** | | 3,627 | 3,463 | 3,493 | 3,411 | 3,187 | 3,001 | 2,845 | 2,713 |
| **Cobre** | kcal/CLP | 1,137 | 1,137 | 1,137 | 1,137 | 1,137 | 1,137 | 1,137 | 1,137 |
| **Salitre** | kcal/CLP | 0,720 | 0,684 | 0,602 | 0,535 | 0,479 | 0,432 | 0,392 | 0,358 |
| **Hierro** | kcal/CLP | 0,913 | 0,828 | 0,996 | 1,030 | 0,904 | 0,802 | 0,718 | 0,648 |
| **Minas varias** | kcal/CLP | 0,857 | 0,814 | 0,758 | 0,709 | 0,667 | 0,630 | 0,598 | 0,570 |
| **Manufacturing** | | 30,256 | 27,708 | 26,205 | 23,011 | 20,390 | 18,249 | 16,475 | 14,998 |
| **Papel y Celulosa** | kcal/CLP | 11,018 | 9,954 | 10,560 | 9,174 | 8,056 | 7,145 | 6,396 | 5,774 |
| **Cemento** | kcal/CLP | 5,910 | 5,649 | 5,135 | 4,602 | 4,128 | 3,737 | 3,403 | 3,119 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Siderurgia** | kcal/CLP | 9,463 | 8,538 | 7,331 | 6,369 | 5,593 | 4,961 | 4,441 | 4,009 |
| **Pesca** | kcal/CLP | 0,071 | 0,064 | 0,055 | 0,047 | 0,042 | 0,037 | 0,033 | 0,030 |
| **Petroquímica** | kcal/CLP | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| **Azúcar** | kcal/CLP | 3,786 | 3,495 | 3,117 | 2,813 | 2,566 | 2,364 | 2,199 | 2,062 |
| **Industrias varias** | kcal/CLP | 0,0007 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0004 | 0,0004 | 0,0004 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.3.2 Penetración de Portadores Energéticos de Energía Térmica útil en Agricultura, Construcción y Minería

Para estimar las penetraciones de los distintos combustibles en usos térmicos, se utilizan los datos disponibles del Balance Nacional de Energía y otras fuentes nacionales desarrolladas en las secciones correspondientes para el modelo LEAP.

Los cuadros siguientes corresponden a las entradas del modelo MAED asociadas a penetración de portadores energéticos en estos sectores.

**Tabla 44 Penetración de portadores energéticos en la energía térmica útil de la Agricultura la Construcción y la Minería (Penetrations of energy forms into useful thermal energy in Agriculture, Construction and Mining)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Agriculture** | | | | | | | | | |
| **Construction** | | | | | | | | | |
| **Mining** | | | | | | | | | |
| **Cobre** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional Fuels** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Solar** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Fossil Fuels** | % | 86,5 | 86,5 | 86,5 | 86,5 | 86,5 | 86,5 | 86,5 | 86,5 |
| **Salitre** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional Fuels** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Solar** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Fossil Fuels** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Hierro** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional Fuels** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Solar** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Fossil Fuels** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Minas varias** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 2,1 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| **Solar** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Fossil Fuels** | % | 97,1 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.3.3 Eficiencia promedio de distintos combustibles en los usos térmicos en la Agricultura, Construcción y Minería

Para usos térmicos se requieren cifras de eficiencia para combustibles tradicionales, biomasas modernas y fósiles. Estas cifras deben reflejar el promedio de los sectores. Para la estimación se utilizan los datos disponibles de distintas fuentes nacionales desarrolladas en las secciones correspondientes para el modelo LEAP.

Los cuadros siguientes corresponden a las tablas de entrada del MAED asociadas a eficiencias promedio de cada combustible en los sectores de Agricultura, Construcción y Minería.

**Tabla 45 Eficiencia y factores en los usos térmicos en la Agricultura, Construcción y Minería (Efficiencies and Factors in Agriculture, Construction and Mining)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Agriculture** | | | | | | | | | |
| **Construction** | | | | | | | | | |
| **Mining** | | | | | | | | | |
| **Cobre** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 |
| **Modern Biomass** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Fossil Fuels** | % | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 |
| **Salitre** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 |
| **Modern Biomass** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Fossil Fuels** | % | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 |
| **Hierro** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Minas varias** | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Traditional Fuels** | % | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 | 89,7 |
| **Modern Biomass** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Fossil Fuels** | % | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 | 86,8 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.3.4 Estructura de la demanda de energía térmica útil en la Manufactura

Otras de las variables del modelo se refieren a la desagregación de usos térmicos en los distintos subsectores que conforman el sector manufactura. En particular, para cada uno de los subsectores (papel y celulosa, siderurgia, petroquímica, pesca, azúcar e industrias varias) interesa conocer la fracción de energía útil para uso térmico que se destina a 1) Temperaturas altas (generación de vapor), 2) Temperaturas medias (Hornos o Calor Directo) y 3) Temperaturas bajas (Calefacción y Calentamiento de Agua).

Los datos existentes a nivel nacional no permiten hacer esta desagregación en los subsectores, por lo que se ha considerado sólo la opción de temperaturas medias como un valor promedio para toda la industria.

#### 5.2.3.5 Penetración de los portadores energéticos en la demanda de energía térmica útil en la Manufactura

Al igual que para los sectores agrícola, construcción y minero, interesa conocer la trayectoria de penetraciones de diversos portadores energéticos pero para el caso de la industria de manufactura. Estos datos se ingresan y deben representar en promedio a los subsectores que componen en este modelo al sector manufacturero.

Para estimar las penetraciones del año base de los distintos portadores en usos térmicos, se utilizan datos del Balance Nacional de Energía y de otras fuentes identificadas en las secciones anteriores.

El cuadro siguiente corresponde a la tabla de entrada del MAED asociada a la penetración de los portadores energéticos en la demanda de energía térmica útil en la Manufactura.

**Tabla 46 Penetración de los portadores energéticos en la demanda de energía térmica útil en la Manufactura (Penetration of Energy Carriers into Useful Thermal Energy Demand in Manufacturing)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Papel y Celulosa** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,5 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 20,5 | 20,5 | 20,5 | 20,5 | 20,5 | 20,5 | 20,5 | 20,5 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Cemento** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Siderurgia** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **District Heating** | % | 0,0 | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Pesca** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 90,4 | 90,4 | 90,4 | 90,4 | 90,4 | 90,4 | 90,4 | 90,4 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Petroquímica** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 53,6 | 53,6 | 53,6 | 53,6 | 53,6 | 53,6 | 53,6 | 53,6 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 46,4 | 46,4 | 46,4 | 46,4 | 46,4 | 46,4 | 46,4 | 46,4 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Azúcar** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 99,3 | 99,3 | 99,3 | 99,3 | 99,3 | 99,3 | 99,3 | 99,3 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |
| **Industrias varias** | | | | | | | | | |
| | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional Fuels** | % | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| **(of which Heat Pumps)** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Solar** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Fossil Fuels** | % | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cogeneration** | % | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.3.6 Eficiencias, razones en Sector Manufactura

El modelo MAED requiere distintas medidas de eficiencias específicas a usos y combustibles desagregados. Para su estimación se utilizan datos de diversas fuentes identificadas en las secciones anteriores.

El cuadro siguiente corresponde a la tabla de entrada del MAED asociada a parámetros de eficiencia de distintos portadores energéticos utilizados en procesos de manufactura.

**Tabla 47 Eficiencias, razones, etc. (Manufacturing: Efficiencies, Ratios etc. and Factors for pig iron Production & Feedstock)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Efficiencies** | | | | | | | | | |
| **Papel y Celulosa** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 74,1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 |
| **Cemento** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 |
| **Siderurgia** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Pesca** | | | | | | | | | |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 |
| **Petroquímica** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 | 76,7 |
| **Azúcar** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Industrias varias** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| **Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Fossil Fuels** | % | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 |
| **Factors and ratios in Manufacturing** | | | | | | | | | |
| **Papel y Celulosa** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cemento** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Siderurgia** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Pesca** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Petroquímica** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Azúcar** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Industrias varias** | | | | | | | | | |
| **COP of Heat Pumps** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Cogeneration - Efficiency** | % | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **Cogeneration - Heat/Electricity ratio** | ratio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **Cogeneration - Biomass Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Factors for Pig Iron Prod & Feedstock** | | | | | | | | | |
| **Steel Production(constant)** | Mt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Steel Production(variable)** | Mt/VA | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 | 9.2E-7 |
| **Steel in non-electric furnance** | % | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **Specific consumption of pig iron** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Coke Usage** | kg/ton | 540 | 540 | 540 | 540 | 540 | 540 | 540 | 540 |
| **Feedstock Production(constant)** | Mt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Feedstock Prodyction(variable)** | Mt/VA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Steel Production** | Mt | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 |
| **Feedstock Production** | Mt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4 Estimación y carga de variables sector transporte

En esta sección se analiza la carga de variables correspondientes al transporte. Ello considera los subsectores transporte de carga, transporte urbano y trasporte interurbano.

En el caso del transporte de carga, los resultados son obtenidos a partir de los antecedentes levantados para implementar el modelo LEAP.

En el caso del transporte urbano e interurbano, existe alguna información que es útil en la estructura de MAED, la que proviene principalmente de las Encuestas Origen Destino en grandes ciudades del país, los estudios de carga y pasajeros para la zona centro norte y centro sur, además de estudios específicos recopilados. Ellos han sido determinados previamente como parámetros del modelo LEAP.

#### 5.2.4.1 Transporte de Carga

La base del análisis del transporte urbano en la estructura MAED corresponde a la generación de la información para completar las siguientes tablas del modelo:

- Generación de la carga-kilómetros
- Estructura por modos del Transporte de la carga
- Intensidades energéticas del Transporte de carga (unidades físicas)

A continuación se describe la carga y el levantamiento de información necesario para cada una de estas tablas.

En el caso de la generación de la carga-kilómetros, en la sección de transporte de carga para alimentar el modelo LEAP se estima la carga-kilómetros (TKM) para el sector, el cual sirve como input para generar la tabla de entrada del modelo MAED. Estos valores se reparten para cada subsector usando la participación en el PIB nacional de cada uno de ellos. Ello se observa en el siguiente cuadro.

**Tabla 48 Transporte de carga: Generación de la carga-kilómetros (Freight Transportation: Generation of freight-kilometers)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Agriculture** | | | | | | | | | |
| **Agriculture** | tkm/CLP | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **Construction** | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Construction** | tkm/CLP | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **Mining** | | | | | | | | | |
| **Cobre** | tkm/CLP | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| **Salitre** | tkm/CLP | 0,206 | 0,218 | 0,224 | 0,232 | 0,241 | 0,251 | 0,262 | 0,273 |
| **Hierro** | tkm/CLP | 0,243 | 0,257 | 0,264 | 0,274 | 0,284 | 0,296 | 0,309 | 0,322 |
| **Minas varias** | tkm/CLP | 0,095 | 0,101 | 0,104 | 0,107 | 0,112 | 0,116 | 0,121 | 0,126 |
| **Manufacturing** | | | | | | | | | |
| **Papel y Celulosa** | tkm/CLP | 0,071 | 0,075 | 0,077 | 0,080 | 0,083 | 0,086 | 0,090 | 0,094 |
| **Cemento** | tkm/CLP | 0,528 | 0,560 | 0,574 | 0,595 | 0,618 | 0,644 | 0,672 | 0,701 |
| **Siderurgia** | tkm/CLP | 0,304 | 0,321 | 0,330 | 0,342 | 0,355 | 0,370 | 0,386 | 0,402 |
| **Pesca** | tkm/CLP | 0,111 | 0,118 | 0,121 | 0,125 | 0,130 | 0,135 | 0,141 | 0,147 |
| **Petroquímica** | tkm/CLP | 0,040 | 0,042 | 0,044 | 0,045 | 0,047 | 0,049 | 0,051 | 0,053 |
| **Azúcar** | tkm/CLP | 0,815 | 0,863 | 0,886 | 0,918 | 0,954 | 0,993 | 1,037 | 1,081 |
| **Industrias varias** | tkm/CLP | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| **Energy** | | | | | | | | | |
| **Energy** | tkm/CLP | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| **Service** | | 0,012 | 0,013 | 0,013 | 0,014 | 0,014 | 0,015 | 0,016 | 0,016 |
| **Comercial** | tkm/CLP | | | | | | | | |
| **Publico** | tkm/CLP | 0,020 | 0,021 | 0,022 | 0,023 | 0,023 | 0,024 | 0,025 | 0,027 |
| **Base value** | 10^9 tkm | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Luego, a partir de la identificación de la carga-kilómetros para cada modo de transporte, se estima la participación de cada uno, lo que se presenta en el siguiente cuadro de entrada del MAED.

**Tabla 49 Participación modal del transporte de carga (Modal split of freight transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Transport** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Carga Terrestre** | % | 81,57 | 82,59 | 84,12 | 85,28 | 86,22 | 87,01 | 87,66 | 88,23 |
| **Carga Ferro** | % | 3,95 | 4,17 | 3,86 | 3,53 | 3,24 | 2,98 | 2,72 | 2,51 |
| **Carga Marítimo** | % | 14,48 | 13,24 | 12,02 | 11,18 | 10,54 | 10,02 | 9,62 | 9,26 |

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se requiere estimar las intensidades energéticas de los diversos modos de transporte, como se indica en el Cuadro siguiente. Ellas son estimadas en la sección de transporte de carga del modelo LEAP.

**Tabla 50 Intensidades energéticas del Transporte de carga (Energy intensities of freight transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Transport** | | | | | | | | | |
| **Carga Terrestre** | kcal/100tkm | 31709 | 31368 | 30594 | 29853 | 29173 | 28543 | 27955 | 27417 |
| **Carga Ferro** | kcal/100tkm | 7838 | 7858 | 7858 | 7858 | 7858 | 7858 | 7858 | 7858 |
| **Carga Maritimo** | kcal/100tkm | 8678 | 8879 | 9513 | 9880 | 10168 | 10412 | 10531 | 10679 |

Fuente: Elaboración propia.

Como es evidente, los consumos energéticos del equipamiento de transporte en todos los modos dependen significativamente de un gran número de factores o condiciones específicas a cada tipo de operación. Estos factores o condiciones están determinados por las condiciones físicas de la operación, por las tecnologías del equipamiento empleado, por el grado de capacitación y destreza de sus operadores, por aspectos topográficos, climáticos y geográficos, etc. Si bien es entendible que para efectos de planeamiento a nivel global se desee emplear

cifras genéricas por modo como las que se muestran en el cuadro anterior, es importante hacer ver las dificultades que existen para derivar indicadores de validez general y plantear las simplificaciones que ello conlleva en la estimación desagregada de modos y energéticos.

#### 5.2.4.2 Transporte Interurbano

La base del análisis del transporte interurbano en la estructura MAED corresponde a la generación de la información para completar las siguientes tablas del modelo:

- Distancia recorrida y Factores de carga
- Estructura por tipos de autos del transporte de pasajeros entre las ciudades
- Estructura del transporte público de pasajeros entre las ciudades por modos de transporte
- Intensidades energéticas del transporte de pasajeros entre las ciudades (unidades físicas)
- Consumo de energía en el Transporte internacional

A continuación se describe la carga y el levantamiento de información necesario para cada una de estas tablas.

Respecto a los factores para el transporte de pasajeros entre ciudades, como se ve en la sección de transporte urbano e interurbano del modelo LEAP, la tenencia de autos se estima a partir del parque de vehículos particulares existentes y la población total del país (ambos a partir de las estadísticas del INE).

Para estimar los valores de Factores de carga del modelo, se utilizan los estudios de carga y pasajeros de las macrozonas norte y sur del país (SECTRA) usados para definir las variables en el modelo LEAP.

**Tabla 51 Factores de carga (Load factors - person per mode type)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Factor for cars intercity transportation** | | | | | | | | | |
| **Distance travelled** | km/cap/yr | 367 | 423 | 492 | 577 | 675 | 789 | 924 | 1058 |
| **Car Ownership** | person/car | 4,07 | 3,62 | 2,98 | 2,47 | 2,06 | 1,74 | 1,46 | 1,24 |
| **Distance travelled by car** | km/car/yr | 11660 | 11783 | 11864 | 11941 | 12023 | 12104 | 12173 | 12243 |
| **Load factors (person per mode type)** | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Buses** | cap | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 |
| **Trenes** | cap | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 |
| **Aviones** | %occupied | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| **Cars** | cap | 1,69 | 1,65 | 1,57 | 1,5 | 1,43 | 1,36 | 1,3 | 1,24 |

Fuente. Elaboración propia.

De la misma forma, para estimar la participación modal del transporte interurbano se consideran los valores usados para definir las variables en el modelo LEAP.

**Tabla 52 Participación modal del transporte interurbano (Modal split of cars intercity transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modal split of cars intercity transportation** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Autos gasolina** | % | 78,66 | 78,77 | 78,93 | 79,05 | 79,12 | 79,11 | 78,97 | 78,6 |
| **Autos diésel** | % | 21,33 | 21,19 | 20,98 | 20,8 | 20,64 | 20,49 | 20,36 | 20,24 |
| **Autos eléctricos** | % | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,15 | 0,24 | 0,4 | 0,67 | 1,16 |
| **Autos GLP** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modal split of public intercity transportation** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Buses** | % | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 65,52 |
| **Trenes** | % | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 |
| **Aviones** | % | 33,96 | 33,96 | 33,96 | 33,96 | 33,96 | 33,96 | 33,96 | 33,96 |

Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 53 Intensidades energéticas del transporte interurbano (Energy intensities of intercity transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Transport** | | | | | | | | | |
| **Buses** | kcal/100km | 603709 | 590245 | 576606 | 563722 | 550482 | 537204 | 523239 | 510493 |
| **Trenes** | kcal/100km | 1637189 | 1467680 | 1189923 | 963095 | 1044544 | 1126925 | 1201651 | 1280489 |
| **Aviones** | kcal/1000seatkm | 322714 | 318932 | 318932 | 318932 | 318932 | 318932 | 318932 | 318932 |
| **Autos gasolina** | kcal/100km | 115198 | 112848 | 107480 | 102988 | 99349 | 96238 | 93575 | 91351 |
| **Autos diésel** | kcal/100km | 106686 | 104231 | 99181 | 95056 | 91442 | 88283 | 85369 | 82688 |
| **Autos eléctricos** | kcal/100km | 45983 | 89781 | 106837 | 162286 | 117213 | 88495 | 68064 | 53943 |
| **Autos GLP** | kcal/100km | 90683 | 88596 | 84303 | 80798 | 77726 | 75041 | 72563 | 70285 |

Fuente. Elaboración propia.

#### 5.2.4.3 Transporte Urbano

La base del análisis del transporte urbano en la estructura MAED corresponde a la generación de la información para completar las siguientes tablas del modelo:

- Distancia recorrida y factores de carga
- Estructura por modos del transporte de pasajeros dentro de la ciudad
- Intensidades energéticas de la Transporte de pasajeros dentro de la ciudad (unidades físicas)

A continuación se describe la carga y el levantamiento de información necesario para cada una de estas tablas.

En el caso de la Distancia recorrida, el valor que se requiere para ser incorporado en esta sección del modelo es la distancia promedio que recorren los pasajeros del transporte público y privado en las zonas urbanas del país. Este valor se obtiene a partir de los datos de las Encuestas Origen Destino de las principales ciudades del país (a partir de los datos de SECTRA) estimados para el modelo LEAP.

Respecto a los factores de carga, ello corresponde a la tasa de ocupación de los vehículos en los distintos modos de transporte usados en las grandes zonas urbanas del país. Para obtener estos datos se utilizan las tasas de ocupación medidas por SECTRA en sus estudios de Diagnóstico del Sistema Urbano para grandes ciudades del país, los que fueron estimados para el modelo LEAP.

De esta forma, la tabla requerida por el modelo se completa de la siguiente forma.

**Tabla 54 Factores de carga (Load factors - person per mode type)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Distance travelled** | km/cap/day | 8,08 | 8,88 | 10,54 | 12,54 | 14,88 | 17,55 | 20,83 | 24,44 |
| **Transport** | | | | | | | | | |
| **Buses** | cap | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 |
| **Metro** | cap | 134,89 | 134,89 | 134,89 | 134,89 | 134,89 | 134,89 | 134,89 | 134,89 |
| **Autos gasolina** | cap | 1,69 | 1,65 | 1,57 | 1,5 | 1,43 | 1,36 | 1,3 | 1,24 |
| **Autos diésel** | cap | 1,69 | 1,65 | 1,57 | 1,5 | 1,43 | 1,36 | 1,3 | 1,24 |
| **Autos eléctricos** | cap | 1,69 | 1,65 | 1,57 | 1,5 | 1,43 | 1,36 | 1,3 | 1,24 |
| **Autos GLP** | cap | 1,69 | 1,65 | 1,57 | 1,5 | 1,43 | 1,36 | 1,3 | 1,24 |
| **Buses eléctricos** | cap | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 | 18,82 |

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la estructura por modos del transporte de pasajeros, para obtener estos datos se utilizan las particiones modales de las EODs desarrolladas por SECTRA en sus estudios de Diagnóstico del Sistema Urbano para distintas grandes ciudades del país. Los resultados del estudio para el modelo LEAP se presentan en el siguiente cuadro.

**Tabla 55 Participación modal de transporte de pasajeros urbano (Modal split of intracity passenger transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Transport** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Buses** | % | 36,9 | 35,4 | 31,7 | 28,7 | 26,8 | 25,4 | 24,3 | 23,5 |
| **Metro** | % | 5,9 | 6,0 | 6,1 | 6,8 | 5,9 | 5,2 | 4,6 | 4,1 |
| **Autos gasolina** | % | 44,3 | 45,0 | 47,2 | 47,8 | 48,6 | 49,2 | 49,6 | 49,4 |
| **Autos diésel** | % | 12,8 | 12,8 | 13,4 | 13,5 | 13,7 | 13,9 | 14,1 | 14,3 |
| **Autos eléctricos** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,7 |
| **Autos GLP** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Buses eléctricos** | % | 0,1 | 0,8 | 1,7 | 3,1 | 4,9 | 6,0 | 7,0 | 8,0 |

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener el resultado de intensidades energéticas, tanto en vehículos livianos, como comerciales y buses, se han considerado subcategorías, de acuerdo a la tecnología de los vehículos, a las que se han asociado factores de consumo de combustible de fuentes móviles en ruta proporcionadas por fuentes oficiales. Estos valores han sido estimados previamente para el modelo LEAP.

En el cuadro siguiente se presenta el resumen de las categorías consideradas y los factores de consumo correspondientes para cada una de ellas.

**Tabla 56 Intensidades energéticas del transporte urbano (Energy intensities of urban transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Transport** | | | | | | | | | |
| **Buses** | kcal/100km | 607291 | 592433 | 578606 | 565597 | 552246 | 538855 | 524828 | 512005 |
| **Metro** | kcal/100km | 232546 | 232546 | 232546 | 232546 | 232546 | 232546 | 232546 | 232546 |
| **Autos gasolina** | kcal/100km | 115105 | 112739 | 107366 | 102864 | 99209 | 96068 | 93351 | 91027 |
| **Autos diésel** | kcal/100km | 106686 | 104231 | 99181 | 95056 | 91442 | 88283 | 85369 | 82688 |
| **Autos eléctricos** | kcal/100km | 45983 | 89781 | 106837 | 162286 | 117213 | 88495 | 68064 | 53943 |
| **Autos GLP** | kcal/100km | 97840 | 95828 | 91261 | 87435 | 84327 | 81658 | 79349 | 77373 |
| **Buses eléctricos** | kcal/100km | 242916 | 236973 | 231442 | 226239 | 220899 | 215542 | 209931 | 204802 |

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del Consumo de energía en el transporte internacional, se utilizan los valores estimados en el modelo LEAP obtenidos de acuerdo a los datos del inventario de Emisiones de GEI y datos del Balance Nacional de Energía para el consumo del transporte aéreo y transporte marítimo. Ello se resume en la siguiente tabla.

**Tabla 57 Consumo de energía en el Transporte internacional (Energy consumption of international transportation)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Constant** | Tcal | 2163 | 2481 | 3965 | 4602 | 5607 | 5228 | 5906 | 6614 |
| **Variable** | kcal/CLP | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

### 5.2.5 Estimación y carga de variables sector residencial

En esta sección se describe el cálculo de las principales variables asociadas al sector residencial. Las principales variables asociadas a este sector se relacionan con la determinación de intensidades, factores de penetración de energéticos y eficiencias. Las que se relacionan con los usos de calefacción y aire acondicionado, cocción y calentamiento de agua, para los sectores urbano y rural.

#### 5.2.5.1 Demanda de energía útil en el sector Residencial Urbano

A continuación se presentan los cuadros de entrada necesarios del sector residencial urbano. En este caso, los tipos de vivienda se han dividido en casas y departamentos.

En la mayoría de los casos la información y los datos han sido recopilados previamente en el modelo LEAP. En aquellas variables que no sea el caso se indicará como se obtuvo la información.

**Tabla 58 Información sector residencial urbano**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| **Shares by dwelling type** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Urban_house** | % | 87,5 | 85,6 | 83,3 | 81,6 | 79,8 | 77,7 | 75,6 | 73,5 |
| **Urban-dept** | % | 12,5 | 14,4 | 16,7 | 18,4 | 20,2 | 22,3 | 24,4 | 26,5 |
| **Dwelling sizes by dwelling type** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | m2 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,2 | 58,2 | 58,2 |
| **Urban-dept** | m2 | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 |

Fuente. Elaboración propia.

### Tabla 59 Factores de la vivienda para la calefacción (Dwelling Factors for Space Heating)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Share of dwelling requiring SH** | % | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| **Degree-days** | Days°C | 1226 | 1226 | 1226 | 1226 | 1226 | 1226 | 1226 | 1226 |
| **Area heated** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Urban-dept** | % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Heat losses rate** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | cal/m2/C/h | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |
| **Urban-dept** | cal/m2/C/h | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100,01 |
| **Traditional fuels** | % | 43,87 | 41,6 | 38,86 | 36,27 | 33,72 | 31,47 | 31,47 | 31,47 |
| **Modern Biomass** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 4,35 | 5,62 | 7,65 | 9,66 | 11,66 | 13,7 | 13,77 | 13,88 |
| **-- thereof: heat pump** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **District heating** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 51,78 | 52,78 | 53,49 | 54,07 | 54,62 | 54,83 | 54,76 | 54,66 |
| **Soft Solar Systems** | % | | | | | | | | |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

En el caso de las eficiencias de las biomasas modernas, este valor corresponde a 90% (según antecedentes del MMA) y en el caso del COP de las bombas de calor, este se establece en 3, de acuerdo a diversas fuentes de proveedores de estos equipos (SODIMAC, Enel, entre otros).

**Tabla 60 Factores de la vivienda para el calentamiento de agua (Dwelling Factors for Water Heating)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific requirement of hot water per capita** | kcal/cap/y | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 |
| **Dwelling with hot water** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | % | 91,8 | 93,2 | 95,4 | 97,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Urban-dept** | % | 91,8 | 93,2 | 95,4 | 97,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Penetration of energy forms** | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional fuels** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | | 2,6 | 7,0 | 11,3 | 15,7 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| **-- thereof: heat pump** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **District heating** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 100,0 | 97,4 | 93,0 | 88,7 | 84,3 | 80,0 | 80,0 | 80,0 |
| **Soft Solar Systems** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### Tabla 61 Factores de la vivienda para cocción (Dwelling Factors for Cooking)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific energy requirements** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 |
| **Penetration of energy forms** | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Traditional fuels** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 1,3 | 3,7 | 7,8 | 11,9 | 15,9 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 98,7 | 96,3 | 92,2 | 88,1 | 84,1 | 80,0 | 80,0 | 80,0 |
| **Soft Solar Systems** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 64 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 88 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### Tabla 62 Factores de la vivienda para Aire Acondicionado (Dwelling Factors for Air Conditioning)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dwelling with air conditioning** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | % | 0,01 | 0,06 | 0,14 | 0,22 | 0,3 | 0,39 | 0,47 | 0,55 |
| **Urban-dept** | % | 0,01 | 0,06 | 0,14 | 0,22 | 0,3 | 0,39 | 0,47 | 0,55 |
| **Specific cooling requirements** | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 | 392108,4 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Electricity** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Substitutable Fossils** | % | | | | | | | | |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **COP electric AC** | ratio | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| **COP non-electric AC** | ratio | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |

En el caso del COP de los aires acondicionados, este se establece en 3, de acuerdo a diversas fuentes de proveedores de estos equipos (SODIMAC, Enel, entre otros).

**Tabla 63 Factores de la vivienda para Equipos (Dwelling Factors for Appliances)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Electricity Penetration** | % | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| **Specific electricity requirements** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 1064190 | 1088369 | 1124818 | 1156456 | 1191310 | 1236761 | 1282212 | 1327663 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 4118668 | 3745379 | 3364781 | 3057689 | 2831054 | 2699416 | 2594507 | 2509535 |
| **Substitutable Fuels** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Tabla 64 Factores de la vivienda para Iluminación (Dwelling Factors for Lighting)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific electricity requirements** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 255419 | 235305 | 201781 | 168257 | 148143 | 148143 | 148143 | 148143 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 297368 | 273950 | 234920 | 195891 | 172473 | 172473 | 172473 | 172473 |
| **Substitutable Fuels** | | | | | | | | | |
| **Urban_house** | kcal/dw/yr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Urban-dept** | kcal/dw/yr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

#### 5.2.5.2 Demanda de energía útil en el sector Residencial Rural

En esta sección se presenta la información requerida para el sector residencial rural del modelo MAED. A diferencia del sector urbano, en este caso sólo se han considerado viviendas tipo casas y no departamentos.

En general, los datos técnicos corresponden a los mismos del sector residencial urbano y los datos e información específica del sector proviene de los antecedentes para el modelo LEAP.

**Tabla 65 Información sector residencial rural**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Rural** | | | | | | | | | |
| **Shares by dwelling type** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Dwelling sizes by dwelling type** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | m2 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,3 | 58,2 | 58,2 | 58,2 |

**Tabla 66 Factores de la vivienda para la calefacción (Dwelling Factors for Space Heating)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Share of dwelling requiring SH** | % | 86,7 | 87,0 | 87,9 | 88,8 | 89,8 | 90,5 | 270,8 | 90,6 |
| **Degree-days** | Days°C | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.226 |
| **Area heated** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Heat losses rate** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | cal/m2/C/h | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional fuels** | % | 43,9 | 42,4 | 39,4 | 36,8 | 34,2 | 31,9 | 10,5 | 31,5 |
| **Modern Biomass** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Electricity** | % | 4,4 | 5,2 | 7,2 | 9,3 | 11,3 | 13,3 | 4,6 | 13,8 |
| **-- thereof: heat pump** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **District heating** | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 51,8 | 52,4 | 53,4 | 54,0 | 54,5 | 54,8 | 84,9 | 54,7 |
| **Soft Solar Systems** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### Tabla 67 Factores de la vivienda para el calentamiento de agua (Dwelling Factors for Water Heating)

| Item | Unit | **2017** | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** | **2045** | **2050** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific requirement of hot water per capita** | kcal/cap/y | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 | 431895 |
| **Dwelling with hot water** | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Rural house** | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional fuels** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | | 1,7 | 6,1 | 10,4 | 14,8 | 19,1 | 20 | 20 |
| **-- thereof: heat pump** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **District heating** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 100,0 | 98,3 | 93,9 | 89,6 | 85,2 | 80,9 | 80,0 | 80,0 |
| **Soft Solar Systems** | % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### Tabla 68 Factores de la vivienda para cocción (Dwelling Factors for Cooking)

| Item | Unit | **2017** | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** | **2045** | **2050** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific energy requirements** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 | 681120 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional fuels** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Modern Biomass** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Electricity** | % | 1,3 | 2,9 | 7,0 | 11,1 | 15,1 | 19,2 | 20,0 | 20,0 |
| **Substitutable Fossils** | % | 98,7 | 97,1 | 93,0 | 88,9 | 84,9 | 80,8 | 80,0 | 80,0 |
| **Soft Solar Systems** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **Eff. Traditional Fuels** | % | 64 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Eff. Modern Biomass** | % | 86 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Eff. Fossil Fuels** | % | 88 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| **Solar Share** | % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

## Tabla 69 Factores de la vivienda para Aire Acondicionado (Dwelling Factors for Air Conditioning)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dwelling with air conditioning** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | % | 0,009 | 0,042 | 0,124 | 0,206 | 0,288 | 0,370 | 0,452 | 0,534 |
| **Specific cooling requirements** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | 392.108 | 392.108 | 392.108 | 392.108 | 392.108 | 392.108 | 392.108 | 392.108 |
| **Penetration of energy forms** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Electricity** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Substitutable Fossils** | % | | | | | | | | |
| **Efficiencies and other factors** | | | | | | | | | |
| **COP electric AC** | ratio | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| **COP non-electric AC** | ratio | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |

## Tabla 70 Factores de la vivienda para Equipos (Dwelling Factors for Appliances)

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Electricity Penetration** | % | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Specific electricity requirements** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | 1.064.190 | 1.072.442 | 1.110.816 | 1.144.378 | 1.173.129 | 1.218.580 | 1.264.032 | 1.309.483 |
| **Substitutable Fuels** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Item | **Unit** | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| **Dwelling Factors for Lighting** | | | | | | | | | |
| **Specific electricity requirements** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | 255.419 | 248.714 | 215.191 | 181.667 | 148.143 | 148.143 | 148.143 | 148.143 |
| **Substitutable Fuels** | | | | | | | | | |
| **Rural house** | kcal/dw/yr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### 5.2.6 Estimación y carga de variables sector servicios

En este capítulo se describen las principales variables relacionadas con el sector servicios, en particular el consumo energético de servicios se asocia a los sectores público y comercial del balance energético de Chile.

Dentro de la descripción de este sector se definen dos tipos de variables. Primero, aquellas que lo caracterizan, como fuerza laboral y área de piso por empleado. Segundo, aquellas energéticas como intensidades energéticas, penetración de energéticos y eficiencias.

Dentro de los datos básicos que permiten caracterizar este sector se identifican las siguientes variables:

- Fuerza laboral [porcentaje de los trabajadores totales]
- Área de piso por empleado [m2/cap]
- Requerimientos específicos de calefacción y aire acondicionado [kWh/m2/a]

**Tabla 71 Datos básicos para demanda de energía útil en el sector servicios (Basic data for useful energy demand)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Labour force in Service Sector** | % | 51 | 51,9 | 53,4 | 54,9 | 56,4 | 57,9 | 59,4 | 60,9 |
| **Floor area per employee** | m2/cap | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| **Total labour force in Service Sector** | Million | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,4 | 4,3 |
| **Total Floor Area** | Million m2 | 85,0 | 88,6 | 90,1 | 90,4 | 90,0 | 89,0 | 87,5 | 85,5 |

### Tabla 72 Factores para calefacción y aire acondicionado (Factors for Space Heating)

| **Item** | **Unit** | **2017** | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** | **2045** | **2050** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Share of area requiring SH** | % | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| **Area actually heated** | % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| **Specific energy requirements** | kcal/m2/y | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| **Factors for Air conditioning** | | | | | | | | | |
| **Floor area with AC** | % | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| **Specific cooling requirements** | kcal/m2/y | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 |

### Tabla 73 Intensidades energéticas para otros usos finales distintos de calefacción y aire acondicionado (Energy intensities for end-uses other than Space heating and Air conditioning)

| Item | Unit | **2017** | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** | **2045** | **2050** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Motive Power** | | | | | | | | | |
| **Comercial** | kcal/CLP | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| **Publico** | kcal/CLP | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| **Electricity Specific Uses** | | | | | | | | | |
| **Comercial** | kcal/CLP | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 |
| **Publico** | kcal/CLP | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 | 1.7E-5 |
| **Thermal Uses** | | | | | | | | | |
| **Comercial** | kcal/CLP | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Publico** | kcal/CLP | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0007 |

**Tabla 74 Penetraciones de formas energéticas, eficiencias y otros factores en el sector servicios (Service Sector: Penetration of Energy Forms, Efficiencies and other Factors)**

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Factors for Space Heating** | | | | | | | | | |
| **Penetration** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional fuels** | % | | | | | | | | |
| **Modern Biomass** | % | | | | | | | | |
| **Fossil Fuels** | % | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| **Electricity** | % | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 |
| **-- thereof: heat pump** | % | | | | | | | | |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Soft Solar Systems** | % | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **Efficiencies** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| **Modern Biomass** | % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| **Fossil Fuels** | % | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 |
| **Others** | | | | | | | | | |
| **Low Rise Buildings** | % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| **Solar Share** | % | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

| Item | Unit | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Factors for Thermal Uses** | | | | | | | | | |
| **Penetration** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Traditional fuels** | % | | | | | | | | |
| **Modern Biomass** | % | | | | | | | | |
| **Fossil Fuels** | % | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 |
| **Electricity** | % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| **District Heating** | % | | | | | | | | |
| **Soft Solar Systems** | % | | | | | | | | |
| **Efficiencies** | | | | | | | | | |
| **Traditional Fuels** | % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| **Modern Biomass** | % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| **Fossil Fuels** | % | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 |
| **Others** | | | | | | | | | |
| **Low Rise Buildings** | % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| **COP Heat Pumps** | ratio | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| **Solar Share** | % | | | | | | | | |
| **Factors for Air Conditioning** | | | | | | | | | |
| **Penetration** | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Fossil Fuels** | % | | | | | | | | |
| **Electricity** | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Efficiencies** | | | | | | | | | |
| **COP non-electric AC** | ratio | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 |

| Item | Unit | **2017** | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** | **2045** | **2050** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **COP electric AC** | ratio | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 |

## 5.3 Principales resultados modelo MAED

En los cuadros siguientes se observan los principales resultados agregados del modelo por formas energéticas y sectores al año 2050. Como se puede observar, los valores son coherentes con los resultados obtenidos para el modelo LEAP.

**Tabla 75 Demanda de energía final por formas energéticas**

| Ítem | Unidad | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Combustibles tradicionales** | Tcal | 51.772 | 56.086 | 61.095 | 65.540 | 70.649 | 75.279 | 80.514 | 86.478 |
| **Biomasas modernas** | Tcal | | | | | | | | |
| **Electricidad** | Tcal | 65.475 | 82.249 | 103.452 | 125.304 | 151.655 | 176.173 | 204.007 | 236.437 |
| **Calefacción centralizada** | Tcal | | | | | | | | |
| **Solar térmica** | Tcal | 249 | 433 | 812 | 1.328 | 2.598 | 4.516 | 6.722 | 9.597 |
| **Combustibles fósiles** | Tcal | 71.588 | 81.422 | 90.675 | 96.437 | 101.438 | 107.709 | 114.564 | 120.912 |
| **Combustibles motor** | Tcal | 120.231 | 131.259 | 143.120 | 155.338 | 160.612 | 165.589 | 169.927 | 175.004 |
| **Coque y carbón** | Tcal | 4.818 | 6.379 | 8.059 | 9.256 | 10.433 | 12.513 | 14.924 | 17.719 |
| **Materia prima** | Tcal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Total** | Tcal | 314.132 | 357.828 | 407.213 | 453.203 | 497.385 | 541.779 | 590.659 | 646.148 |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 76 Demanda de energía final por sectores**

| Ítem | Unidad | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Industria** | Tcal | 122.757 | 149.698 | 181.634 | 210.131 | 243.836 | 279.193 | 319.774 | 366.294 |
| **Manufactura** | Tcal | 79.097 | 95.423 | 114.186 | 130.262 | 149.334 | 169.928 | 193.359 | 220.021 |
| **ACM** | Tcal | 43.660 | 54.275 | 67.448 | 79.868 | 94.502 | 109.265 | 126.415 | 146.273 |
| **Transporte** | Tcal | 113.965 | 123.415 | 133.391 | 143.803 | 146.809 | 149.492 | 151.164 | 153.153 |
| **Transp. Carga** | Tcal | 28.405 | 33.716 | 39.925 | 46.859 | 49.077 | 52.334 | 55.264 | 58.443 |
| **Transp. Pasajeros** | Tcal | 85.560 | 89.699 | 93.466 | 96.944 | 97.731 | 97.159 | 95.900 | 94.709 |
| **Residencial** | Tcal | 62.672 | 66.639 | 70.034 | 73.315 | 76.493 | 78.725 | 80.675 | 82.356 |

| Ítem | Unidad | 2017 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Servicios** | Tcal | 14.738 | 18.076 | 22.154 | 25.954 | 30.247 | 34.368 | 39.046 | 44.346 |
| **Total** | Tcal | 314.132 | 357.828 | 407.213 | 453.203 | 497.385 | 541.779 | 590.659 | 646.148 |

ACM: Agricultura, construcción y minería

Fuente: Elaboración propia

# 6 Conclusiones y futuros trabajos

Durante el desarrollo de este estudio se logró actualizar y complementar un modelo de proyección de demanda energética del largo plazo desarrollado por el Ministerio de Energía en el año 2015. El modelo permite proyectar la demanda energética a nivel nacional y regional para el horizonte 2017-2050. Se realizaron distintas actualizaciones y correcciones de distinto ámbito: actualización de año base de acuerdo a informaciones estadísticas y estudios más recientes, actualizaciones de modelos econométricos para PKM, TKM y producciones industriales, incorporación de variable precio en algunos sectores, incorporación de nuevos subsectores, entre otras actualizaciones descritas en el informe. Otras actualizaciones incluyen la mejora de los formatos de los modelos implementados en Excel, actualización de rutinas de carga en modelo LEAP, uso de versión más reciente del modelo LEAP e implementación del modelo MAED.

El modelo de proyección de demanda energética de largo plazo que se ha implementado es intensivo en el uso de datos ya que realiza una representación detallada de los distintos subsectores, se realiza una caracterización de usos finales y las proyecciones tienen una desagregación regional. No obstante, se observa que en Chile no existen bases de datos que mantengan en forma permanente en esta información para caracterizar el stock de distintas tecnologías y la caracterización de usos finales. Por tanto, uno de los principales desafíos futuros consiste en mejorar la información disponible para caracterizar los usos finales. A continuación se describen algunas propuestas de mejoras específicas para los distintos sectores.

**Sector transporte**

- El modelo de proyección de demanda considera como principal driver las proyecciones de PKM y TKM. Los datos históricos de PKM y TKM se estiman de manera indirecta a partir de los datos de consumo de gasolina y diésel reportados por la SEC. En Chile no existen estadísticas oficiales de series de PKM y TKM. A nivel internacional se observa que existen estadísticas de series medidas de PKM y TKM, lo cual facilita el desarrollo de modelos de proyección basados en este enfoque.
- Se recomienda en trabajos futuros ahondar en explicar las diferencias entre las estadísticas elaboradas por la SEC (Informe Estadístico) y el Ministerio de Energía (Balance Regional de Energía). Los modelos econométricos fueron estimados a partir de los datos de la SEC debido que son series históricas de varios años.

- Existen pocos datos para caracterizar las particiones modales a nivel regional. Los últimos datos disponibles para algunas regiones son del año 2012 y 2015. Lo anterior dificultad la representación adecuada de la partición modal en transporte privado, público y transporte no motorizado. Por tanto, en estudios futuros se recomienda mejorar la proyección de la partición modal del transporte urbano de pasajeros.
- Desarrollar modelos detallados para los sectores marítimo y aéreo. Modelos que incorporen las tecnologías y capacidades de carga (pasajeros o carga) permitirá la modelación de medidas de eficiencia energética y cambio de combustibles en sectores cuya modelación suele ser simplificada.
- Se requiere un análisis detallado para caracterizar la demanda del sector búnker marítimo. La información disponible no permite desarrollar un modelo de proyección detallado para este sector.
- Se recomienda trabajar en forma conjunta con el Ministerio de Transporte y Ministerio de Obras (MOP) públicas para futuras actualizaciones del sector transporte. A modo de ejemplo, el MOP está trabajando en modelo para proyectar la demanda de infraestructura del sector transporte hacia el 2050.

**Sector industria y minería**

- Las proyecciones de demanda de energía del sector industria y minería dependen principalmente de las proyecciones de producción de cada sector. En este sentido, es importante poder acceder a la mejor información que disponen las empresas o las asociaciones productivas respecto a sus estadísticas productivas o su información prospectiva. En el caso de este estudio se pudo acceder a información que no es pública en los sectores del cobre y el papel y celulosa.
- Una de las variables más importantes en el sector cobre son las leyes de mineral históricas. Si bien se cuenta con información estadística en un periodo bastante largo esta información corresponde sólo a un promedio nacional de la ley de mineral oxidado y sulfurado. Ello complica poder llevar a cabo las estimaciones a nivel regional.
- Como se explica anteriormente, el modelo representa los usos finales de energía (térmico, eléctrico y motriz). Durante el desarrollo del estudio se utilizó la mejor información disponible y opinión experta, no obstante, existe poca información en Chile para una caracterización más detallada, por lo cual se requiere una actualización permanente de este tipo de información. En caso del sector cobre, COCHILCO dispone de la información de encuestas del sector minero (respondida por las propias

empresas) que levanta información muy útil para la caracterización más detallada de los procesos mineros y de las distintas faenas. La información de estas encuestas es reservada pero se podría acceder a ella de manera agregada, procesamiento que COCHILCO no ha podido realizar hasta el momento.

**Sector residencial**

- El modelo de proyección de demanda depende principalmente de la proyección del número de viviendas. El modelo de proyección de vivienda es un modelo simplificado que podría ser mejorado en el futuro. En ese sentido, se recomienda trabajar en forma conjunta con el Ministerio de Vivienda y Urbanismo para futuras actualizaciones del sector transporte.
- Se recomienda realizar actualizaciones permanentes de fuentes de información para caracterizar usos finales de la energía del sector residencial: calefacción, agua caliente sanitaria, cocción y artefactos eléctricos.
- Debido a la falta de series históricas de usos finales, existe incertidumbre sobre las proyecciones del crecimiento del confort térmico y la tenencia de equipos por viviendas. En este sentido, se recomienda realizar sensibilidades con respecto a los principales supuestos utilizados.

**Sector comercial y público**

- Se recomienda realizar actualizaciones permanentes de usos finales de la energía para cada subsector del sector comercial y público. Existe poco información para caracterizar el consumo de energía de malls, supermercados, clínicas, bancos, alumbrado público, edificios públicos, etc. Si bien se realizan proyecciones para algunos subsectores, la demanda total está determinada por un modelo top-down.

# 7 Bibliografía

Arndt, C., Davies, R., Gabriel, S., Makrelov, K., Merven, B., Hartley, F., & Thurlow, J. (2016). A sequential approach to integrated energy modeling in South Africa. *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.053

Benavides, C., & Diaz, M. (2014). *Selection of Long-Range Energy Systems Modelling Platforms: MAPS Chile experience*. Retrieved from https://mapsprogramme.org/wp-content/uploads/Paper_Selection-of-energy-modelling-platforms-the-MAPS-Chile-experience.pdf

Biere, D., Fleiter, T., Hirzel, S., & Sontag, B. (2014). Industry – More than just processes: A combined stock-model approach to quantify the energy saving potential for space heating in European industry. In *Eceee Industrial Summer Study Proceedings*.

CDT. (2011). Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservacion de la energia en el sector residencial.

CDT. (2015). Medicion del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera.

Central Statistics Office. (2019). Road Freight Transport Survey. Retrieved from https://www.cso.ie/en/statistics/transport/roadfreighttransportsurvey/

Centro de Energía - Universidad de Chile. (2019). *Desarrollo de una herramienta de modelamiento y simulación de políticas climáticas*.

COCHILCO. (2017). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2017-2028.

COCHILCO. (2018a). *ANUARIO DE ESTADÍSTICAS DEL COBRE Y OTROS MINERALES*.

COCHILCO. (2018b). *Inversión en la minería chilena-Cartera de proyectos 2018 -2027*.

Coordinador Eléctrico Nacional. (2018). *Estudio de Proyección de Demanda Eléctrica 2019-2039*.

CORFO. (2018). Oportunidades para el desarrollo de una industria de hidrógeno solar en las regiones de Antofagasta y Atacama : Innovación para un sistema energético 100 %.

de Jong, G., Schroten, A., Essen, H. Van, Otten, M., & Bucci, P. (2010). Price sensitivity of European road freight transport–towards a better understanding of existing results. *A Report for Transport & …*.

Debnath, K. B., & Mourshed, M. (2018). Forecasting methods in energy planning models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *88*, 297–325. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.02.002

Department for Business Energy & Industry Strategy. (2019). *ENERGY AND EMISSIONS PROJECTIONS Methodology overview*.

Department for Transport UK. (2018). *Transport Statistics Great Britain: 2018 report summary*.

Department of Transport UK. (2018). *Road Traffic Forecasts*.

DIRECON. (2018). *ANUARIO DE LAS EXPORTACIONES CHILENAS 2018*.

Elsland, R., Bradke, H., & Wietschel, M. (2014). A European impact assessment of the Eco-Design requirements for heating systems - What kind of savings can we expect? In *Energy Procedia*. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.385

Energy Research Centre. (2018). *Assumptions and Methodologies in the South African TIMES (SATIM) Energy Model*.

Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elsland, R., Klingler, A. L., Manz, P., & Eidelloth, S. (2018). A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.09.005

Gobierno de Alemania. (2019). *Informe de proyección 2019 para Alemania, en conformidad con el Reglamento UE 525/2013*.

Gobierno de Australia. (2017). *Séptima Comunicación Nacional*.

Gobierno de Canadá. (2017). *Reporte Bienal*.

Gobierno de Japón. (2017). *Tercer reporte bienal*.

Gobierno de Reino Unido. (2017). *Séptima Comunicación Nacional*.

Gobierno de Sudáfrica. (2018). *Tercer reporte Bienal de Sudáfrica*.

IEA-ETSAP. (n.d.). TIMES model. Retrieved from https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times

Kuster, C., Rezgui, Y., & Mourshed, M. (2017). Electrical load forecasting models: A critical

systematic review. *Sustainable Cities and Society*, *35*, 257–270. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.08.009

Lausanne École polytechnique fédérale de. (2019). GEMINI-E3.

Lim, K. M., Kim, M., Kim, C. S., & Yoo, S. H. (2012). Short-run and long-run elasticities of diesel demand in Korea. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en5125055

Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtila, A., & Goldstein, G. (2005). Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). *IEA Energy Technology Systems Analysis Programme*.

MAPS-Chile. (2014). *Resultados Fase 2*. Retrieved from https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/ResultadosdeFase2_MAPSChile.pdf

MAPS-Programme. (2015). MAPS-Programme. Retrieved from http://www.mapsprogramme.org/

Ministry of Housing Communities & Local Government. (2016). *2014-based Household Projections: England, 2014-2039*. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/536702/Household_Projections_-_2014_-_2039.pdf

Moreno Leiva, S. A. (2016). Evaluation of the Integration of Solar and Mining Industries Through a Life Cycle Assessment.

River Consultores. (2014). INFORME FINAL RIVER CONSULTORES DESARROLLADO PARA MINISTERIO DE ENERGÍA, 1–79.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). *Anuario de la Minería de Chile 2018*. Santiago, Chile.

Shi, J., Chen, W., & Yin, X. (2016). Modelling building's decarbonization with application of China TIMES model. *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.056

Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.014

Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Endo, S., Fujii, Y., Komiyama, R., … Shiraki, H. (2019). Japan's long-term climate mitigation policy: Multi-model assessment and sectoral challenges. *Energy*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.091

Systematic Solutions. (2017). *ENERGY 2020. Documentation. Volumen 1*.

Tattini, J., Gargiulo, M., & Karlsson, K. (2018). Reaching carbon neutral transport sector in Denmark – Evidence from the incorporation of modal shift into the TIMES energy system modeling framework. *Energy Policy*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.013

UK Department of Energy and Climate Change. (2015). 2050 UK Calculator. Retrieved October 14, 2015, from http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/#/calculator

# 8 Glosario

**Tabla 77: Glosario de siglas**

| Término | Descripción | Descripción |
|---|---|---|
| LEAP | Long-range Energy Alternatives Planning | Software para proyectar demanda y oferta de energía |
| MAED | Model for Analysis of Energy Demand | Software para proyectar demanda y oferta de energía |
| TIMES | The Integrated MARKAL-EFOM System | Software para proyectar demanda y oferta de energía |
| PKM | Pasajero kilómetro | Representa la cantidad de kilómetros anuales recorridos por las personas |
| TKM | Tonelada kilómetro | Representa la cantidad de toneladas de carga multiplicada por las distintas recorrida que ha sido transportada. |
| EDO | Encuesta Origen Destino | Encuesta realizada por el Ministerio de Transporte para analizar los modos de transporte utilizados por las personas |
| CPR | Comercial, público y residencial | Acrónico para representar estos sectores |
| ACS | Agua caliente sanitaria | Uso final de la energía en el sector residencial. Representa el uso de agua caliente para ducha, lavado de ropa, lavado de loza, etc. |
| PMR | Partnership for Market Readiness | Programa internacional cuyo objetivo es analizar el impacto de la aplicación de instrumentos de precio al carbono[15]. |
| MAPS-Chile | Mitigation Action Plans and Scenarios | Proyecto (no vigente) en el cual se analizaron distintas medidas de mitigación que se podrían aplicada en Chile[16]. |

[15] http://www.precioalcarbonochile.cl/
[16] https://mapschile.mma.gob.cl/

| | | |
|---|---|---|
| COCHILCO | Corporación Chilena del Cobre | Institución pública chilena relacionada con temas de minería |
| INE | Instituto Nacional de Estadísticas | Institución pública chilena relacionada con las estadísticas sociales y macroeconómicas del país. |
| PIB | Producto interno bruto | Medida para analizar la producción económica de cada país |

# 9 Anexos

## 9.1 Indicadores para medir desempeño de modelos de proyección

Sea $e_t$ el error de estimación de la demanda en el periodo t:

$$e_t = D_t^{REAL} - D_t$$

Donde $D_t^{REAL}$ corresponde a la demanda real y $D_t$ la demanda proyectada. La formulación matemática de los distintos indicadores se puede expresar de la siguiente forma:

- *Mean Square Error* (MSE):

$$MSE_k = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(e_t)^2$$

- *Root Mean Square Error* (RMSE):

$$RMSE_k = \sqrt{MSE_k} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(e_t)^2}$$

- *Mean Absolute Error* (MAE):

$$MAE_k = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}|e_t|$$

- *Normalized Mean Absolute Error* (NMAE):

$$NMAE_k = \frac{MAE_k}{P_{inst}}$$

- *BIAS*:

$$BIAS_k = Av(e_{t+k|t}) = \overline{e_k} = \frac{1}{N_t}\sum_{t=1}^{N} e_{t+k|t}$$

- *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE):

$$MAPE_k = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left|\frac{e_{t+k|t}}{P_{t+k|t}}\right|$$

- *Standard Deviation of Errors* (SDE):

$$SDE_k = Std(e_{t+k|t}) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(e_{t+k|t} - \overline{e_k})^2}$$

## 9.2 Información de base para proyecciones de producción del cobre

**Proyección esperada, cap. máxima y mínima de producción, 2018 – 2029.**

| Escenario | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Producción máxima | 5.831,6 | 6.703,5 | 7.081,9 | 7.140,5 | 7.510,5 | 7.893,1 | 8.112,5 | 8.191,0 | 8.167,6 | 8.283,4 | 8.299,4 | 8.106,9 |
| Producción esperada | 5.831,6 | 6.149,4 | 6.460,2 | 6.540,7 | 6.805,3 | 7.053,2 | 7.181,5 | 7.248,5 | 7.149,8 | 7.184,4 | 7.164,3 | 7.061,5 |
| Producción mínima | 5.831,6 | 5.541,8 | 5.817,3 | 5.824,6 | 6.044,9 | 6.225,9 | 6.311,0 | 6.343,8 | 6.198,6 | 6.187,2 | 6.121,7 | 5.985,5 |

Fuente: Cochilco (2018)

**Proyección esperada de producción de cobre a nivel regional según área productiva, 2018 – 2029**

| Región | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Arica y Parinacota | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Tarapacá | | 606,5 | 648,1 | 646,9 | 754,7 | 771,5 | 841,2 | 815,2 | 821,3 | 798,5 | 810,0 | 816,3 |
| Antofagasta | | 3.450,8 | 3.686,4 | 3.718,6 | 3.793,6 | 3.895,1 | 3.920,3 | 4.001,9 | 3.912,2 | 3.850,2 | 3.828,8 | 3.744,4 |
| Atacama | | 663,0 | 684,1 | 713,1 | 796,0 | 940,1 | 918,7 | 940,6 | 933,1 | 931,3 | 965,7 | 950,2 |
| Coquimbo | | 392,7 | 401,1 | 428,2 | 466,3 | 475,0 | 494,0 | 491,9 | 495,2 | 496,1 | 493,3 | 483,9 |
| Valparaíso | | 258,5 | 259,8 | 261,3 | 248,1 | 259,4 | 288,3 | 279,1 | 260,0 | 347,6 | 287,8 | 269,6 |
| RM | | 347,4 | 346,8 | 350,9 | 348,2 | 348,3 | 357,4 | 361,9 | 365,2 | 380,3 | 383,7 | 384,3 |
| O`Higgins | | 425,7 | 419,3 | 407,3 | 384,9 | 351,8 | 349,5 | 347,4 | 362,9 | 380,3 | 395,1 | 412,7 |
| Total | 5.831,6 | 6.144,7 | 6.445,5 | 6.526,3 | 6.791,8 | 7.041,3 | 7.169,6 | 7.237,9 | 7.149,8 | 7.184,4 | 7.164,3 | 7.061,5 |

Fuente: Cochilco (2017)

**Proyección esperada de producción de cobre a nivel nacional según condición, 2018 – 2029.**

| Escenario Condición | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Base | 5.831,6 | 6.110,3 | 6.259,4 | 6.194,0 | 6.134,9 | 6.055,4 | 5.963,5 | 5.882,1 | 5.595,5 | 5.539,9 | 5.409,6 | 5.320,0 |
| Probable | 0,0 | 27,6 | 154,9 | 268,5 | 487,5 | 699,0 | 752,6 | 840,8 | 901,2 | 888,8 | 914,3 | 863,9 |
| Posible | 0,0 | 11,6 | 45,9 | 68,1 | 167,4 | 206,7 | 340,9 | 396,7 | 422,8 | 406,1 | 396,2 | 417,8 |
| Potencial | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,1 | 15,4 | 92,1 | 124,5 | 128,9 | 230,4 | 349,5 | 444,3 | 459,8 |
| Total | 5.831,6 | 6.144,7 | 6.445,5 | 6.526,3 | 6.791,8 | 7.041,3 | 7.169,6 | 7.237,9 | 7.149,8 | 7.184,4 | 7.164,3 | 7.061,5 |

Fuente: Cochilco (2018)

**Mapa minero de Chile**

Fuente: SONAMI, 2018