

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

Licitación ID: 584105-34-LP15

Informe Final

**“Elaboración e implementación de herramientas prospectivas
de Largo Plazo”**

PARA:

Subsecretaría de Energía

SANTIAGO

Abril 2016



TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	2
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS DEL ESTUDIO	<u>65</u>
Objetivo general	<u>65</u>
Objetivos específicos	<u>65</u>
METODOLOGÍA GENERAL.....	<u>76</u>
Revisión de Antecedentes de Modelación.....	<u>87</u>
Desarrollo del Modelo PROSPECTIVA E2BIZ.....	<u>1140</u>
Enfoques Sectoriales de Consumo Final.....	<u>1241</u>
Características de la Herramienta Computacional	<u>1817</u>
Indicadores del Sistema de Energía.....	<u>2019</u>
Medidas de Eficiencia Energética.....	<u>2221</u>
Puntos Pendientes, Recomendaciones y Mejoras	<u>3231</u>
BIBLIOGRAFÍA	<u>3938</u>
Anexo 1: REVISIÓN DE ANTECEDENTES MODELACIÓN.....	<u>4039</u>
Clasificación de Modelos energéticos	<u>4039</u>
herramientas de consumo energético.....	<u>4645</u>
ENPEP/BALANCE/MAED.....	<u>4746</u>
LEAP.....	<u>4847</u>
MARKAL/TIMES.....	<u>5049</u>
MESSAGE.....	<u>5150</u>
MS Excel	<u>5251</u>
POLES	<u>5352</u>

REVISIÓN DE MODELOS MAPS	5453
Sector Comercial-Público-Residencial (CPR).....	5453
Sector Transporte	6564
Sector Industria y Minería	7271
Sector Generación	7877

INTRODUCCIÓN

Este informe corresponde al informe final del estudio “Elaboración e implementación de herramientas prospectivas de Largo Plazo”. La herramienta desarrollada se base en un enfoque de usos finales y responde al gran desafío de caracterizar los consumos actuales y proyectados a nivel regional. La herramienta permite apoyar el análisis de las políticas regionales y nacionales de desarrollo energético y de cambio climático. El foco de la herramienta está en la caracterización detallada de los consumos finales con un foco de largo plazo. La herramienta también modela la oferta de generación (expansión y operación) y las refinerías cerrando el balance.

La figura siguiente resume el marco conceptual y metodológico (de energía útil) que fundamenta la herramienta y que se explicará más en las próximas secciones y con detalle en el manual de la herramienta.

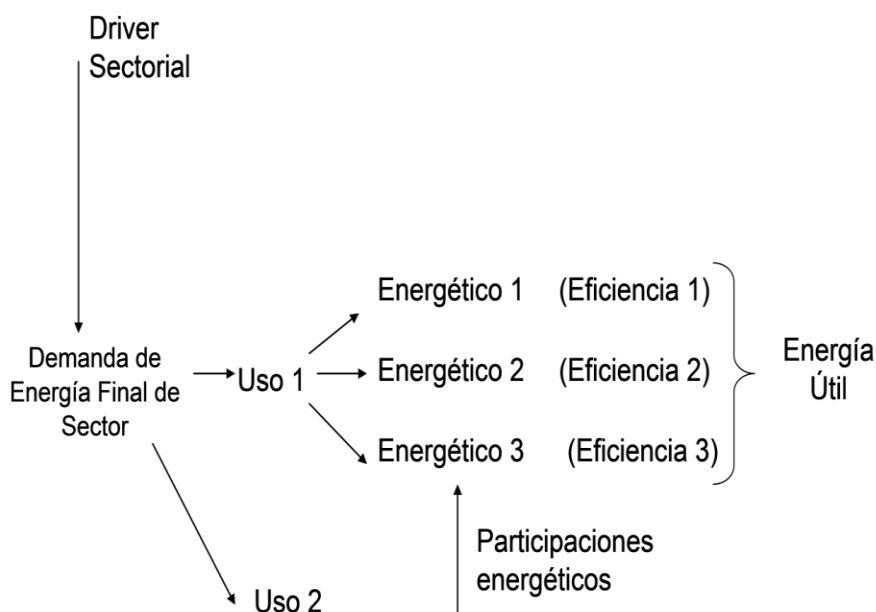


Figura 1 La Energía Final y Útil

Fuente: Elaboración Propia.

El informe es de naturaleza ejecutiva para mostrar el alcance de la herramienta y sus fundamentos de manera comprensible. Se presenta la lógica de las metodologías de cada uno de los sectores de demanda final y de generación eléctrica como también de las medidas de eficiencia energética modeladas para cada sector. Los detalles de las metodologías, datos utilizados, forma de uso del software y construcción de escenarios se incluyen en manual anexo a este informe.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos, general y específicos, planteados para este estudio se presentan a continuación.

OBJETIVO GENERAL

Presentar una herramienta prospectiva de largo plazo, que permita dejar las capacidades instaladas en el Ministerio para analizar diversos escenarios y tendencias del sector energía, junto a instrumentos de política pública, de forma cuantitativa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Construir un modelo de proyección del sector energético chileno, que permita caracterizar con detalle la demanda de energía (consumo de combustibles, usos finales de la energía, crecimientos, entre otros aspectos) y de forma general la oferta de energía (disponibilidad, de energéticos y centros de transformación).
- b) Realizar una propuesta metodológica de actualización de los datos de entrada requeridos para la modelación (consumos energéticos, supuestos de base, etc.).
- c) Analizar la aplicación de diversas medidas de Eficiencia Energética en el modelo y la medición de su impacto.
- d) Plantear la metodología para la proyección de la demanda del sector energético bajo consideraciones de incertidumbre.
- e) Realizar una propuesta de evaluación de distintos escenarios del sector energía, por medio de indicadores.
- f) Recomendar líneas de trabajo futuras en cuanto a mejoras del modelo.

METODOLOGÍA GENERAL

Esta sección presenta la metodología de trabajo del estudio. Esta metodología busca cumplir con los objetivos del estudio y considera cuatro etapas de desarrollo que se presentan en la figura siguiente.

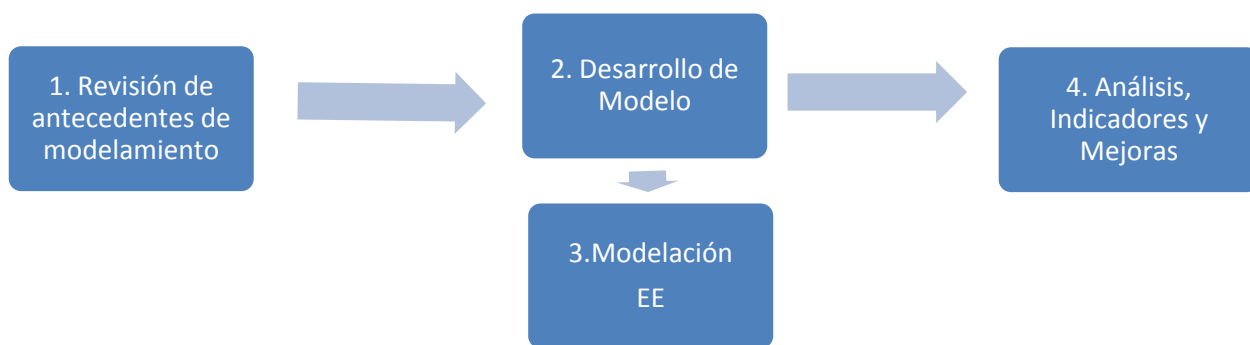


Figura 2 Etapas de la Metodología

Fuente: Elaboración Propia

En una primera etapa se realiza una revisión crítica de antecedentes de modelamiento, tanto de tipos de modelos como de aplicaciones nacionales, con el propósito de afinar las metodologías que se consideran en cada sector de demanda final y de oferta del sistema energético. La segunda etapa considera el desarrollo de la herramienta, es decir tanto el modelamiento matemático que sustenta la herramienta como también su implementación. Paralelamente, se modelan en el contexto de la herramienta, las medidas de eficiencia energética asociadas al PAEE y a una eventual Ley de Eficiencia Energética, y se procede a su carga en la herramienta. La elaboración simultánea de la modelación sectorial y de las medidas es crucial para lograr parametrizar adecuadamente las medidas. Finalmente, la última etapa considera el desarrollo de una propuesta preliminar de incorporación de tratamiento de incertidumbre, el desarrollo de indicadores relevante asociados a la caracterización de escenarios, y establecer una hoja de ruta crítica con potenciales mejoras de versiones futuras del modelo.

Revisión de Antecedentes de Modelación

Esta etapa contempla la revisión de antecedentes de modelación para definir las metodologías y tipo de herramienta a construir en base a los antecedentes nacionales disponibles. El uso de modelos se explica por el deseo de lograr reflejar sistemas complejos de manera simple y comprensible. Por otra parte, los modelos contribuyen a organizar una gran cantidad de información existente, y brindan un marco consistente para evaluar distintas hipótesis. Un gran número de modelos se han desarrollado para llevar a cabo análisis de sistemas energéticos y construir escenarios. Estos modelos se basan en enfoques distintos y utilizan una amplia gama de herramientas matemáticas.

Esta etapa considera la revisión de metodologías de modelación, herramientas aplicadas en la experiencia internacional y la revisión de los antecedentes sectoriales de los modelos sectoriales del proyecto MAPS.

- **Categorías metodológicas de modelación:**

Se revisan los fundamentos básicos de distintos grupos de metodologías que suelen clasificarse entre formulaciones tipo “top-down” y aquellas “bottom-up”. Los métodos “top-down” suelen representar los sistemas energéticos con altos niveles de agregación tecnológica, pero permiten consistencia con la teoría económica, por ejemplo, capturar cambios en la composición o nivel consumo ante cambios en los niveles de precios. Entre las metodologías (típicamente) “top down” se encuentran metodologías de equilibrio, ya sea parcial o general.

Los métodos “bottom-up”, por el contrario, permiten caracterizar con importantes niveles de detalle los sistemas energéticos, en particular, las tecnologías y parámetros que las caracterizan y a los consumos. La metodología es compatible con la modelación de usos en el consumo, factor clave para la evaluación de iniciativas de eficiencia energética. Entre las metodologías “bottom-up” se encuentran metodologías de contabilidad y usos, métodos de optimización (típicamente de minimización de costos de suministro de alguna parte del sistema de energía), y simulación. En general, pueden llevarse a cabo formulaciones econométricas tanto de tipo “top down” como “bottom up”.

Las ventajas de los métodos “bottom-up” son la desventajas de los “top-down” y vice-versa. Por ejemplo, la evaluación detallada de los impactos de medidas de eficiencia energética, cambio de combustible o tecnología, la penetración de usos, emisiones de GEI son todos aspectos posibles de capturar en una metodología “bottom-up”. Un modelo “top down” no tiene la riqueza tecnológica para capturar bien tales cambios. Sin embargo, los efectos de un impuesto al carbono sí pueden ser capturados por un método “top-down”, mientras que no (al menos endógenamente) en una formulación “bottom-up”.

- **Ejemplos de herramientas de modelación**

La revisión de antecedentes de modelación contempla el estudio de análisis de distintas herramientas utilizadas en la experiencia internacional. Estas herramientas son aplicaciones específicas de metodologías “bottom-up” o “top-down”. El propósito de esta revisión es analizar los desafíos, tipo de datos y esfuerzos necesarios para implementar computacionalmente las metodologías analizadas, como también para identificar posibles mejoras a desarrollar en el futuro. Por otra parte, algunas herramientas están disponibles con capacidades generales y que permiten formular nuevos modelos, por ejemplo, para Chile.

Entre los modelos revisados destacan aquellos que permiten caracterizar el consumo energético con foco en demanda. En particular, se revisan las metodologías de optimización MESSAGE y Markal/Times que para niveles de demanda exógenos buscan encontrar el mínimo costo de suministro dadas condiciones de precios y tecnologías. Se revisan también modelos con consideraciones de equilibrio económico como Markal-Macro y Poles.

Se revisan en detalle las capacidades del modelo LEAP por ser éste la herramienta escogida directamente para implementarse en la aplicación nacional. LEAP es un modelo basado en la construcción de escenarios. Los escenarios facilitan la realización de cálculos de ofertas y demandas energéticas, y la evaluación de alternativas tecnológicas y de política. El usuario define variables clave (como kilómetros recorridos por parte de vehículos y rendimientos de combustible) a partir de los cuales el LEAP construye escenarios de demanda. Un conjunto de “transformaciones” caracterizan los procesos de conversión y se relacionan a la demanda para entregar resultados en términos de emisiones y consumo de recursos. Opciones tecnológicas y de política pueden ser estudiadas en la medida que alteren variables claves, escenarios de demanda o transformaciones.

Algunas de las importantes ventajas de LEAP son su flexibilidad y facilidad de uso, que permiten, al momento de tomar decisiones, pasar rápidamente del plano de las ideas al de análisis de políticas sin tener que recurrir a modelos más complejos. Entre otras, importantes limitaciones se relacionan con la dificultad de incorporar consideraciones de precios explícitas, pero esta es una característica usual de las aplicaciones “bottom-up”.

- **Metodologías sectoriales de proyecto MAPS**

Esta actividad conlleva la revisión detallada de los modelos sectoriales del proyecto MAPS. El propósito es tomar estas modelaciones como punto de partida para los desarrollos sectoriales a llevar a cabo en el estudio. Cabe destacar que distintos miembros del equipo consultor participaron en la modelación de cada uno de los sectores considerados: CPR, industria y minería, transporte, y generación eléctrica.

El cuadro siguiente resume los elementos que la herramienta utiliza de los proyectos sectoriales MAPS. El detalle de los modelos, herramientas y revisiones sectoriales de los modelos MAPS se encuentran en la sección de anexos.

Sector	Relación entre Herramienta y Modelo Sectorial de MAPS
--------	---

Industria y Minería	Se mantiene metodología (original de LEAP 2011) pero se actualizan todos los antecedentes de consumo y drivers con última información disponible (BNE, Cochilco, Banco Central, entre otras).
Residencial	Se propone metodología similar a MAPS con foco en calefacción. En particular, se distingue entre consumo teórico y real y cómo el crecimiento del ingreso reduce la brecha progresivamente.
Comercial y Público	Se propone metodología distinta a MAPS con mayor desagregación de segmentos (universidades, hospitales, malls etc.).
Transporte	Se mantiene metodología, pero se utilizan antecedentes actualizados para SECTRA en proyecto STEP (2014)
Generación eléctrica	Se mantiene metodología general, pero se actualizan varios antecedentes (costos de tecnologías, centrales en construcción, etc.) utilizando datos de CNE, ME, CER entre otros. Se mantiene estrategia de interconexión SIC-SING.

Desarrollo del Modelo PROSPECTIVA E2BIZ

Los objetivos del estudio, posibilidades de modelación y antecedentes previos disponibles hacen que la elección metodológica corresponda a la utilización de modelos de uso final ("accountancy models") tal y como se exigía en las bases. Este enfoque permite proyectar y estudiar cambios en los diferentes usos energéticos por cada sector de la economía, los combustibles asociados, lo que permite considerar eficiencias relativas entre energéticos por uso, y por tanto, también caracterizar en forma directa la eficiencia energética de cada uno de ellos. Este enfoque se asocia a una modelación "bottom up" que es compatible con la evaluación de programas de EE. La modelación por usos permite un nivel de parametrización importante, lo que hace posible analizar un sinnúmero de escenarios exploratorios. El software que cumple todos estos aspectos para la modelación requerida en el proyecto sobresale el uso del software LEAP.

La herramienta desarrollada permite entonces caracterizar con alto nivel de detalle los consumos por usos de los sectores de demanda final en distintos escenarios. La modelación por usos considera el análisis de energía útil y combustibles que compiten por satisfacerlos en función de parámetros económicos y técnicos (como eficiencias de los combustibles por uso). El modelo considera en su definición el análisis de medidas de eficiencia energética de forma tal de parametrizar las medidas de manera consistente con la caracterización de los consumos.

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

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

Para el desarrollo del modelo, el cuadro siguiente presenta los sub-módulos desarrollados para la construcción del modelo prospectivo:

Tabla 1 Sub-Módulo de prospección

Sub-Módulo	Función
Drivers/ Niveles actividad	Modelación de drivers, que alimentan el modelo de energía. Estos drivers serán a su vez función de variables macroeconómicas y otra información. La modelación de estos drivers se realiza en base a antecedentes disponibles,

	análisis econométricos y son una entrada al sub-modelo de energía.
Energía	En función de los drivers se determina la energía consumida por el sector y desagregada por usos según se solicita en las bases. Este corresponde al modelo LEAP.
Indicadores de desempeño	Este modelo permitirá obtener otras variables requeridas, como indicadores para hacer la evaluación de escenarios.

Fuente: Elaboración Propia

ENFOQUES SECTORIALES DE CONSUMO FINAL

A continuación, se describe de la metodología de modelación de cada uno de los sectores:

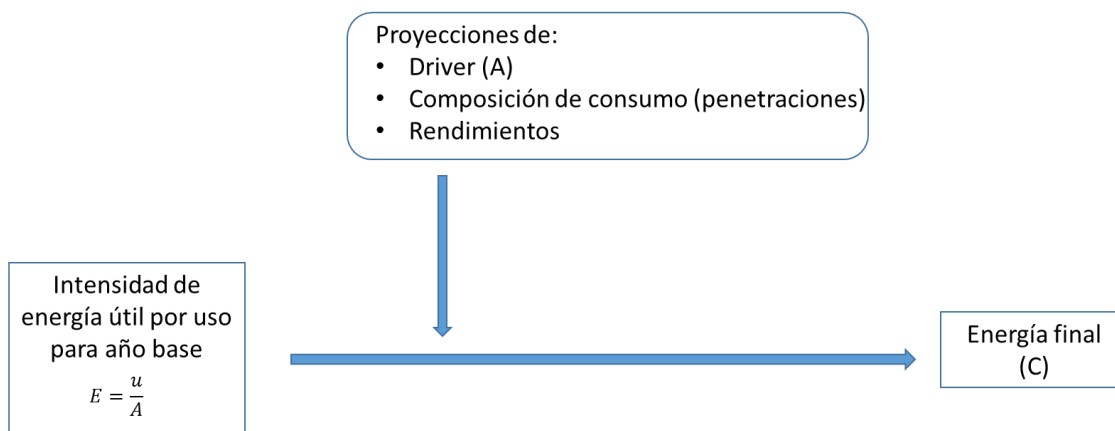
- **Sectores Industriales y Mineros.**

La aplicación de la metodología es de análisis de energía útil puro para sectores industriales y mineros. En la herramienta los datos de energía final para el año base se ingresan en términos de energía final. El LEAP internamente utiliza las tasas de eficiencia de cada combustible por uso para obtener la energía útil.

En este caso, y a partir de antecedentes del año base (especialmente el BNE en sus versiones final, por región y uso), se estima el consumo de energía útil para cada uso. La modelación construye el consumo final cada año a partir de las trayectorias del nivel de actividad, de la intensidad de energía útil, de la composición del consumo y los rendimientos. En el caso de los sectores industriales, las intensidades se construyen a partir de los antecedentes del BNE en su versión regional. Por lo anterior, y para el año base 2014, por construcción los consumos coinciden con aquellos del BNE. La excepción es la minería de Cobre, en este caso los antecedentes de consumo por energético e intensidades provienen de Cochilco por contar con una caracterización más detallada de los consumos del sector.

La figura siguiente resume el foco metodológico de usos y energía útil empleado para los sectores industriales y mineros:

Figura 3 Enfoque Metodológico Sectores industriales y Mineros



Fuente: Elaboración propia.

En estos sectores, los usos considerados son térmicos, motrices y específicos eléctricos. En el sector minería del cobre, la desagregación es de acuerdo a los procesos tal y como lo hace Cochilco para la caracterización de los consumos de energía: mina, concentrado, lixiviación, fundición, refinación, servicios, y propulsión y desalinización. El detalle de las ecuaciones respecto al tratamiento de las variables de entrada y de proyección se encuentra en el manual.

La definición de drivers para los sectores industriales y mineros se presenta a continuación. En todos los casos, salvo industrias varias, el nivel de actividad se asocia a un indicador de producción física del sector. Para el caso industrias varias, el nivel de actividad escogido es el PIB por la diversidad de industrias que componen al sector y porque la relación entre consumo del sector y PIB es significativa. Respecto de la proyección de los drivers se realizan consideraciones de mercado para varios sectores (como cobre, papel y celulosa o siderurgia) mientras análisis econométrico que típicamente depende del PIB en sectores como cemento o algunos mineros. Los detalles de los datos empleados, fuentes, supuestos y metodologías específicas de proyección de estos drivers se encuentran en el manual anexo para cada uno de los sectores.

Tabla 2 Drivers sectores Industriales y Mineros.

Sector	Sub-Sector	Driver de Energía	Proyección de driver
Minería	Cobre	Producción de Cobre [Ton]	Análisis de mercado/proyectos/capacidad esperada de producción
	Hierro	Producción de Hierro [Ton]	Análisis econométrico
	Salitre	Producción de Nitrato [Ton]	Análisis econométrico
	Minas Varias	Producción total de minerales [Ton]	Análisis econométrico
Industria	Papel y Celulosa	Producción de Celulosa [Ton]	Análisis de mercado/ capacidad esperada de producción
	Siderurgia	Producción de Acero [Ton]	Análisis de mercado/ capacidad esperada de producción
	Cemento	Producción de Cemento [Ton]	Análisis econométrico
	Azúcar	Producción de Remolacha [Ton]	Análisis de mercado/ capacidad esperada de producción
	Pesca	Extracción y Cultivo [Ton]	Análisis de mercado/cuotas/capacidad esperada de producción
	Petroquímica	Producción de Metanol y Etileno	Análisis de mercado/ capacidad esperada de producción
	Industrias Varias	PIB	Análisis econométrico

Fuente: Elaboración propia.

La inclusión de precios en el modelo de los sectores industriales y mineros se realiza a partir de la sustitución de combustibles según los costos de los servicios energéticos que proveen. Para ello se utilizan estimaciones existentes y públicas de elasticidades precio y cruzadas de combustibles. Para caracterizar adecuadamente las posibilidades técnicas de sustitución, se usan estas elasticidades, pero sólo en procesos específicos de la industria. Las elasticidades se emplean de forma tal que modifiquen la composición del consumo ante cambios de precios (sustitución) pero sin afectar el nivel de producción de un sector. Las ecuaciones que rigen la sustitución como aquellos sectores y usos donde se realiza esta modelación se detalla en el manual anexo.

Se enfatiza que las consideraciones de precios pierden sentido en el muy largo plazo dada la incertidumbre respecto de las tecnologías y preferencias de mercado (no existen elasticidades de nuevas tecnologías). Por otra parte, no hay estimaciones para nuevas tecnologías obligando el uso de definiciones exógenas que la herramienta debe hacer compatibles con las metodologías para combustibles convencionales.

- **Sectores CPR**

En este caso, se mantiene el enfoque general utilizado en MAPS, pero desagregando los resultados a nivel regional y de acuerdo al BNE. En este caso, se consideran los usos de calefacción, artefactos eléctricos, y

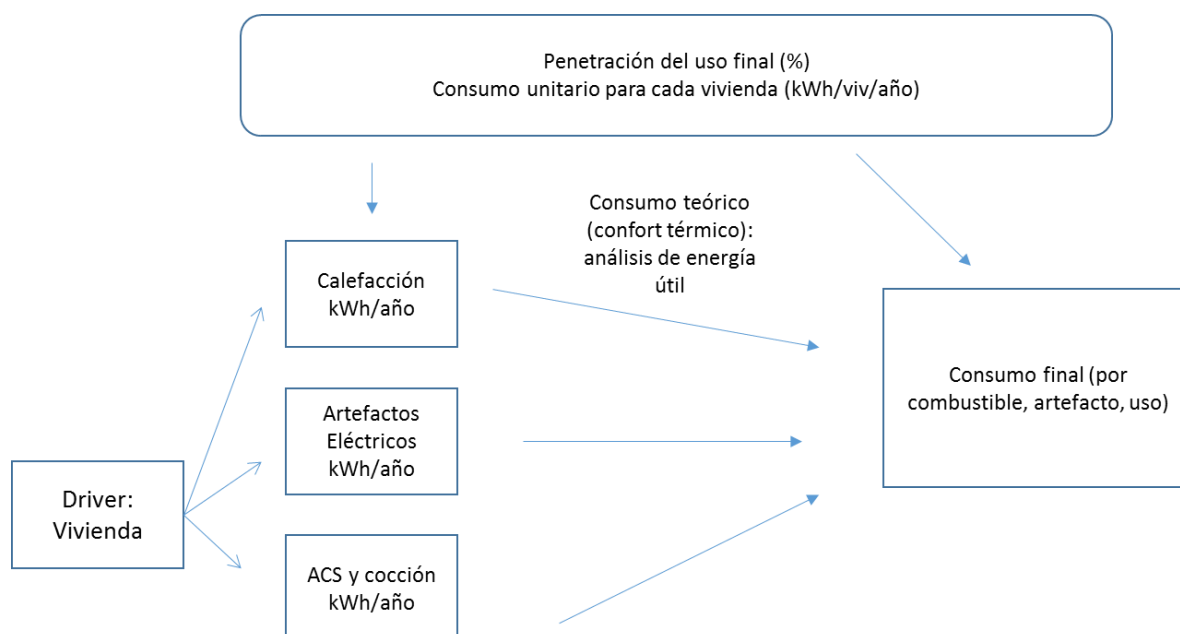
agua caliente sanitaria (ACS) y cocción. La proyección del consumo energético se lleva a cabo mediante un enfoque “bottom-up” el cual, deberá considerar, en términos simples, dos indicadores a ser analizados durante el horizonte de evaluación;

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

Estas variables son las principales determinantes de la proyección de consumo energético del sector. La metodología en este caso utiliza intensidades de energía final para llevar a cabo la proyección. Para el caso de la calefacción, se estima el consumo teórico que permitiría alcanzar el confort térmico utilizando un enfoque de energía útil.

El foco metodológico general se presenta en la figura siguiente:

Figura 4 Enfoque Metodológico Sector Residencial



En los sectores comercial y público, y debido a la imposibilidad de levantar información más precisa respecto de la caracterización energética y tamaño de las principales tipologías asociadas al sector, se utiliza el enfoque de tipo “top-down”, donde se proyectaron tendencias históricas, y analizaron algunos subsectores específicos (retail, clínicas, colegios). En el caso de comercial se consideran los segmentos supermercados, malls, bancos, clínicas y otros comercios. En caso público hospitales, universidades, colegios y otros públicos. Los segmentos “Otro Comercio” y “Otro público” tienen como propósito absorber las incertidumbres y los variados segmentos restantes.

Para cada uno de los segmentos, el consumo energético se procedió a calcular usando la siguiente fórmula:

$$C_{s,r,t} = N_{s,r,t} \cdot CE_s \cdot T_s$$

Donde:

$C_{s,r,t}$ = Consumo de energía en el segmento s, en la región r y para el año t=0.

$N_{s,r,t}$ = Número de unidades del segmento s, en la región r y en el año t=0.

CE_s = Consumo específico de energía por unidad de área, para el segmento s.

T_s = Tamaño medio de una unidad del segmento s.

Esta expresión permite tener el consumo final por segmento de comercio. En relación a la proyección de usos finales y combustibles para cada segmento, se asumió que su distribución no cambia en el tiempo. Esto se llevó a cabo, debido a que no se cuenta con información histórica que permita inferir tendencias, sin embargo, es una variable que es posible manejar a futuro e ir modificando en el tiempo. Por otra parte, se consideró que la proporción de usos finales es la misma a nivel país.

Las ecuaciones detalladas y proyección de cada una de las variables relevantes para los distintos escenarios de los sectores CPR se incluyen en el manual anexo.

- **Sectores de Transporte**

La metodología utilizada es equivalente a aquellas utilizadas en los proyectos MAPS Fase 2 del PNUD, y Actualización Metodológica del Modelo STEP solicitado por SECTRA (2014). Esta metodología utiliza como variables fundamentales de demanda de transporte a la actividad de transporte de pasajeros, expresada en pasajero-kilómetro (PKM) y la actividad de transporte de carga expresada en tonelada-kilómetros (TKM). Las variables críticas a proyectar de nivel de actividad son:

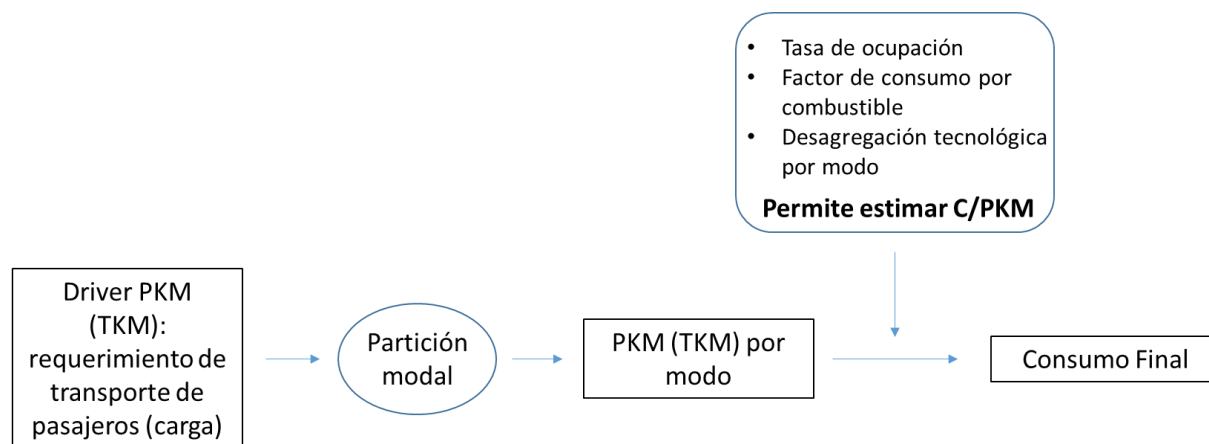
Módulo de Transporte	Variable	Unidad genérica
Aéreo	PKM interurbano	pax*km/año
Marítimo	TKM interurbano	ton*km/año
Ferroviario	TKM interurbano	ton*km/año
	PKM interurbano	pax*km/año
	PKM urbano	km/año per cápita

Caminero	TKM interurbano	ton*km/año
	PKM interurbano	
	TKM urbano	km/año per cápita
	PKM urbano	

Además, se modela económicamente el consumo de bunker (aéreo y marítimo) directamente en función del ingreso. Estos antecedentes son de SECTRA y difieren de los consumos reportados por el BNE. La variable bunker se divide en consumo aéreo y marítimo, en ambos sectores se modela la demanda energética en Giga Calorías lo que permite independizar la proyección de un combustible en particular. El modelo económico general para la proyección del consumo internacional difiere entre los 2 sectores. En el sector marítimo este consumo responde exclusivamente a carga, sin embargo, en el sector aéreo este consumo responde tanto a carga como a demanda por turismo o servicios internacionales

El enfoque de transporte considera la modelación del requerimiento de transporte: pasajero-kilómetros (PKM) en el transporte de pasajeros y tonelada-kilómetros (TKM) en el transporte de carga. La ventaja de este enfoque es permitir una modelación explícita de los cambios de modo. Se requiere proyección de PKM urbano e interurbano para el transporte de pasajeros y de proyección de TKM urbano e interurbano para el transporte de carga lo que se lleva a cabo para cada región.

La figura siguiente resume el foco de la metodología para los sectores de transporte.



Fuente: Elaboración propia.

En cada caso, se estima económicamente el requerimiento de transporte, por ejemplo, PKM para transporte urbano, o TKM para el transporte de carga. En general, se plantean relaciones que dependen del nivel de ingreso per cápita (para el caso del PKM) y del nivel de actividad regional (para el caso del TKM). Estas relaciones se estiman para transporte urbano e interurbano para cada una de las regiones del país.

Para estimar los consumos el nivel de actividad se desagrega en modos mediante antecedentes de partición modal (PKM por modo), tasas de ocupación de los modos y rendimientos.

El detalle de las ecuaciones que rige la estimación de todos los consumos asociados a transporte se encuentran en el manual anexo.

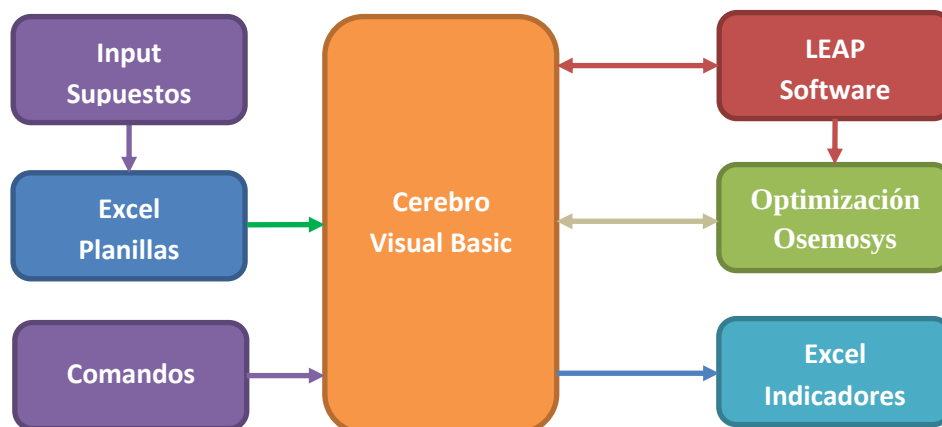
CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Debido a la complejidad de la herramienta, y a la cantidad de datos a manejar, se debieron construir distintos módulos que interactúan entre ellos, con el objeto de facilitar la usabilidad de la herramienta desarrollada.

Los módulos desarrollados corresponden a los siguientes:

Módulos	Descripción
Excel – Planillas	Este módulo se encarga de recibir los datos de entrada de los modelos, en un formato Excel, el cual es una interfaz de fácil uso.
Cerebro – Visual Basic	Este módulo tiene por misión cargar la información en LEAP, de una manera rápida y fácil para el usuario. Gestiona la optimización del modelo de generación y la salida de resultados para los indicadores.
Optimización – Generación Electricidad	Corresponde a la optimización a mínimo costo de la capacidad del sistema de generación de electricidad. Se ocupa el optimizador GLPK y el modelo de Osemosys.
LEAP	Corresponde a los cálculos de la proyección de energía y otros contaminantes, y cuyos resultados pueden ser accedidos fácilmente por los usuarios.
Excel - Indicadores	Módulo de cálculo de los indicadores, requeridos por el usuario.

A continuación, se entrega un diagrama que explica la interacción entre estos módulos:



Como se indica en la figura anterior, la relación entre los módulos es de la siguiente forma:

El módulo que contiene las planillas “Excel Planillas”, recibe los datos del usuario, y transforma esta información en un formato que puede ser leído por el “Cerebro”. Este último recoge los datos de “Excel Planillas”, y los ingresa en el módulo “LEAP”, para que sea procesado en este software y calcule los datos de energía y de medio ambiente. El “Cerebro” además puede recibir los comandos del usuario referidos a cargar selectivamente la información de ciertos sectores y calcular el módulo de “Optimización”. Finalmente, el “Cerebro” recoge los resultados relevantes de “LEAP”, los cuales son ingresados en la planilla que finalmente genera los indicadores, los cuales se calculan en el módulo “Excel Indicadores”.

Escenarios de simulación

El modelo permite simular 4 escenarios distintos, de acuerdo a variaciones que se generan en los datos de entrada del modelo. De acuerdo a la filosofía de la modelación, estos escenarios heredan características del escenario Base, y sobre lo cual se generan las variaciones en los parámetros tecnológicos del modelo.

Escenarios	Descripción
Base	Corresponde al escenario en el cual los datos se comportarán como hasta ahora sin medidas alternativas como eficiencia energética.
EE	Corresponde al escenario que incluye medidas de eficiencia energética.
Alternativo 1 (Alt1)	Corresponde a un escenario alternativo, que puede ser diseñado de acuerdo a los

	requerimientos del usuario.
Alternativo 2 (Alt2)	Corresponde a un escenario alternativo, que puede ser diseñado de acuerdo a los requerimientos del usuario.

INDICADORES DEL SISTEMA DE ENERGÍA

LEAP es un modelo basado en escenarios, siendo la capacidad de generar múltiples escenarios de forma sencilla una de sus principales ventajas. Además, ofrece una gran oferta de resultados visibles tanto en la demanda energética a cualquier nivel del árbol del modelo (desde la demanda total hasta la demanda de un combustible específico en un uso específico) como en la transformación energética, las emisiones de gases efecto invernadero y los recursos.

Por otra parte, la herramienta desarrollada cuenta con capacidades para definir múltiples indicadores asociados a escenarios. Entre los indicadores (asociados a cada escenario) posibles de estimar con la herramienta destacan:

- TPES: Total primary energy supply.
- TPES_ER: Fracción de energías renovables de TPES.
- IEP: Intensidad Energética Primaria. TPES/PIB. Unidad (Teracal/US\$).
- ET: Emisiones nacionales de GEI. Unidad (Toneladas de CO₂eq).
- EPC: Emisiones per cápita. ET/habitantes del país.
- IE: Intensidad de emisiones. ET/PIB.
- GERNC: generación con medios ERNC. Generación medios ERNC/Generación total. Unidad (%)
- GER: generación con medios renovables. Generación medios ERNC/Generación total. Unidad (%)
- SW: Shannon-Wiener Index. Indicador de entropía (diversidad).

$$SW = - \sum_{i=1}^m p_i \ln(p_i)$$

Donde $p_i = \frac{\text{generación fuentes } i}{\text{generación total}} 100$

Para el conjunto de los i: 1) Solar + Viento y otras ernc 2) Biomasa y biogas, 3) geotermia; 4) Hidro pasada; 5) Hidro embalse; 6) Carbón, 7) Gas Natural 8) diesel

Unidad es un número. Si $SW < 1$ entonces sistema está altamente concentrado.

- HHI: Herfindahl-Hirschman Index

$$HHI = \sum_{i=1}^n p_i^2$$

Donde en este caso, $p_i = \frac{\text{generación fuentes } i}{\text{generación total}}$

La selección de i igual que en el indicador SW.

Se considera concentración si $HHI > 1800$.

- Capacidad instalada por tipo de fuente (MW) por sistema.
- Incrementos de capacidad por tipo de fuente (MW)
- Generación SIC, SING, Aysén y Magallanes (GWh)
- (E_SIC, E_SING, E_AYSEN, E_MAGALLANES) Emisiones GEI por sistema (Toneladas de CO2eq)
- CF: Consumo Final de Energía Total (TeraCal) de todos los combustibles.
- Consumo eléctrico per cápita nacional
- Emisiones GEI de demanda final (Toneladas de CO2eq)
- Consumo de Energía Eléctrica residencial por hogar, por región (KWh/hogar)
- Consumo de Calefacción residencial (final) por hogar por región (teraCal/Hogar)
- Intensidad de Sector Industrial y Minero (TeraCal/PIB)
- Intensidad del Cemento (TeraCal/ton)
- Intensidad de Papel y Celulosa (TeraCal/ton)
- Intensidad de Cobre (IC): Consumo total Cobre/Toneladas producida
- Intensidad Eléctrica Cobre: Consumo Eléctrico Cobre/Toneladas producidas.

Medidas de Eficiencia Energética

En esta sección se presentan las distintas medidas de eficiencia energética modeladas en la herramienta, destacándose las asociadas al PAEE y a la ley de EE. Se evalúan los programas presentados en el PAEE desagregados por sector económico, tal como fueron presentados en el documento original:

- **Industria y Minería:** corresponde a los usos energéticos del sector extractivo y productivo nacional. Se relaciona con consumos de combustibles y electricidad para la operación de los distintos procesos productivos.
- **Edificaciones:** corresponde a los usos de energía en los sectores residencial, comercial y público del país. Se condice principalmente con usos en climatización y es afectado mayoritariamente por la envolvente térmica de los edificios.
- **Transporte:** corresponde al uso de combustibles en vehículos, centrándose en el caso del PAEE principalmente en vehículos terrestres de carga y de transporte de pasajeros particulares y públicos.
- **Artefactos:** corresponde a los usos de energía en equipamiento asociado a usos residenciales y comerciales. Generalmente se encuentra ligado a climatización, iluminación, agua caliente sanitaria y preparación de alimentos.

Las medidas de eficiencia energética son clave y una importante contribución para el alcance de la herramienta ya que los efectos de las medidas de EE son endógenos al modelo. Es directa también la modelación de medidas más o menos profundas en cada caso.

A continuación, se presentan las principales medidas que fueron incorporadas en el modelo. El detalle de los supuestos, metodología de modelación, fuentes de información y ecuaciones se presentan en el manual anexo para cada una de las medidas.

Tabla 3 Resumen de Medidas del Sector Industria y Minería

	Programas PAEE20	Como se entiende de la definición	Programa a modelar	Subsectores	Principales supuestos de modelación	Variables desde el modelo	Comentarios
Industria y Minería	Ley EE: clientes libres	Adopción de sistemas de gestión de energía para clientes libres.	Adopción de sistemas de gestión de energía tipo ISO 50.001 o similar de carácter obligatorio para los clientes libres.	Clientes libres	Clientes libres equivalentes a industria y minería menos industria y minas varias. Adopción obligatoria. Se propone utilizar información de auditorías (AChEE) para dividir potenciales de ahorro por combustible y/o uso. Los ahorros totales por empresa se obtendrán de los ahorros ex-post de la ISO 50.001 (AChEE).	Eficiencia de los distintos usos de los sectores industriales y mineros (descontado industrias y minas varias).	El ahorro por empresa se expandirá al ahorro por sector si se considera que será obligatorio, es decir, que todas las empresas adoptarán algún SGE. El ahorro unitario depende fuertemente del tipo de compromisos que estipule la Ley. De no haber mayor compromiso, se puede asumir ahorros totales similares o inferiores a los alcanzados con la ISO 50.001.
	Promover y fomentar la cogeneración	Mejorar ingeniería Apoyo a inversión Eliminación de barreras	Implementación de Cogeneración	Industria y minería	Potencial total y distribución por subsector de acuerdo a "Estudio para el Desarrollo de la Cogeneración en Chile", 2010. Tasas de adopción de acuerdo a experiencia del consultor y utilizadas en proyecciones anteriores.	Consumo de los sectores industriales y mineros por combustible y por uso.	Generalmente redunda en un aumento de consumo de combustible y disminución de demanda eléctrica.

	Fomento a la asistencia técnica a proyectos	Asistencia técnica Cofinanciamiento Capacitación	Aumento de eficiencia en nuevos proyectos (criterios de diseño con EE)	Industria y minería	Un porcentaje del crecimiento del sector tendrá una menor intensidad que la intensidad histórica. Se asume que esto ya estaría cubierto por un sistema de gestión energética (es una exigencia de la ISO 50.001).	Eficiencia de los distintos usos de los sectores industriales y mineros.	La cobertura (penetración) del programa depende fuertemente del grado de esfuerzo de la política. Se deberá definir el grado de obligatoriedad o la cantidad de proyectos que podrían verse afectados anualmente.
	MEPS motores	MEPS en motores	MEPS para motores para distintos rangos de potencia de acuerdo a River, 2014.	Industria y minería	Metodología de cálculo según informe RODA, con correcciones en la acumulación de ahorros de motores recambiados en años anteriores. Consumo de motores en el sector, rangos y distribución de motores por tamaño de acuerdo a River 2014.	Eficiencia del uso fuerza motriz en los sectores industrial y minero	

Fuente: Elaboración Propia

	Programas PAEE20	Como se entiende de la	Programa a	Subsectores	Principales supuestos de	Variables desde el	Comentarios
--	------------------	------------------------	------------	-------------	--------------------------	--------------------	-------------

		definición	modelar		modelación	modelo	
Comercial, Residencial y Público	Reacondicionamiento térmico de viviendas vulnerables	Mejora de envolvente en edificios existentes vulnerables.	Mejora envolvente térmica en sector residencial vulnerable.	Residencial	Bottom up de viviendas en zonas térmicas por definir, considerando número de viviendas a intervenir y un ahorro porcentual por vivienda.	Demanda térmica del uso calefacción para edificaciones unifamiliares.	Se requiere definir número de viviendas beneficiadas en función de presupuesto.
	Financiamiento al reacondicionamiento de viviendas	Crédito para mejora de envolvente en edificios existentes.	Mejora envolvente térmica en sector residencial no vulnerable.	Residencial	Bottom up de viviendas en zonas térmicas por definir, considerando número de viviendas a intervenir y un ahorro porcentual por vivienda.	Demanda térmica del uso calefacción para edificaciones unifamiliares.	Si es un crédito, hay que definir el monto del fondo para saber a cuantas viviendas beneficiará y asumir que todo el fondo disponible es utilizado (si el programa está bien definido esto debiera ser así).
	Promover el diseño de edificios con alto estándar de Eficiencia Energética	Estándares más altos para nuevos edificios (modificación de la OGUC).	Aplicación de mejor envolvente térmica en nuevas edificaciones.	Residencial	Bottom up considerando tasa de crecimiento del consumo energético por uso "calefacción" y estimación de reducción de consumo por vivienda respecto a la anterior versión de la OGUC.	Demanda térmica del uso calefacción por tipología de vivienda. Demanda térmica del uso aire acondicionado por tipología de vivienda.	
	Clasificación energética de viviendas	Etiquetado de viviendas en función de su nivel de eficiencia energética.	Respuesta de compradores ante mayor información de la calidad térmica de las viviendas.	Residencial	Bottom up considerando tasa de crecimiento del parque de viviendas. Se asume que la existencia de la clasificación hará que los consumidores prefieran viviendas más eficientes, estimulando la	Demanda térmica del uso calefacción por tipología de vivienda. Demanda térmica del uso aire acondicionado por	

					construcción de más de estas. Estimación del tasa de compra de viviendas más eficientes en función de estudios anteriores nacionales e internacionales.	tipología de vivienda.	
	Promover la Eficiencia Energética en alumbrado de vías vehiculares y zonas peatonales urbanas	Apoyo a municipios en el recambio de luminarias vehiculares y peatonales urbanas.	Recambio de luminarias vehiculares y peatonales (sector público).	Público	Bottom up en base a número de luminarias a recambiar según Agenda de Energía y ahorro estándar por luminaria. Horas luz anuales independientes de localización geográfica.	Eficiencia del uso iluminación del sector público.	Se requiere conocer un presupuesto anual para estimar la cantidad de luminarias que se podría recambiar.

	Programas PAEE20	Como se entiende de la definición	Programa a modelar	Subsectores	Principales supuestos de modelación	Variables desde el modelo	Comentarios
--	------------------	-----------------------------------	--------------------	-------------	-------------------------------------	---------------------------	-------------

Comercial, Residencial y Público	Establecer Estándares Mínimos de Eficiencia Energética	MEPS para distintos tipos de equipos.	MEPS ampolletas MEPS refrigeradores comerciales MEPS refrigeradores residenciales MEPS lavadoras MEPS fluorescentes y balastos MEPS aire acondicionado	Residencial Comercial Público	Bottom up desde las proyecciones del consumo eléctrico por uso, considerando tasas de recambio de acuerdo a vida útil y crecimiento de la demanda. Ampolletas corresponde al uso iluminación domiciliario. Tubos fluorescentes corresponde a parte del uso iluminación comercial y público. Refrigeradores corresponde al uso refrigeración. Aire acondicionado corresponde al uso climatización. Lavadoras corresponde a una fracción del uso "otros usos eléctricos".	Eficiencia de los usos correspondientes a los artefactos con MEPS.	En el caso que un equipo corresponda a una fracción de un uso, este será estimado con la mejor información disponible.
	Certificación y fijar MEPS para artefactos a leña	MEPS para artefactos a leña	MEPS en calefactores a leña	Residencial	Bottom up desde el consumo por uso de energía, considerando tasas de recambio de acuerdo a vida útil y crecimiento de la demanda.	Eficiencia del uso calefacción con combustible leña en sector residencial.	
	Ampliar el etiquetado de Eficiencia Energética	Etiquetado para distintos equipos	Etiquetado de refrigeradores comerciales Etiquetado de	Residencial	Bottom up desde las proyecciones del consumo eléctrico por uso, considerando tasas de recambio de acuerdo a vida útil y	Eficiencia de usos correspondientes a los artefactos afectos a	Los equipos considerados son aquellos que aún no cuentan con etiquetado

			lavadoras		crecimiento de la demanda. Se asume tasas de compra en base a estudios de comportamiento internacionales con curvas de penetración.	etiquetado.	
	Programa de eficiencia energética en edificios públicos	Diversas medidas de eficiencia energética en edificios públicos	Mejora de eficiencia general en sector público	Público	Bottom up fijando ahorros de acuerdo a información levantada por la AChEE en usos principales de edificios públicos: iluminación, ACS, etc.	Eficiencias de los usos afectados por las medidas de EE.	Se solicitarán datos a la AChEE de la información existente de auditorías en edificios públicos (no-hospitales)

	Programas PAEE20	Como se entiende de la definición	Programa a modelar	Subsectores	Principales supuestos de modelación	Variables desde el modelo	Comentarios
Comercial, Residencial y Público	Programa de eficiencia energética	Diversas medidas de eficiencia energética en hospitales	Mejora de eficiencia en hospitales	Público en hospitales	Bottom up fijando ahorros de acuerdo a información levantada por la AChEE en usos principales	Eficiencias de los usos afectados por las medidas de EE.	Se solicitaron datos a la AChEE de la información existente de auditorías en hospitales

	edificio públicos : Hospitales	públicos	públicos		de hospitales públicos: iluminación, ACS, calefacción, etc.		
	Calefactores solares para ACS	Instalación de colectores solares en techos.	Instalación de una cantidad de m2 definida de colectores solares en techos de viviendas.	Residencial	Bottom up fijando la cantidad de colectores (m2) que se instalarán por año. Fijación de nivel de eficiencia de los colectores a instalar. Niveles de radiación por región para estimar ahorro y identificar regiones donde no sea costoeffectivo.	Consumo unitario por combustible para el uso ACS en las regiones consideradas.	
	Ley EE: Desacople	Medida de la Ley de Eficiencia Energética. Desacoplar las utilidades de las distribuidoras de la venta de energía.	Medidas varias que dependerán de las metas y de la distribuidora.	Residencial	Top down fijando meta (1-2% anual) considerando que las distribuidoras sólo puedan efectuar medidas de ahorro en consumo de electricidad. Los ahorros se distribuirán en los distintos usos según las curvas de conservación de energía para el sector residencial.	Eficiencia de los usos eléctricos en el sector residencial.	

	Programas PAEE20	Como se entiende de la definición	Programa a modelar	Subsectores	Principales supuestos de modelación	Variables desde el modelo	Comentarios
--	------------------	-----------------------------------	--------------------	-------------	-------------------------------------	---------------------------	-------------

Transporte	Programa de conducción eficiente conductores particulares	Inclusión de contenidos de conducción eficiente en obtención de licencia de conducir	Disminución de consumo de vehículos particulares por manejo más eficiente tras capacitación al renovar licencia	Vehículos particulares (podría ser todos)	Bottom up desde la cantidad de conductores que renuevan licencia todos los años (cada 6 años). Cada año 1/6 del total de nivel de actividad se ve afectada por la mejora en eficiencia. El 89% de los capacitados mejoran su eficiencia al conducir en un 7,5% (datos a revisar) Se asume que la capacitación tiene un efecto temporal de un año.	Eficiencia promedio del parque	Si se plantea como capacitación al renovar licencia, puede afectar a todos los vehículos carreteros.
	Programa de conducción eficiente conductores vehículos de carga	Inclusión de contenidos de conducción eficiente en obtención de licencia de conducir	Disminución de consumo de vehículos de camiones por manejo más eficiente luego de capacitaciones.	Camiones	Bottom up desde la cantidad de conductores que renuevan licencia todos los años (cada 6 años). Cada año 1/6 del total de nivel de actividad se ve afectada por la mejora en eficiencia. El 89% de los capacitados mejoran su eficiencia al conducir en un 7,5%. Se asume que la capacitación tiene un efecto temporal.	Eficiencia promedio del parque	Esta media se plantea como una medida temporal enfocada específicamente a vehículos de carga. El programa se plantea como capacitaciones temporales mientras se comienza a aplicar el programa de conducción eficiente al renovar licencia.
	Programa de kits aerodinámicos para vehículos de carga	Incorporación de mejoras aerodinámicas a vehículos de carga existentes.	Mejora de eficiencia en cierto número de camiones	Camiones	Bottom up desde la cantidad de camiones a intervenir anualmente. Supuesto de ahorro por camión intervenido de acuerdo a estudios anteriores.	Eficiencia promedio del parque	Se debe conocer a cuantos camiones se podrá beneficiar al año.
	Ley EE: transporte	Media parte de la Ley de Eficiencia Energética. Establece un valor mínimo de eficiencia	Mejora del estándar de eficiencia del	Vehículos particulares	Bottom up desde el aumento anual del parque de vehículos livianos. Se asume que el parque crece de manera proporcional al aumento de actividad del	Eficiencia promedio del parque nuevo.	El aumento del parque se estima en base al crecimiento de la actividad del parque y a la variación de la tasa de

		para el promedio de los vehículos vendidos por fabricante.	nuevo parque.		mismo.		ocupación.
	Incentivar el cambio hacia transporte más eficiente	Promoción del uso de transporte público y bicicletas	Cambio de modo de transporte de un porcentaje de la actividad	Vehículos particulares	Bottom up desde un porcentaje de los viajes del modo "vehículos particulares", los que se cambian a la intensidad del modo "buses urbanos" y otros a intensidad cero (bicicleta). No hay cambios en niveles de ocupación de vehículos particulares ni de buses urbanos.	Partición modal en modos del transporte urbano de pasajeros.	El porcentaje de los viajes que cambian de modo dependerá del nivel de esfuerzo de la política.

PUNTOS PENDIENTES, RECOMENDACIONES Y MEJORAS

El modelo desarrollado para el Ministerio de Energía es una herramienta robusta de análisis de escenarios prospectivos que permite modelar con detalle los consumos de los sectores de demanda final, con caracterización detallada de las alternativas tecnológicas, y amigable para el usuario. La herramienta es transparente: todos los supuestos de modelación son explícitos. En particular, las planillas de entrada de datos son además una base auto-contenida en sus cálculos, desarrollos, supuestos e interacción con la herramienta. En este mismo sentido, queda claro cuáles son los parámetros que deben actualizarse cada año en esta misma base, sus fuentes y que permitirá actualizar el año a año los resultados.

Este modelo presenta avances importantes respecto de modelaciones anteriores:

- Se construye modelo altamente detallado para todos los sectores de demanda final en una herramienta única.
- La herramienta extiende las capacidades del software LEAP para hacer directa la construcción de escenarios a partir de planillas de entrada comunicadas en una interfaz sencilla y amigable.
- Se crea un manual virtual, de tipo “help”, que hace directa e intuitiva las consultas, de uso del modelo y metodológicas, según su interés y conocimiento de la herramienta.
- Un avance fundamental es que los impactos de la eficiencia energética resulten del modelo, y por tanto de los cambios en parámetros relevantes que caracterizan los consumos. No se descuentan ahorros exógenos ya que esta usual práctica no contribuye al análisis de efectividad y costo-efectividad de las medidas.
- El modelo caracteriza además la oferta de generación con cierto detalle, expandiendo la capacidad mediante métodos de optimización y considerando la interconexión SIC-SING. La modelación es uninodal (producto adicional respecto de las bases).
- El modelo incluye la refinación e importación de energético y se cierra el balance (producto adicional respecto de las bases).
- La modelación se realiza a nivel regional para los sectores de demanda final, a nivel de sistema eléctrico para la generación y nacional para cerrar el balance.

A pesar de estos avances importantes hay puntos pendientes y mejoras potenciales a considerar.

1) **Actualización de antecedentes**

Mejoras inmediatas se refieren a la revisión y actualización de algunos antecedentes disponibles:

- Sector Cobre: el modelo podría mejorarse mucho en este sector de contar con los datos con los que Cochilco caracteriza sus consumos y construye proyecciones. En particular, información de leyes, producción por tipo de producto a nivel regional, características del consumo a nivel regional, entre otras. Esta mejora es muy relevante pues es relativamente sencilla de llevar a cabo.

Sin embargo, requiere de la colaboración de Cochilco de cuyos informes y antecedentes es imposible replicar sus antecedentes de producción y consumo a nivel regional. Con toda información puede actualizarse el modelo en dos meses.

- Sector transporte: se propone actualizar las estimaciones de niveles de actividad (PKM, TKM) en base a los últimos antecedentes disponibles como también las modelaciones de partición modal en base a las más recientes encuestas de origen destino. Esta actualización requeriría más tiempo y esfuerzos considerables de modelación. Sin embargo, y contando con toda la información, sería posible obtener resultados actualizados en 3 o 4 meses. Para esta labor es crucial contar con el apoyo explícito de SECTRA para poder construir y validar los antecedentes. En el anexo adjunto se explica cómo se construyen las series de PKM y TKM necesarias para tal actualización.
- Chequeo de proyección de drivers con especialistas. Tal como se hizo en MAPS, se llevaron a cabo entrevistas con actores clave de sectores industriales y mineros para chequear expectativas más razonables de su evolución según condiciones económicas del país e internacionales. Este proceso no debiera tardar más de uno o dos meses.
- Ajuste fino de la herramienta. Con el modelo definitivo se deben analizar distintos escenarios y realizar un análisis crítico de los resultados que permitan afinar y ajustar las estimaciones. Este tipo de ajustes suele ser necesario en modelaciones tan complejas e intensivas en información.

2) Consolidación metodológica con otros organismos públicos

Un aspecto crucial es recibir el apoyo de otros organismos públicos (además en la cooperación con la información). En particular, y para entender bien por qué difieren los resultados entre el BNE y Cochilco, o BNE y Sectra. Este punto es crucial para tomar las decisiones de modelación que mejor reflejen el objetivo y políticas del Estado. Así se encuentra explicación, por ejemplo, a las diferencias en los consumos de fósiles del sector cobre o se resuelven las dudas del transporte de cabotaje. En este sentido, y para estos dos puntos, es deseable contar con el apoyo especialmente de Cochilco y Sectra.

3) Análisis de incertidumbre.

Se propone como mejora futura analizar formalmente la incertidumbre en las salidas de la herramienta. La incertidumbre afecta un 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 mismo¹. En un análisis de incertidumbre a través de una simulación es una alternativa mucho más realista para tratar la incertidumbre que el tradicional análisis de sensibilidad.

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

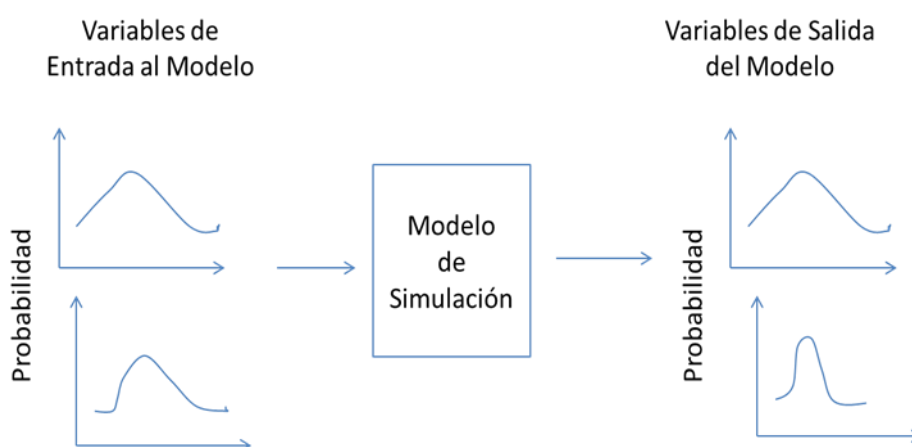


Figura 5: Modelos de Simulación

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 crítico².

¹ 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.

² También permite realizar inferencia formal. Estimación de media, varianza, ajuste de una distribución, entre otros.

Los modelos de prospección energética son inherentemente inciertos. Se propone entonces estudiar el impacto de distintas fuentes de incertidumbre y variabilidad de las modelaciones de la herramienta. Solo por nombrar algunas fuentes de incertidumbre incluyen:

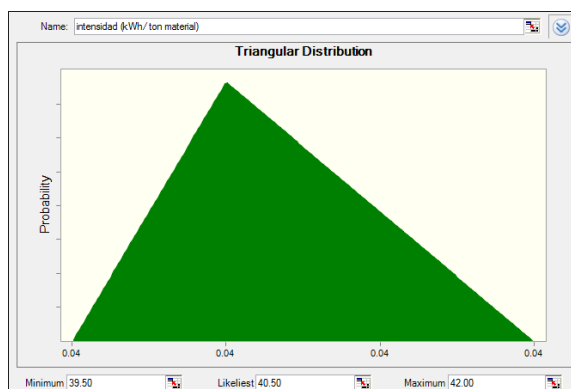
- Tecnológicas: mejoras de eficiencia energéticas autónomas por progreso técnico, innovación; adopción de tecnologías, parámetros críticos (intensidad de consumo, rendimientos, factores de emisión de contaminantes locales y globales).
- Económicas: precios de los commodities y de capital energético, elasticidades de sustitución, crecimiento económico, niveles de producción, niveles de actividades y drivers (por ejemplo, en transporte derivadas de los resultados de modelos econométricos)
- Variabilidad de recursos naturales. Hidrología, viento.

Sólo para ilustrar el tipo de análisis se desarrolló un ejercicio ilustrativo para el caso del cobre. Se insiste en que el ejercicio no corresponde a un análisis acabado y las distribuciones son arbitrarias y definidas por motivos ilustrativos. Por lo tanto, este ejemplo no entrega antecedentes más que ilustrar las capacidades de la simulación.

Asumimos la siguiente relación para predecir el consumo de electricidad (E) donde I representa la intensidad por material procesado (MP), q la producción de cobre en toneladas métricas final y l la ley del mineral.

$$E = I \cdot MP = I \cdot \frac{q}{l}$$

Suponemos que las variables intensidad, ley y producción de cobre son inciertas y tienen las siguientes distribuciones:



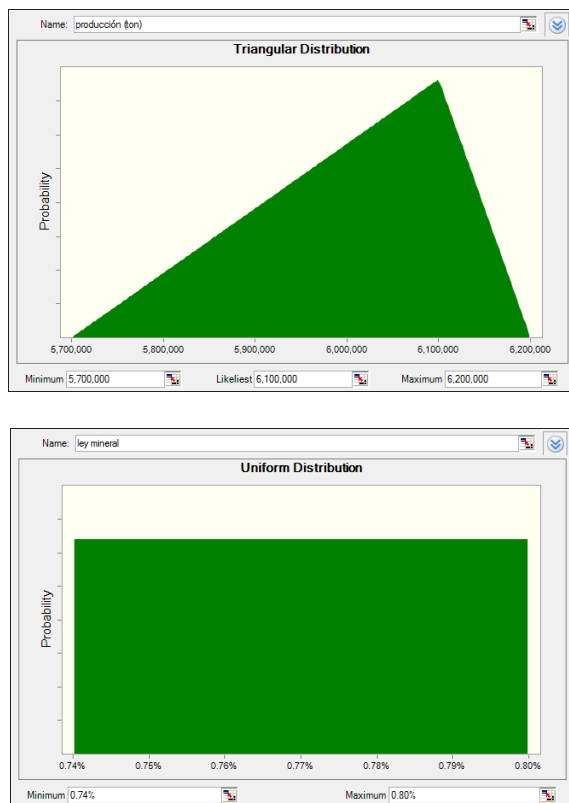


Figura 6 Supuestos de distribución

Fuente: Elaboración Propia

Este simple ejercicio permite entregar una distribución del consumo, en vez de un valor determinístico como se presenta en la figura siguiente.

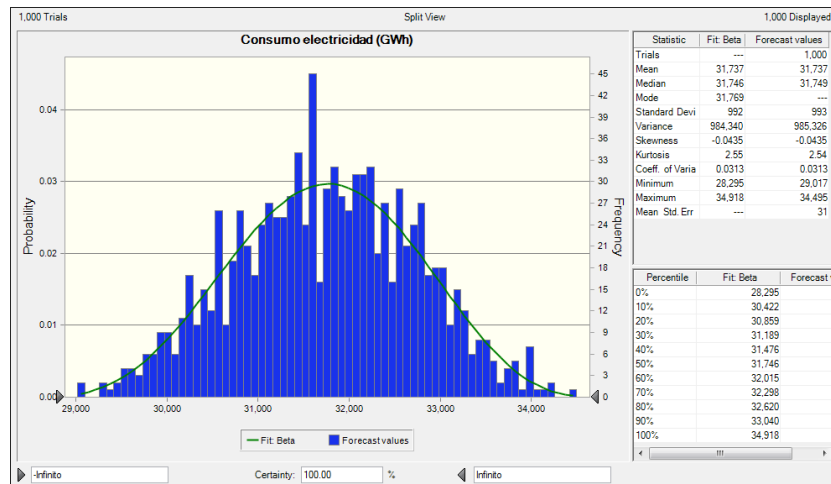


Figura 7 Distribución de consumo de electricidad

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se aprecia que en este ejercicio la ley de minera resulta ser el factor que más incide en la varianza del consumo resultante. En este caso, el valor es negativo porque de aumentar la ley, se reduce el consumo. Por el contrario, al aumentar la intensidad o la producción aumenta el consumo. Este análisis es de enorme utilidad en las decisiones de política y en la focalización de recursos.

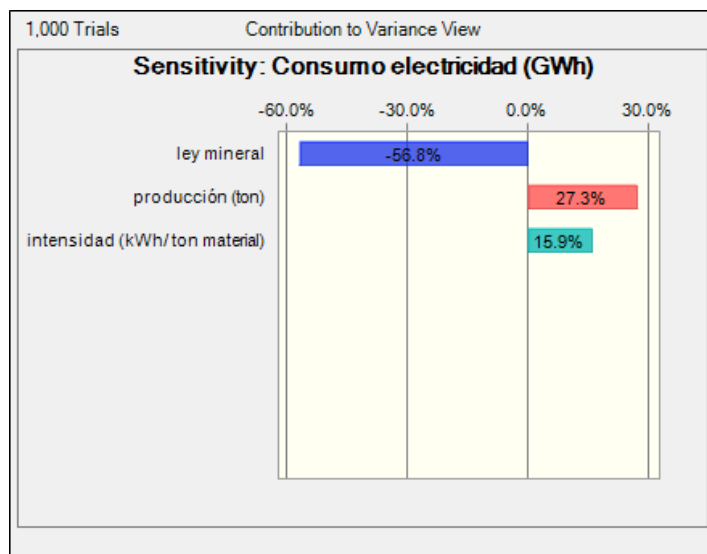


Figura 8 Contribución a la varianza en el consumo de electricidad

Fuente: Elaboración Propia

El análisis debe considerar de la incertidumbre asociada a las relaciones definidas en la modelación y de parámetros de entrada relevantes. Esta propuesta necesariamente debe ser compatible con su implementación en LEAP y se presentará la estrategia concreta para tales avances de la herramienta. En particular, se debe determinar cuáles serán las variables sujetas a incertidumbre, cómo se caracteriza ésta y luego cómo se propaga la incertidumbre en el modelo.

4) Profundización de variables económicas

Una mejora más de largo aliento es complementar el LEAP con otro modelo (existente o de propio desarrollo tipo MARKAL o MESSAGE)³, o incluso de alguna metodología de equilibrio general. A pesar de importantes diferencias, el espíritu de la primera alternativa es suministrar la demanda exógena de

³ Se hace esta propuesta porque va en la línea de desarrollos existentes. Por ejemplo, es factible hacer a MAED, un modelo de demanda por usos tipo LEAP, conversar con MESSAGE para obtener el suministro a mínimo costo.

energía útil a mínimo costo. Este análisis resuelve la composición de los consumos por uso incluyendo nuevas tecnologías. En términos normativos, permite analizar hacer formalmente “backcasting”⁴.

Modelos importantes de la experiencia internacional combinan (de distintas formas) enfoques de uso final y “top down” con el propósito de contar con fundamentos económicos robustos y también caracterización detallada de los sistemas de energía. El primer paso suele ser la inclusión de la minimización de costos de suministro (con precios exógenos) para luego incorporar un modelo de equilibrio que permita realizar consideraciones macroeconómicas del nivel de actividad agregada, sectorial y encuentre precios relativos.

⁴ Otra extensión es analizar un modelo macro que permita estudiar la pérdida de PIB producto de cambios en el sistema energético.

BIBLIOGRAFÍA

- **Impactos de la Agenda de Energía.** Ministerio de Energía. 2014.
- **Informe de precio nudo. Octubre 2014-** Ministerio de energía
- **Informe Final de Generación Eléctrica MAPS Fase 2, 2014** PNUD 2014.
- **Informe Final de Industria y Minería MAPS Fase 2, 2014** PNUD 2014.
- **Informe Final de CPR MAPS Fase 2, 2014** PNUD 2014.
- **Informe Final de Transporte Fase 2, 2014** PNUD 2014.
- **Informe Final de Generación Eléctrica MAPS Fase 1, 2013** PNUD 2013.
- **Copper: Long Term Outlook - 2012 Edition.** CRU 2012
- **Estudio de Demanda Energética para el sector industrial manufacturero y minero de Chile,** Departamento de economía, Universidad de Chile, 2012.

Anexo 1: REVISIÓN DE ANTECEDENTES MODELACIÓN

El uso de modelos se explica por el deseo de lograr reflejar sistemas complejos de manera simple y comprensible. Por otra parte, los modelos contribuyen a organizar una gran cantidad de información existente, y brindan un marco consistente para evaluar distintas hipótesis. Un gran número de modelos se han desarrollado para llevar a cabo análisis de sistemas energéticos y construir escenarios. Estos modelos se basan en enfoques distintos y utilizan una amplia gama de herramientas matemáticas.

CLASIFICACIÓN DE MODELOS ENERGÉTICOS

Existen diversas formas de clasificar modelos energéticos. A continuación, se presenta un cuadro resumen con las características principales de cada modelo, su ámbito de aplicación, así como también las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 4 Resumen de Enfoques de Modelos

Metodologías	Horizonte Típico de Aplicación	Nivel de Agregación	Principio de Metodología	Ventajas/ Desventajas	Modelamiento Energético	Ejemplos de Estudios Utilizados
Modelos Econométricos (Se incluyen modelos de series de tiempo y otros como los de curva logística)	Corto y Mediano Plazo (no responde a cambios estructurales)	Bottom up/ Top down	Métodos estadísticos	Ventajas: Simplicidad y facilidad de aplicación. Desventajas: Requerimientos de conjuntos consistentes de datos e incapacidad de incorporar cambios estructurales (como nuevas políticas, incorporación de tecnologías, innovación, cambios en preferencias).	Modelos de demanda, curva de demanda y consumos y modelos de oferta energética (matriz primaria), basados en información estadística y econometría.	Proyecciones de actividad de transporte, producción industrial, CPR, en MAPS fases I y II.
Modelos de Uso Final/ Contabilidad	Mediano y largo Plazo	Bottom up	Foco en servicios que usan energía y luego en características tecnológicas que brindan los servicios energéticos.	Ventajas: Se incorporan fácilmente cambios tecnológicos anticipados. Desventajas: Requiere muchos detalle en información de uso final y no representa comportamiento de agentes.	Modelos de demanda, y sistemas de consumos.	Modelos CPR y Usos energéticos industriales MAPS I y II

Metodologías	Horizonte Típico de Aplicación	Nivel de Agregación	Principio de Metodología	Ventajas/ Desventajas	Modelamiento Energético	Ejemplos Estudios Utilizados	de
Optimización	Mediano y largo Plazo	Bottom up	Típicamente problema de optimización lineal restringida. Oferta debe satisfacer demanda energética exógena. Problema dual entrega valores de energéticos.	Ventajas: Especialmente útil cuando hay varias opciones tecnológicas. Consistente con análisis de backcasting ⁵ . Desventajas: Supuestos de competencia perfecta, no simula comportamiento real de sistemas, modelos complejos y dato- intensivos.	Modelos de Oferta y de cadena de suministro a mínimo costo.	Modelos de Simulación de la Expansión de la Generación Eléctrica en MAPS I y II	

⁵ El denominado “backcasting” es un método de proyección basado en la suposición del éxito de un objetivo predeterminado. El análisis consiste entonces en verificar la validez de dicho supuesto basándose en las condiciones actuales y el proceso necesario. Este tipo de metodologías se emplea en la Hoja de Ruta del Comité Consultivo de la Política Energética.

Metodologías	Horizonte Típico de Aplicación	Nivel de Agregación	Principio de Metodología	Ventajas/ Desventajas	Modelamiento Energético	Ejemplos Estudios Utilizados	de
Equilibrio Parcial y Simulación	Corto, Mediano y largo Plazo	Bottom up	Simula comportamiento de productores y consumidores ante señales (precios, ingresos, políticas). Típicamente usa enfoque iterativo para encontrar equilibrio de mercado. Precios de energía son endógenos. Existen versiones dinámicas y estáticas.	Ventajas: No están limitados por supuestos de "comportamiento" óptimo y no asume que la energía es el único factor que afecta la decisión tecnológica. Desventajas: Complejos y dato intensivos, Relaciones de comportamiento pueden ser controversiales y es de difícil parametrización.	Modelos de Simulación de impactos económicos, sociales y sus derivados tales como impactos energéticos o medioambientales.	Estudio de evaluación del impacto de la liberalización comercial entre Chile y EEUU	

Metodologías	Horizonte Típico de Aplicación	Nivel de Agregación	Principio de Metodología	Ventajas/ Desventajas	Modelamiento Energético	Ejemplos Estudios Utilizados
Modelos de Equilibrio General Computable (EGC)	Mediano Plazo	Top Down	Los modelos de EGC intentan representar la respuesta macroeconómica real a políticas, como la sustituibilidad de la energía por otros insumos de bienes de consumo. Existen versiones dinámicas y estáticas.	Ventajas: resulta del comportamiento optimizante y la interacción de los distintos agentes: consumidores, productores, Estado y resto del mundo. Desventajas: este tipo de modelos carecen de la flexibilidad tecnológica que ofrecen otro tipo de modelos. Se asocian a niveles de agregación tecnológicos altos.	Modelos de Simulación de impactos económicos, sociales y sus derivados tales como impactos energéticos o medioambientales.	Modelo MEMO II utilizado en la segunda fase de MAPS para reajustar los resultados sectoriales del modelo nacional.

Metodologías	Horizonte Típico de Aplicación	Nivel de Agregación	Principio de Metodología	Ventajas/ Desventajas	Modelamiento Energético	Ejemplos Estudios Utilizados
Modelos de Desarrollo Reciente	Corto, Mediano y Largo Plazo	Bottom up	Son modelos asociados al desconocimiento del modelo de proceso, típicamente se emplean redes neuronales, sistemas expertos o sistemas fuzzy. Se realiza el entrenamiento (redes neuronales) o etiquetado (fuzzy) a través de datos. La calidad y vigencia de los datos es crucial para el buen funcionamiento de este tipo de modelos	Ventajas: presentan buen desempeño en condiciones generales. Desventajas: no responden a cambios estructurales o tecnológicos. Su estabilidad y observabilidad no está asegurada.	Modelos de Sistema Energético	Recientemente se utilizó modelos de este tipo en la tesis “Método Para la Generación de Perfiles de Demanda en Comunidades Aisladas y Predicción de Demanda de Corto Plazo, para Micro-Redes Basadas en Energías Renovables” ⁶ .

Fuente: Elaboración Propia

⁶ http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-llanos_jp/pdfAmont/cf-llanos_jp.pdf

Enlazando este objetivo final con la tabla anterior, el enfoque de modelación que se desea realizar debe tener en consideración los siguientes aspectos:

- Los modelos de equilibrio de oferta y demanda (parcial y general), si bien entregan precios y relacionan el comportamiento óptimo de agentes, suelen trabajar con una metodología “top down”, con lo cual pierden el detalle en cuanto a las tecnologías y los usos finales energéticos que se asignan a cada una de ellas, lo cual se aleja del objetivo del modelo para el presente estudio. No permite caracterización de consumos por usos ni detalle tecnológico compatible con análisis de eficiencia energética.
- Los modelos de optimización (tales como TIMES/MARKAL o MESSAGE), si bien pueden caracterizar los usos finales de la energía y su evolución tecnológica, deben trabajar ciertos parámetros tales como la demanda energética de forma exógena, estimando un mínimo costo de suministro sujeto a restricciones.

En base a estos puntos, se considera necesario para caracterizar el consumo energético, y de este modo, cumplir los requisitos de la presente consultoría, la utilización de modelos de uso final ("accountancy models"). Estos modelos permiten realizar una modificación directa y transparente para el usuario respecto a los diferentes usos energéticos por cada sector de la economía, los combustibles asociados, así como también caracterizar en forma directa la eficiencia energética de cada uno de los usos, es decir, una modelación “bottom up” que sea compatible con la evaluación de programas de eficiencia energética.

HERRAMIENTAS DE CONSUMO ENERGÉTICO

La modelación propuesta corresponde a un modelo de uso final pero con numerosas componentes de otros enfoques. En particular, varios sectores de consumo final incluyen en la definición de la actividad relaciones econométricas que se conjugan con la caracterización tecnológica de uso para la obtención de la intensidad. Análogamente, el análisis econométrico puede entregar luces respecto de tendencias respecto de penetración de tecnologías, entre otros. Análisis econométricos entregan también elasticidades precio y cruzadas de combustibles, permitiendo que éstos puedan competir en el tiempo en el reemplazo de cada uno de los usos. Este fue desarrollado para la elasticidad de combustibles en el sector industrial en el estudio (Benavente, 2012), y fueron utilizadas exógenamente en el sector I&M de MAPS fase II.

En este contexto, el proyecto contempla también para la última etapa una hoja de ruta crítica de mejoras. En principio, se analizará con mayor detalle (a nivel de supuestos, ecuaciones, etc.) al menos los modelos MARKAL (y su versión posterior TIMES) y MESSAGE de manera de buscar cómo relacionar las demandas de energía útil entregadas por la herramienta a desarrollar con LEAP con la configuración de equilibrio del sistema y/o de mínimo costo. La versión más simple de MARKAL toma precios dados, mientras que en TIMES estos se obtienen de la maximización del excedente total (de productores y

consumidores). Por otra parte, se examinará la inclusión de restricciones tecnológicas (por ejemplo cuotas de ERNC), o bien, de metas de emisiones de gases efecto invernadero, entre otras. El desarrollo de la herramienta en LEAP y la revisión detallada de estos modelos permitirá entregar una recomendación más concreta respecto del alcance de esta interacción para una etapa futura.

En este informe, se presenta una primera revisión de los modelos existentes para proyectar la demanda de energía en el largo plazo, y que serán analizados en el presente punto. Estas herramientas son las siguientes (en orden alfabético):

- ENPEP-BALANCE / MAED
- LEAP
- MAED/MEDEE
- MARKAL/TIMES
- MESSAGE
- Ms Excel
- POLES

ENPEP/BALANCE/MAED

ENPEP es un conjunto de herramientas de análisis energéticas, ambientales y económicas integradas, mediante las cuales realiza un análisis macroeconómico, desarrolla estimaciones de demanda de energía y sobre esta base se realiza análisis conjunto de oferta y demanda para todo el sistema energético. Se evalúa en detalle el sistema eléctrico y se determina efectos de configuraciones alternativas.

Es un programa sin costo para organizaciones gubernamentales, de investigación y organizaciones sin fines de lucro.

El foco energético está en 2 herramientas de ENPEP-BALANCE y MAED. ENPEP-BALANCE es un modelo de simulación basado en el mercado, que determina cómo varios segmentos del sistema de energía pueden responder a cambios en la demanda y precios de energía. MAED es un sistema de ecuaciones simultáneas, lineales y no lineales que especifican la cantidad de transformación de energía y precios a través de varios escenarios de producción y usos de energía. Este modelo también calcula emisiones gases efecto invernadero (GEI). Junto con BALANCE y MAED, ENPEP posee otros ocho módulos que lo conforman.

Dentro de sus limitaciones, el modelo ENPEP analiza planificación de sistemas desde el punto de vista del mínimo costo, lo cual no necesariamente refleja la realidad. La operación del programa requiere importantes conocimientos de optimización. Adicionalmente, es muy intensivo en datos.

LEAP

LEAP es una herramienta de las más utilizadas en el mundo, con cientos de usuarios en más de 140 países. Es un modelo de energía asociado a un año base y en dónde se construyen escenarios posibles, basados en contabilidad de flujos energéticos y simulación de modelos. LEAP tiene un manejo de datos flexible e intuitivo. Su ámbito de operación incluye: demanda, generación de electricidad, emisiones GHG, análisis de costo-beneficio social entre otros.

Es un programa sin costo para estudiantes, organizaciones gubernamentales, de investigación y organizaciones sin fines de lucro en países en desarrollo. Para académicos y consultores los precios varían entre US\$1.500 y \$3.500, dependiendo de la cantidad de usuarios y el tiempo de vigencia de dicha licencia.

LEAP ha sido utilizado en:

- Estudios de reducción de gases efecto invernadero en: Argentina, Bolivia, Ecuador, Korea, Tanzania, Senegal.
- USA. Estudios de reducción de GHG en California, Washington, Oregon y Rhode Island.
- APERC Energy Outlook: Pronóstico de Demanda de Energía en Economías de la APEC.
- Proyectos Energéticos Asia del Este: Estudio de Seguridad Energética en Asia del Este.
- NDRC Energy Research Institute (ERI), INET and SHESRI
- ERI: Sustainable Energy Development Scenarios in China
- INET: China's energy system under future Northeast Asia cooperation scenario

LEAP es un modelo basado en la construcción de escenarios. Esta se realiza de manera tal que los escenarios facilitan la realización de cálculos de ofertas y demandas energéticas, y la evaluación de alternativas tecnológicas y de política. El usuario define variables clave (como kilómetros recorridos por parte de vehículos y rendimientos de combustible) a partir de los cuales el LEAP construye escenarios de demanda. Un conjunto de “transformaciones” caracterizan los procesos de conversión y se relacionan a la demanda para entregar resultados en términos de emisiones y consumo de recursos. Opciones tecnológicas y de política pueden ser estudiadas en la medida que alteren variables claves, escenarios de demanda o transformaciones.

LEAP puede utilizarse para proyectar la situación de oferta y demanda energética de manera de entrever pautas futuras, identificar problemas potenciales, y evaluar los posibles impactos de políticas energéticas. LEAP puede ayudar a examinar una amplia gama de proyectos, programas, tecnologías y otras iniciativas energéticas, y a encontrar estrategias que permitan resolver problemas ambientales y energéticos.

El concepto de análisis de escenarios constituye el núcleo de LEAP. Los escenarios son proyecciones sistemáticas de la probable evolución futura de sistemas energéticos bajo un contexto socioeconómico particular y bajo un conjunto determinado de condiciones de política. En LEAP los escenarios se pueden

construir y luego comparar, para evaluar sus requerimientos energéticos, costos y beneficios sociales e impactos ambientales. Todos los escenarios comienzan a partir de un año base común, para el cual se establecen los datos de Año Base. Los escenarios de LEAP abarcan factores que pueden cambiar en el tiempo incluyendo aquellos que varían por intervenciones de políticas particulares.

Algunas de las importantes ventajas de LEAP son su flexibilidad y facilidad de uso, que permiten, al momento de tomar decisiones, pasar rápidamente del plano de las ideas al de análisis de políticas sin tener que recurrir a modelos más complejos. La modelación en LEAP, al igual que otros modelos de simulación, requiere de información demográfica y socioeconómica, tales como población e ingreso entre otros. En general, se analiza la demanda de diferentes sectores, subsectores y centros de transformación; se consideran variables de stock y se calcula efectos medioambientales y se evalúa costo-beneficio. Un esquema general del proceso de cálculo realizado por LEAP se presenta en la siguiente figura:

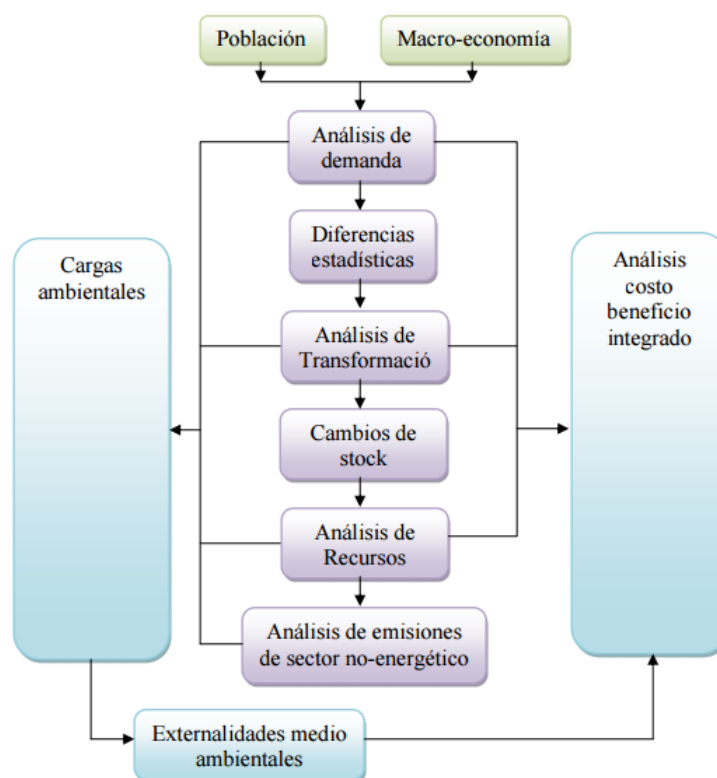


Figura 9 Proceso de cálculo del LEAP

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las limitaciones de LEAP, como toda herramienta en constante desarrollo, mejoras y ampliaciones de sus funciones, se encuentra en desarrollo relativamente reciente la posibilidad de modelar sistemas eléctricos y optimizar las futuras obras de construcción del parque instalado, optimizando la operación y costos de instalación del sistema. Debido a estos aspectos, es que como

nueva herramienta incipiente, posee aún algunas limitaciones generales tales como la modelación del sistema eléctrico de forma uninodal, o aspectos particulares del sistema eléctrico chileno, como es la modelación de la futura puesta en marcha de la interconexión SIC-SING, aunque para consultorías específicas se han desarrollado versiones especiales, tales como los estudios MAPS fase II, el estudio del Impacto de la Agenda Energética.

Así también, siguiendo con el caso eléctrico, LEAP no posee una herramienta de análisis de cuencas hidrológicas de forma directa, aunque sí posee integración directa con la herramienta WEAP del *Stockholm Environment Institute*, que permitela modelación y análisis hidrológico de cuencas y embalses.

MARKAL/TIMES

MARKAL (y su reciente evolución, TIMES), son modelos de equilibrio energéticos y económicos. Calcula las cantidades y precios de equilibrio que maximizan la utilidad y además minimizan los costos totales del sistema de energía. MARKAL/TIMES identifica soluciones a la planificación del sistema de energía al menor costo y evalúa opciones en el contexto del sistema de energía tales como el balance entre oferta y demanda y restricciones de política ambiental. Selecciona tecnologías basado en los costos de las alternativas.

El costo del programa varía entre US\$3.000 y \$5.000 para una licencia académica, y US\$20.000 por una licencia comercial.

MARKAL/TIMES calcula las cantidades y precios maximizando el excedente del productor/consumidor en el horizonte de planificación, por lo tanto, el costo total de energía del sistema. Además provee estimaciones de precios de energía, demanda, emisiones de GEI y tecnologías. En MARKAL/TIMES la demanda no responde a precios y es determinada exógenamente.

MARKAL-MACRO es una extensión del modelo MARKAL y resuelve simultáneamente los sistemas de energía y economía. MARKAL-MACRO es una mezcla entre modelos bottom-up y top-down. En este modelo la demanda responde a precios, es decir, la demanda es determinada endógenamente. El modelo MARKAL-MACRO maximiza el bienestar del consumidor, optimiza la inversión agregada y provee la configuración del sistema de menor costo. Precios de energía y costos de energía son determinados simultáneamente durante la optimización. Los costos relativos de la energía determinan el tipo y nivel de sustitución de portadores energéticos y tecnologías.

Entre las limitaciones que posee el modelo MARKAL/TIMES se encuentran que es un modelo estrictamente de sector energético y no establece relaciones con otros sectores de la economía. La demanda es provista exógenamente por esto no responde a precios y no posee determinación de variables económicas endógenas que puedan realimentar el modelo.

El modelo MARKAL-MACRO resuelve estos últimos inconvenientes, pero el modelo macroeconómico que incorpora es un modelo neoclásico y adopta una función de producción de elasticidad de sustitución constante (CES). El modelo resuelve para un consumidor representativo óptimo, donde todas las variables relevantes son agregadas.

MESSAGE

MESSAGE es un modelo de optimización de sistemas desarrollado por el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), en Austria, utilizado principalmente para planificación de sistemas energéticos de mediano a largo plazo, análisis de políticas de cambio climático, desarrollo tecnológico en diferentes regiones. En cuanto al horizonte temporal de simulación que permite el programa, éste se modela en períodos (quedando a decisión del usuario si éstos son años, quinquenios, decenios, etc.), pero se debe hacer el alcance que el hecho que el programa permita modelar sobre 20 períodos no asegura ni la estabilidad del modelo de optimización, ni mucho menos que éste llegue a la solución en un período de tiempo razonable (dependiendo esto último de muchos otros factores aparte de la cantidad de años simulados, que en total van dando complejidad al modelo). Por lo general, cuando se simula un sistema eléctrico como el chileno (SIC), no es recomendable proyectar más allá de 20 períodos. La generación térmica, renovable, así como las tecnologías de almacenamiento, conversión y transporte pueden ser simuladas por MESSAGE, así como también la explotación de carbón. Los requerimientos de información del modelo son altos, mientras que los requerimientos por el lado de la demanda se manejan de forma agregada. MESSAGE permite optimizar medidas de limitación y reducción de emisiones de GEI de forma costo eficiente.

Es un programa sin costo para organizaciones gubernamentales, de investigación y organizaciones sin fines de lucro.

MESSAGE ha sido ampliamente utilizado en los estudios realizados por IIASA, modelando la economía global y sus principales sectores (energía, agricultura, forestal), a través de un equilibrio macroeconómico así como herramientas de modelamiento de sistemas. MESSAGE también se ha utilizado para desarrollar el camino de transición energética global en el World Energy Council, escenarios de emisión de GAE para el Panel de Cambio Climático.

Cabe destacar que, si bien MESSAGE es un modelo de simulación amplio en usos energéticos, pudiendo hacer análisis con variados energéticos y en sistemas con varios nodos y etapas energéticas (primaria, secundaria), su foco de uso es principalmente la energía eléctrica, así como la optimización de la expansión de la matriz eléctrica. Además, si bien el programa permite modelar embalses, y de este modo, optimizar el costo de operación del sistema, su uso le agrega una alta complejidad a la optimización del modelo y a los tiempos de convergencia. Así también, el manejo de probabilidad hidrológica (años secos o lluviosos) no son parte del modelo.

MS EXCEL

Si bien, Microsoft Excel no es por sí mismo un modelo de simulación o proyección de la demanda energética, se ha agregado al presente listado (y su correspondiente análisis) debido principalmente a que es una herramienta matemática que permite a un usuario con el suficiente conocimiento, modelar una demanda energética con sus correspondientes usos, y a partir de estos resultados, simular el efecto que tendría, tanto en la demanda energética como en la oferta y el costo, la introducción de políticas de eficiencia energética y de reducción de emisiones de GEI.

La licencia de MS Excel se encuentra sujeta a la distribución de MS Office, la cual varía para su versión 2013 entre US\$140 y \$400, para sus versiones hogar y profesional, respectivamente.

Por lo tanto, el resultado final del modelo de simulación o proyección de la demanda energética, su alcance y complejidad dependerá directamente del nivel de conocimiento del grupo diseñador del mismo, entregando la flexibilidad para modelar el sistema energético con el nivel de detalle que se desee, así como también modelar una o más regiones de acuerdo a los requerimientos requeridos. De igual forma, pero no menor, la facilidad de uso, así como la utilización de una interfaz “amigable”, dependerá también del diseño entregado al modelo, por lo que un juicio de ventajas o desventajas a un modelo energético desarrollado en Excel dependerá en mayor parte a los resultados obtenidos directamente de cada modelo caso a caso, y no en generalidades.

En términos transversales, la utilización de Excel para el desarrollo de modelos energéticos, debido a que éste es intrínsecamente un programa de cálculo, puede significar una velocidad de procesamiento mayor, y por lo tanto, un menor tiempo en la obtención de los resultados requeridos. De igual modo, a diferencia de modelos de simulación preestablecidos, que simulan una serie de parámetros por defecto, sean utilizadas o no por el usuario, y por lo tanto, requerirán tiempo de procesamiento adicional, en el caso de un modelo realizado en Excel, este procesamiento será evitado con un modelo “hecho a la medida” de los requerimientos. Finalmente, en los casos que el modelo de simulación utilice mecanismos de optimización programados (Macros), será esta programación en la cual se indique el nivel de precisión con que desea los resultados (y por ende, el tiempo de procesamiento), a diferencia de los modelos energéticos comunes, que tienen preestablecidos estos parámetros.

Dentro de los problemas que podrían surgir de la utilización de un modelo de proyección de demanda energética basada en Excel, el principal será la cantidad de ecuaciones a ser utilizadas y el uso o no de mecanismos que requieran programación para la optimización. Todos estos aspectos son cubiertos por los programas estándares de simulación de demanda energética, lo que asegura en mayor medida que el procesamiento del modelo (y por ende, los resultados obtenidos) no tendrán errores de programación, ni en las ecuaciones que relacionen los distintos aspectos energéticos ingresados al modelo, lo cual es una vulnerabilidad que tendrá cualquier modelo generado en Excel. Sobre este mismo aspecto, se debe

considerar también que a mayor complejidad de un modelo, el nivel de ecuaciones (y por ende, la posibilidad de propagación de errores) crece exponencialmente, y por lo tanto, la posibilidad de detectar errores crece en la misma tasa, dificultando de este modo mejorar el modelo y obtener los resultados deseados del mismo.

En particular, el modelo a generar en la presente consultoría deberá ser un modelo que considere la demanda energética, los usos finales por cada sector, y la posibilidad de aplicación de medidas de eficiencia energética en cada uno de estos usos, por lo que se puede considerar que es un modelo con un nivel de detalle importante, y la cantidad de información y ecuaciones que relacionen todos los parámetros en una planilla de Excel puede terminar haciendo este modelo inmanejable.

POLES

POLES, por las siglas de (“Prospective Outlook on Long-term Energy Systems”), o visión prospectiva de largo plazo sobre sistemas de energía, es un modelo de simulación de energía que modela el estado del mundo completo. Es un modelo que combina la tecnología y la economía, considerando los precios de la energía de forma endógena, incluyendo además la oferta y demanda de varios sectores energéticos y sus tecnologías asociadas. También considera un módulo de cálculo de emisiones de GEI.

La licencia del programa no es gratuita, pero su costo debe negociarse directamente con la empresa desarrolladora (Enerdata), de acuerdo al uso requerido del modelo⁷.

El modelo trae incorporado un sistema completo de simulación y análisis completo del sector energético mundial hasta el año 2050. POLES es un modelo de simulación anual en forma recursiva, utilizando una combinación de ecuaciones que dependen de los precios, (que a su vez determinan el comportamiento de los agentes), de un sistema de gastos y rendimientos de un catálogo de tecnologías relacionadas con el aspecto energético. Al contrario de otros modelos energéticos, POLES maneja los precios internacionales de energía de forma endógena. Las principales variables exógenas requeridas por el modelo son el PIB, y la población de cada país o región. La estructura del modelo se basa en módulos interconectados relacionando tres niveles de análisis: mercados internacionales de energía, balances de energía regionales y la demanda nacional de energía, en la cual ya se consideran aspectos tales como la entrada de nuevas tecnologías, producción local de energía, generación de electricidad y emisiones de GEI por subsector.

El modelo POLES considera 57 regiones para modelar el mundo, de las cuales 45 de éstas corresponden a países, y 12 son grupos de países. A su vez, cada una de estas regiones posee un balance energético detallado, el cual contempla 13 subsectores de demanda energética.

⁷ <http://www.enerdata.net/enerdatauk/solutions/energy-models/poles-model.php>

Entre las desventajas del modelo, cabe señalar que, si bien, POLES puede modular cambios en el valor agregado por sector, y en redistribuciones de la actividad entre sectores, no es un modelo macroeconómico en el sentido que usa el PIB como una entrada exógena, no permitiendo una retroalimentación sobre este parámetro, que podría resultar de la evolución del sistema energético, impuestos al carbono, reducción en la producción de petróleo y su efecto en el transporte, o el crecimiento resultante de la innovación tecnológica. En resumen, no integra el efecto sobre la sociedad del cambio climático, aunque sí cuantifica su efecto sobre el sector energético, incluyendo las inversiones necesarias para el desarrollo de tecnologías con baja emisión.

REVISIÓN DE MODELOS MAPS

SECTOR COMERCIAL-PÚBLICO-RESIDENCIAL (CPR)

De acuerdo al balance de energía público del año 2013, el sector CPR es responsable del 16% del consumo total de energía, siendo un sector relevante a nivel nacional. De este porcentaje, el 80% corresponde al sector residencial que constituye, el principal demandante de energía, seguido por el sector comercial con un 16% y finalmente el sector público con un 4 % (BNE, 2013).

Cada uno de estos sectores posee características y drivers de desarrollo diferente, tanto en usos finales de energía como en la homogeneidad de las unidades básicas. Por ejemplo para el caso de los usos finales, en el sector residencial predomina la calefacción y el agua caliente sanitaria a diferencia del sector comercial donde la iluminación y la climatización son los principales consumos. En lo referido a la homogeneidad, el sector residencial es más semejante al no existir grandes diferencias en términos de consumo energético de las viviendas, a diferencia del sector comercial, el cual es mucho más heterogéneo en términos de tipologías y consumos. De esta forma, se estima adecuado separar la descripción, en 2 grupos relevantes del sector: Residencial y Comercial Público.

SECTOR RESIDENCIAL

De acuerdo a lo mencionado previamente, el subsector Residencial es el principal actor en términos de consumo energético primario. Está constituido al año 2011 por 5.581.876 viviendas a nivel nacional, de las cuales aproximadamente 2,2 millones se encuentran en la RM.

En términos de combustibles, la leña corresponde al combustible más utilizado, principalmente para calefacción, siendo responsable del 59% del consumo energético, seguido por gas licuado, electricidad y gas natural. En relación a los usos finales de la energía, la desagregación a nivel nacional se observa en la siguiente figura:

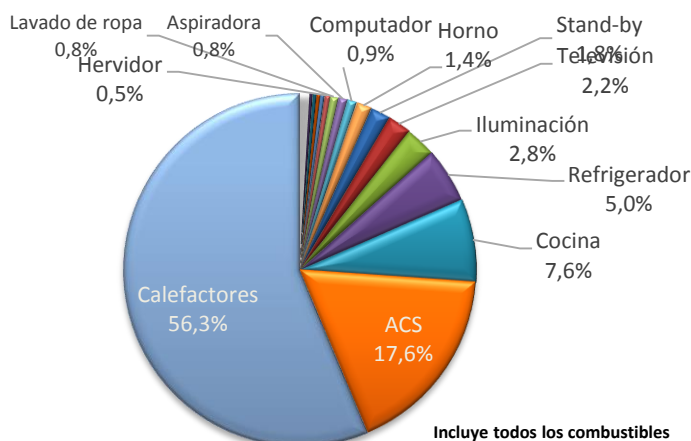


Figura 10: Distribución de consumos energéticos por uso final, en el subsector Residencial.
Fuente: (CDT, 2011).

Donde la calefacción corresponde al principal uso final seguido del agua caliente sanitaria. Es importante mencionar que los distintos climas a lo largo del país, provocan distintas proporciones de uso, pasando la calefacción de un 12% en la zona centro norte, a un 80,7% en la zona sur – austral de acuerdo al estudio “Curva de Conservación de la Energía del Sector Residencial”, Minenergía 2010.

COMERCIAL Y PÚBLICO

El subsector Comercial, de acuerdo al BNE 2012, corresponde al 17% del consumo energético total del sector CPR. De acuerdo a este mismo Balance, se puede apreciar que la electricidad es el principal combustible, seguido del diésel:

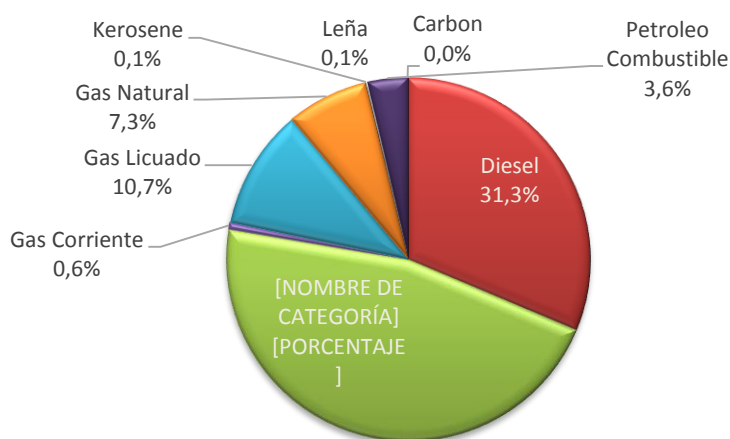


Figura 11: Distribución consumo eléctrico subsector Comercial, año 2012.
Fuente: BNE 2012.

Este sector se encuentra conformado por todo el comercio, que va desde oficinas, hasta hoteles y restaurantes, donde edificaciones que destacan en términos energéticos, y que han sido más estudiadas corresponden a supermercados, malls, clínicas, colegios, oficinas, hoteles y banca.

En términos de usos finales, en casi todas las edificaciones comerciales, los principales usos finales corresponden a iluminación y climatización. Este último es especialmente importante en oficinas, malls y hoteles, llegando a superar el 50% del consumo energético en el caso de malls.

En edificaciones de salud, la calefacción y el agua caliente sanitaria pasan a ser más relevantes, y en el caso de colegios, la iluminación es el principal consumo.

Lo anterior conlleva a que el principal combustible del sector sea la electricidad, y los potenciales ahorros están más relacionados a las eficiencias de los equipos que en el caso residencial.

Por otro lado, este sector ha mostrado un crecimiento en el consumo mucho mayor que el residencial, (ha crecido un 200% entre 1997 y 2012 a diferencia de un 25% que ha crecido el sector residencial de acuerdo a MAPS), y se espera aun siga incrementando su consumo a medida que aumenta la población y se densifican las ciudades.

En el caso del sub sector público, éste es responsable del 4,5% del consumo energético del sector CPR de acuerdo a BNE 2012. En forma análoga al sector comercial, el principal energético utilizado por este sector corresponde a la electricidad, como se observa en la siguiente figura:

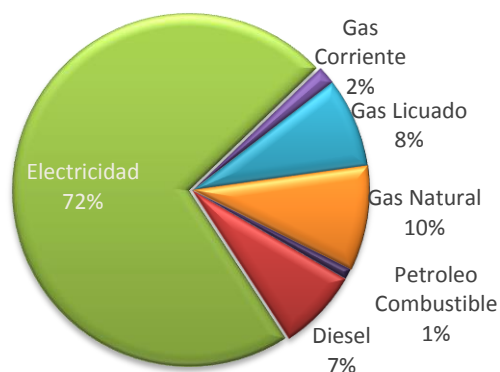


Figura 12: Distribución consumo eléctrico subsector Público, año 2012.
Fuente: BNE 2012.

En relación al tipo de edificaciones, aquí se encuentran las edificaciones de las instituciones públicas, como también de los servicios. De esta forma, se consideran hospitales, escuelas, universidades públicas, alumbrado, edificios de gobierno, municipios, etc.

El uso final de iluminación es especialmente importante en este sub sector, ya que está presente en todas las edificaciones con una alta presencia de consumo, y adicionalmente en el alumbrado público de todo el país, ya que corresponde al mayor gasto de los municipios.

En términos de tendencias, de acuerdo a MAPS, éste ha mantenido su crecimiento estable en los últimos años.

MODELAMIENTO DEL SECTOR CPR EN EL MARCO DEL PROYECTO MAPS

En el marco del proyecto MAPS, la proyección de consumos energéticos para cada uno de los subsectores (Comercial, Público y Residencial) fue realizada mediante un enfoque bottom-up. Es decir, a partir de una unidad definida (vivienda, comercio, etc), ésta fue caracterizada y proyectada. A través de este, se estimaron los consumos específicos de cada subsector para el año inicial, proyectando la unidad de análisis de cada uno de estos sectores y obteniendo así la estimación del consumo total. La principal razón para emplear este tipo de modelamiento, es que permite modelar de forma más precisa los efectos de medidas de eficiencia energética, regulaciones y otros drivers, al modificar su efecto en una unidad base. Sin embargo, se debe ser muy cuidadoso de estimar los impactos, con la mayor cantidad de información primaria, y considerar todas las interrelaciones que se producen (por ejemplo, tener información primaria respecto a los ahorros generados al aislar una vivienda), ya que errores en las estimaciones unitarias, se multiplican al expandir los resultados al total de viviendas.

Uno de los problemas que se aprecian en el marco del proyecto MAPS, fue la sustancial diferencia en la cantidad y calidad de información disponible para el sector comercial y público respecto al sector residencial. Este último cuenta con una mayor cantidad de información, y encuestas anuales⁸ que permiten tener mayor información desagregada del sector, y con una buena cobertura a nivel nacional. A diferencia de éste, el sector público y principalmente el sector comercial, sólo cuentan con estudios puntuales por tipos de comercios o edificios, pero no existe información agregada nacional ni registro disponible de comercios que permita caracterizar en forma más profunda a este sector, habiendo un mayor nivel de incertidumbre en éste.

De esta forma, el modelamiento de este sector, consideró una metodología distinta para el sector residencial que para el sector comercial y público, siendo el primero más complejo en término de cantidad de usos finales y combustibles utilizados, pero con una mayor cantidad de información disponible.

MODELAMIENTO SECTOR RESIDENCIAL

⁸ Existe información de tenencia de artefactos y de consumo de leña a través de la encuesta CASEN

En este caso, la unidad considerada fue la vivienda, ya que es la variable más dependiente del consumo energético, como resultado que el mayor consumo energético residencial corresponde a calefacción. Esta unidad fue desagregada en diversas subcategorías, de forma de estimar cuáles son las que presentan mayores diferencias respecto a consumo energético. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se analizaron las siguientes desagregaciones:

- a. **Zona térmica a la que pertenece la vivienda**: Debido a la amplia gama de latitudes que presenta la geografía chilena, existe una diversa cantidad de climas que van desde subtropicales, en el extremo norte, a climas muy fríos como los del extremo sur. Esto se realizó ya que el uso final de calefacción /climatización está directamente relacionado a las temperaturas exteriores. De esta forma, se categorizó en tres macro sectores (zona centro norte, zonas centro sur y zona austral)
- b. **Tipología constructiva de vivienda**: Se separó también las viviendas de acuerdo a su tipología constructiva en dos grupos: vivienda unifamiliar (aislada, pareada o en fila), y vivienda multifamiliares. Esto se llevó a cabo debido a las diferencias en demanda de calefacción que presenta cada una de éstas, y a las tendencias constructivas en sectores urbanos, donde existe una tendencia a viviendas multifamiliares.
- c. **Zona Urbana o Rural**: se separó de acuerdo a este criterio debido principalmente a los diferentes patrones de consumo de leña
- d. **Ubicación geográfica respecto al sistema interconectado (SIC o SING)**: se separó de acuerdo a este criterio de forma de obtener las demandas eléctricas para cada sistema por separado.

Finalmente, las estimaciones de emisiones fueron llevadas a cabo mediante la proyección de los usos finales, agrupados en las siguientes categorías. Esto permitió estimar los efectos que tienen medidas y regulaciones los que normalmente afectan a usos finales específicos (e.g etiquetado de artefactos o aislación térmica). Los usos finales agregados considerados fueron:

- Calefacción.
- Artefactos eléctricos.
- Agua caliente sanitaria y cocción.

Una vez caracterizado a $t=0$ las viviendas y sus distintas subcategorías, éstas fueron proyectadas, donde por un lado se proyectó el parque de viviendas, como también la evolución esperada de los usos finales en los próximos años. El diagrama de proyección se observa en la siguiente figura:

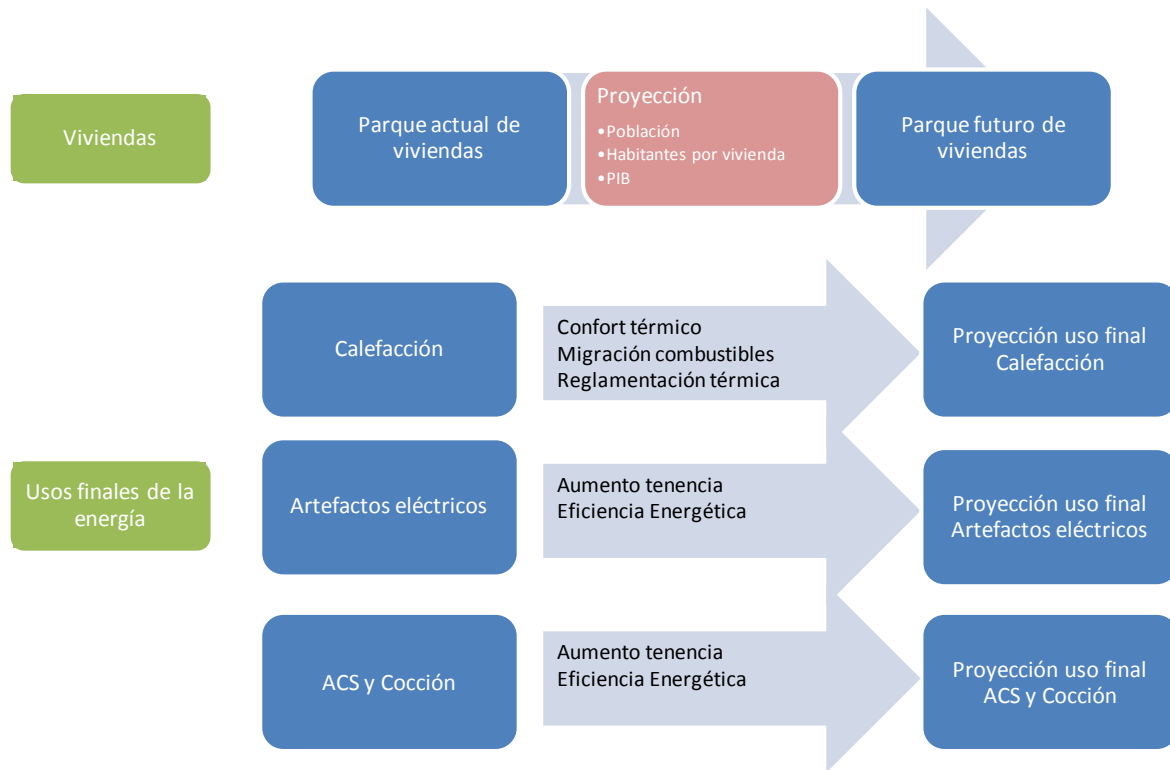


Figura 13: Modelo de Proyección sector Residencial de acuerdo a MAPS. Fuente: MAPS

En general, las fuentes utilizadas para la caracterización en $t=0$ son bastante precisas, basadas principalmente en encuestas e información estadística del sector. Para la proyección, por otro lado, el principal uso final que corresponde a calefacción, fue proyectado considerando el principio del alcance de confort térmico a medida que aumenta el ingreso per cápita de las viviendas. Los otros usos finales, usaron principalmente proyecciones basadas en aumento de tenencia de artefactos.

MODELAMIENTO DEL SECTOR COMERCIAL Y PÚBLICO

En este caso, como se ha señalado anteriormente, existe una menor cantidad de información, y el enfoque considerado para proyectar las edificaciones consistió en caracterizar y proyectar a unidades representativas de cada segmento, de las cuales se tiene mayor información, y se proyectó el parque futuro en base a indicadores referentes a otros países que presentan un nivel de Producto Interno Bruto mayor al caso Chileno (por ejemplo, partiendo de 2,1 camas de hospital por cada 1.000 habitantes, se aumentará a niveles recomendados por la OCDE, de 4 camas de hospital por cada 1.000 habitantes a medida que aumente el PIB del país). En la siguiente tabla, se muestran algunas unidades base consideradas:

Subsector	Segmento	Unidad	Índice U.S.	País	Fuente	Índice Chile	Fuente
-----------	----------	--------	-------------	------	--------	--------------	--------

Comercial	Malls	m2 habitantes	malls/1000 habitantes	328	U.S.	Fuente: ICSC Research and CoStar Realty Information, Inc , agosto 2015	126,4	Corp Research 2013
Público	Hospitales	camas habitantes	hospital/1000 habitantes	4	recomendación internacional (OCDE)	NationalResearch Bureau, 2005	2,1	World Bank (2011)
Comercial	Supermercados	m2 habitantes	supermercados/1000 habitantes	671	U.S.	Fuente: ICSC Research and CoStar Realty Information, Inc , agosto 2015	80,4	Corp Research 2013

Tabla 5: Indicadores de unidades por segmento.

Estas unidades representativas fueron consideradas para el caso chileno en $t=0$, y se proyectaron para alcanzar niveles de países de mayores niveles de desarrollo económico. El cálculo del stock para tal año se realizó en base a la siguiente relación:

$$N_{s,r,p} = H_{r,p} \cdot I_s$$

Donde:

$N_{s,r,p}$ = Número de unidades para el segmento s , en la región r y en el año p donde se alcanza el PIB del país comparado.

$H_{r,p}$ = Número de habitantes en la región r y en el año p donde se alcanza el PIB del país comparado.

I_s = Indicador de habitantes-unidades para el segmento s .

Esta proyección se realiza en forma lineal hasta llegar a un valor constante donde no crece más, que es lo que ocurre en países donde las tasas de natalidad se estancan y disminuye también el crecimiento de este tipo de infraestructura.

En término de proyección de consumos energéticos, éstos se llevaron a cabo proyectando el consumo específico medio de cada unidad representativa, y estimando eficiencias y menores consumos futuros. En términos de uso final de combustible se mantuvieron las proporciones actuales.

Es importante mencionar, que una gran cantidad de edificaciones queda fuera de esta caracterización, y fueron considerados como “Otro Comercio y Edificios Públicos”, que sirvió como variable de ajuste de este sector.

Lo anterior se llevó a cabo, usando la información del BNE para los sectores comercial y público, donde la diferencia entre las unidades representativas y el valor del balance fue atribuido a este segmento de ajuste, al no tener mayor información de detalle.

Finalmente, el consumo energético fue proyectado con un enfoque “Top down”, proyectando el comportamiento histórico del consumo energético de estos sectores, con el incremento del PIB. De esta forma se procedió a estimar la demanda futura y la resta de la proyección de la demanda de energía de

las unidades representativas (hospitales, mall, clínicas, colegios, supermercados y bancos), se le atribuyó al segmento “Otro Comercio y Edificios Públicos”. Un diagrama de estas proyecciones se observa en las siguientes figuras:

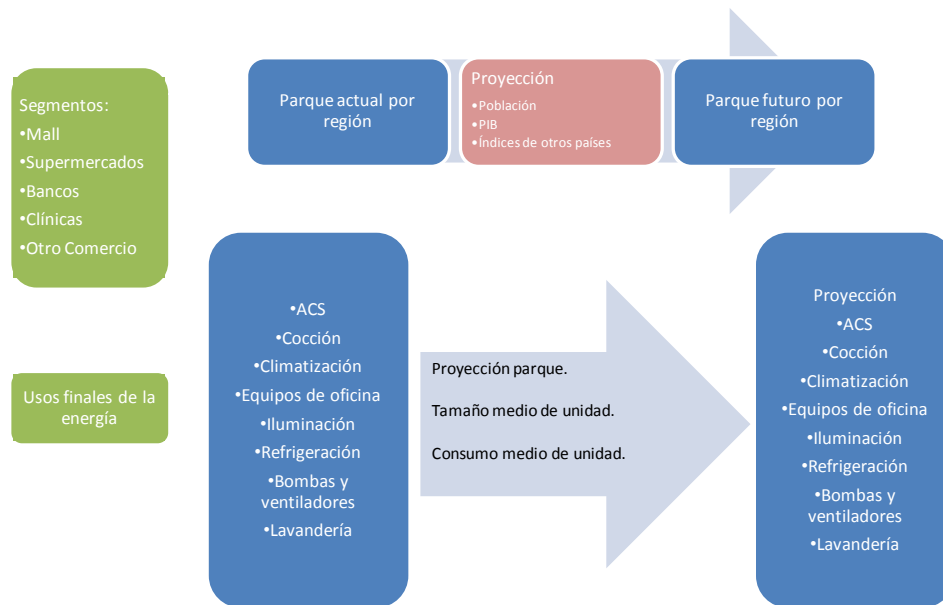


Figura 14: Modelo de Proyección sector Comercial de acuerdo a MAPS. Fuente: MAPS

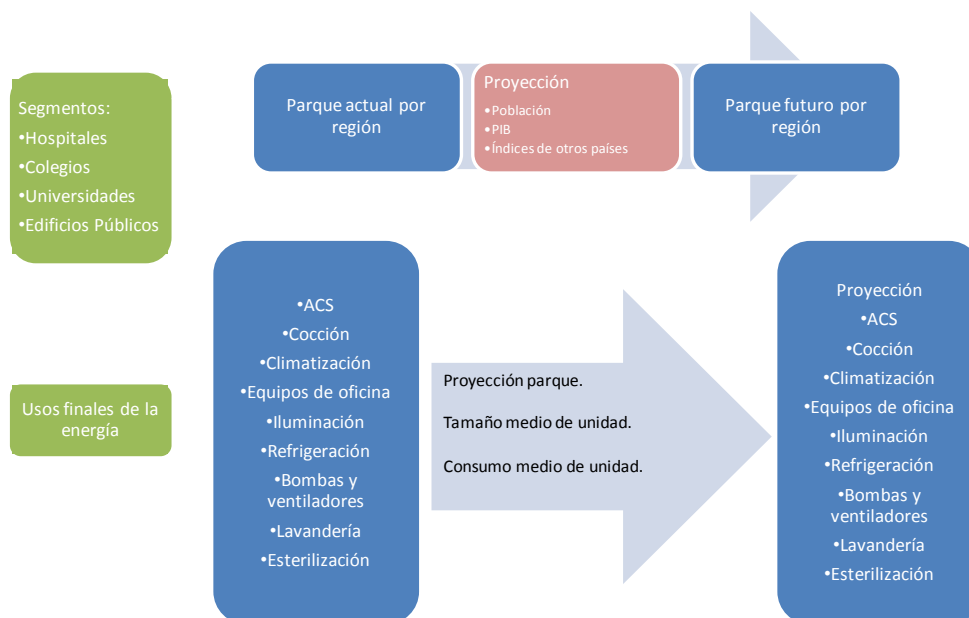


Figura 15: Modelo de Proyección sector Público de acuerdo a MAPS. Fuente: MAPS

Como se ha podido observar, la falta de información desagregada de este sector, ha hecho necesario proyectar con información histórica y mayores supuestos respecto a combustibles y usos finales, lo que impide modelar medidas concretas y regulaciones, a diferencia del sector residencial. Esta proyección de

consumos energéticos para el sector, se llevó a cabo en forma desagregada para el sector comercial y público con información histórica desde el año 1997 al 2012 proveniente del Balance nacional de Energía. Estas regresiones tuvieron niveles de correlación aceptables para los principales combustibles usados por este sector, que corresponde a diésel, electricidad y gas natural, y no mostrando buenas correlaciones para los combustibles de menor presencia.

CONSIDERACIONES CRÍTICAS

A continuación, se lleva a cabo un análisis crítico de la modelación del sector CPR en el marco de MAPS, separándose los dos sectores antes descritos, residencial y comercial – público, debido a las diferencias entre los enfoques de cada uno. También se analizará críticamente respecto del nivel de detalle de la caracterización, como de la proyección, que, si bien están relacionados, permite entender mejor los alcances de las posibles mejoras:

Sub categoría	Caracterización inicial		Proyección	
	Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
Sector Residencial	La caracterización es detallada, tanto a nivel de tipo y zonificación, como de usos finales, lo que permite conocer en profundidad el sector, y realizar una proyección con muchas variables	La zonificación considerada es probable que sufra en el corto plazo modificaciones (se está discutiendo de pasar de zonas térmicas a climáticas). De esta forma, una desagregación por grupo de regiones, se considera más adecuada, para evitar este tipo de cambios técnicos, y por otro lado, es una categorización más conocida a nivel general	Se estima adecuado el enfoque respecto al aumento de tenencia de artefactos, ya que permite comparar con otros países al ser un indicador muy usado en términos energéticos	El principal uso final, calefacción, se proyecta de acuerdo al criterio de confort térmico. Este enfoque es discutible para latitudes de climas más templados, y el crecimiento en el consumo de leña que aquí aparece, no se ha reflejado en la realidad.
	La unidad base (vivienda), está bien elegida, ya que el principal consumo energético es calefacción, el que no depende de las personas, y en el caso de Chile, tampoco depende de los m ² , ya que los sistemas de calefacción son localizados, sin mayor presencia de calefacción central.	Presenta un nivel excesivo de caracterización de la vivienda. Por ejemplo, la desagregación urbano, rural y SIC-SING, no aportan gran valor al modelo	La proyección del número de viviendas y su desagregación en término de tipo de edificaciones se estima adecuada, considerando la tendencia en la disminución de háb/vivienda de acuerdo a otros países, y a las tendencias demográficas de Chile	No hay suficiente análisis respecto a las restricciones en el consumo de leña y sus efectos en el uso final de calefacción

Sub categoría	Caracterización inicial		Proyección	
	Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
		Excesivo detalle en la desagregación de artefactos, lo que implica muchos esfuerzos en consumos muy pequeños	Gran parte de la información que requiere el modelo, provienen de fuentes existentes (Casen, anuario de edificación, informe de combustibles SEC, censo). Sin embargo, se estima adecuada la realización de encuestas de usos finales de energía, para ajustarlo a futuro en relación a esta variable	La calefacción se proyecta considerando la llegada a niveles de confort, lo que se debe adaptar a la realidad de Chile, que posee calefacción localizada, y donde no hay evidencia que se aumente temperatura o se llegue a confort en toda la vivienda.
Sector Comercial y Público		Es un sector muy heterogéneo, donde sólo unos pocos tipos de edificaciones se encuentran caracterizados energéticamente, lo que el análisis bottom up, tiene un impacto pequeño.	El índice de cantidad de tipo de edificación / cantidad de habitantes, es un indicador adecuado, ya que permite comparar con otras realidades. Por otro lado, es bastante usado a nivel de infraestructura, para estimar el déficit de hospitales, y otro tipo de edificaciones. Sin embargo, se debe tener cuidado en la variable a considerar, ya que en el caso de hospitales, por ejemplo, se estima más adecuado el índice de camas/nro. De habitantes, ya que los hospitales pueden tener distintos tamaños	La evolución de consumo de energéticos mediante series históricas, presenta bajos niveles de correlación para casi todos los combustibles, y en el caso de los más usados, es un enfoque que no permite entender las fluctuaciones y drivers. (e.g. disminución de consumo por efecto de corte de gas de Argentina)
		La variable de ajuste que considera edificios públicos y otros comercios, engloba a la mayor parte de la demanda de energía, conformada por edificaciones muy heterogéneas (pequeños locales, frigoríficos, panaderías, etc.) de esta forma, no se sabe qué usos finales y qué energéticos se usan, lo que impide la modelación de medidas enfocadas		El modelo no permite estimar los efectos en medidas de EE, debido a la poca desagregación de este segmento. Si bien se estima a nivel general una alta importancia de la iluminación y la climatización, al ser un sector heterogéneo, estos usos presentan distintas importancias en distintos tipos de edificaciones, que es importante conocer

Sub categoría	Caracterización inicial		Proyección	
	Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
		No hay desagregación climática, lo que es especialmente relevante en comercios con uso de calefacción, climatización		Se estima muy necesario tener un marco de muestreo (ya sea a través del SII o de encuestas del INE), que permitan caracterizar de mejor forma el sector y su crecimiento. En la actualidad, existe una gran “caja negra” respecto tanto a la cantidad de este tipo de edificaciones como respecto a sus consumos unitarios, lo que impide modelar medidas o impactos
		No hay claridad respecto al alto uso de diésel, lo que es importante para estimar medidas de EE que tengan que ver con este consumo		No se ha detectado información primaria que se levante regularmente, que permita alimentar este modelo y ajustarlo, siendo la única información disponible, el balance nacional de energía
		No hay mayor análisis de alumbrado público, lo que es un consumo relevante del sector público.		

SECTOR TRANSPORTE

El sector transporte es el segundo sector con mayor consumo de energía final luego de industria y minería con 31,3% de la demanda total al año 2013, de los cuales el 82% corresponde a transporte caminero y el resto es dividido entre el transporte aéreo, marítimo y ferroviario. Los principales energéticos del sector son el diésel y la gasolina automotriz con el 82% de la energía total consumida por el sector

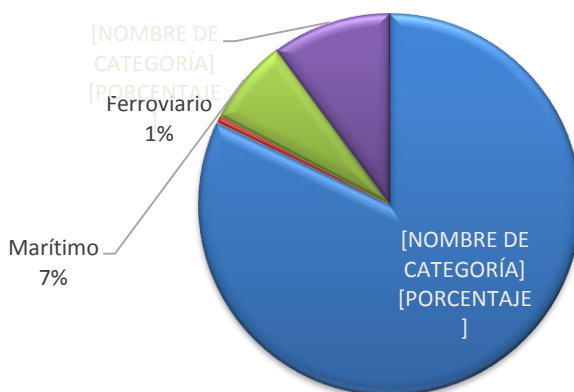


Figura 16: Distribución consumo energético sector transporte, año 2013.

Fuente: BNE 2013.

El 80% del consumo energético del sector es demandado por el transporte terrestre. Del cual un 80,5% corresponde al transporte de pasajeros y un 19,5% a transporte de carga (MAPS 2012).

Respecto de los combustibles el 57,1% de la energía demandada por el transporte caminero proviene del diésel seguido de la gasolina automotriz con el 41,3%.

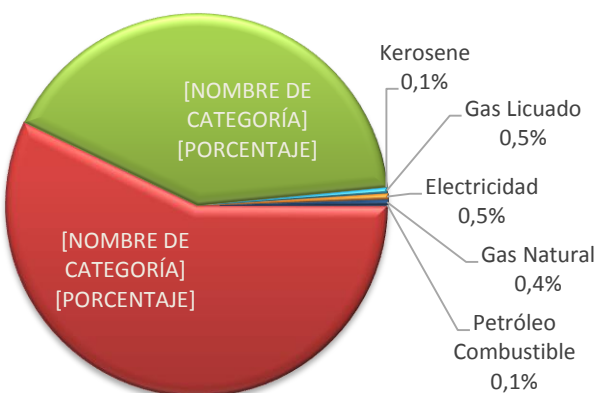


Figura 17: Distribución consumo energético sector transporte terrestre, año 2013.

Fuente: BNE 2013.

MODELO GENERAL

En el proceso MAPS, este sector fue abordado metodológicamente a través de modelos de nivel regional, de actividad de carga toneladas-km (TKM), y de actividad de pasajeros pax-kilómetro (PKM). En el proyecto, se utilizaron modelos econométricos para cada variable de actividad por región y además se elaboró un modelo de partición modal Logit Multinomial (LMN) para la Región Metropolitana. Este modelo fue posteriormente replicado para la elaboración del estudio “Actualización Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte (STEP)” para SECTRA utilizando la información disponible hacia fines del año 2013.

Sobre esta base y en conjunto con otras variables que caracterizan cada modo de transporte, se obtuvo la demanda energética por cada modo y región. La estructura general del modelo desarrollado en MAPS es la siguiente.

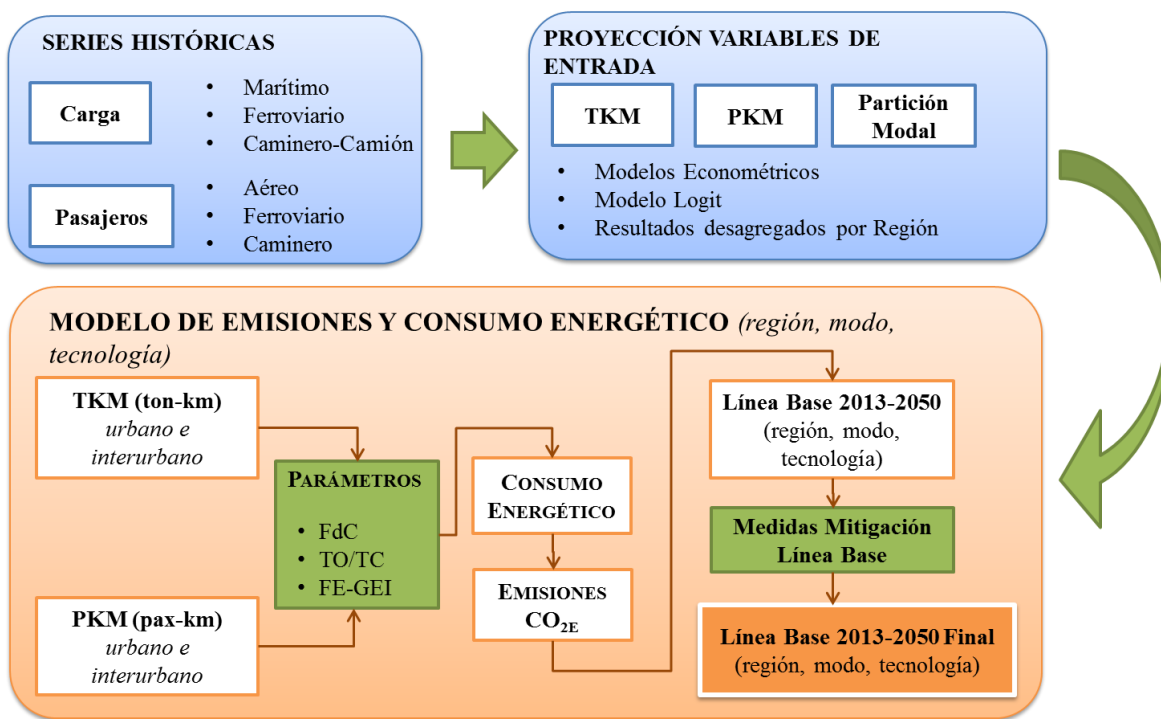


Figura 18 Metodología general del modelo de Transporte MAPS Fase II.

Fuente: MAPS Fase II Transporte

METODOLOGÍA

Uno de los principales productos del modelo fueron las proyecciones de nivel de actividad a nivel regional por modo de transporte, la estructura de las proyecciones desarrolladas se describe en la siguiente figura.

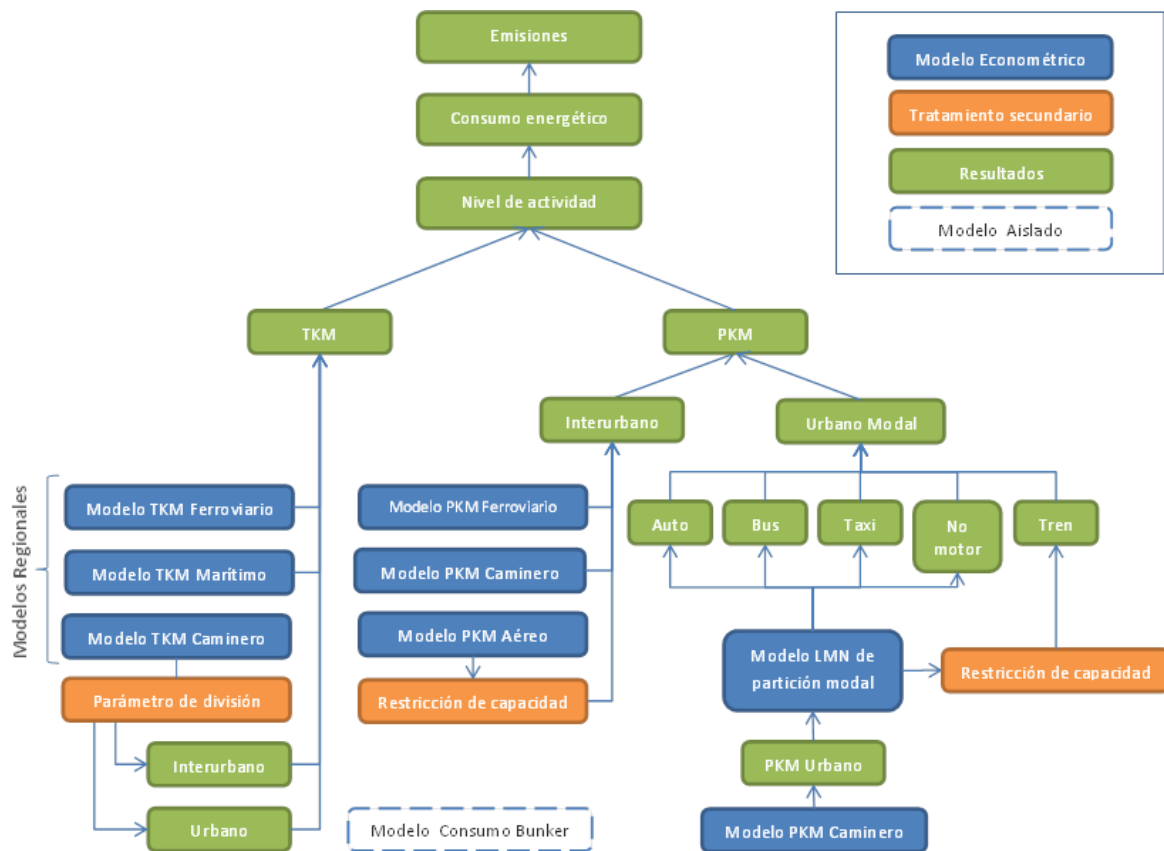


Figura 19 Detalle de modelo de Transporte

Fuente: MAPS Fase II Transporte

Las principales variables independientes de la modelación econométrica fueron los PIB regionales o nacional en modo puro o per cápita, aunque también se consideraron otras variables independientes como el precio de los combustibles, o algunos catalizadores de carga en algunas regiones donde existen industrias muy relevantes como el cobre y papel y celulosa. En esta línea, profundizar en las causalidades específicas que generen la actividad a nivel regional, es una mejora pendiente para algunos modelos regionales.

El desarrollo de este modelo elevó el nivel de complejidad de los modelos prospectivos energéticos de transporte desarrollados en el país, que hasta antes de la fase 1 de MAPS eran modelos de stock, es decir se modelaba y proyectaba el parque vehicular, utilizando típicamente modelación econométrica para las ventas y la chatarrización de vehículos, y en casos más simples se proyectaba directamente la demanda energética del sector.

Sin embargo, la gran desventaja de estos modelos “convencionales” es que el stock no representa necesariamente el consumo energético, es más, a mayores niveles de ingreso las familias adquieren nuevos vehículos, lo que no implica que se duplique la actividad vehicular de la familia, al contrario, la evidencia indica que habrá un vehículo con menos actividad.

En enfoque por actividad PKM y TKM, soslaya los efectos de estas distorsiones dadas a mayores ingresos y además es más útil para modelar cambios modales, ya que permite calcular actividad sin asignarla a un modo predefinido. El primer acercamiento a fondo a esta metodología lo dio el Departamento de Energía y Cambio Climático del Reino Unido en el estudio “2050 Pathways Analysis” (2010) y sirvió como referencia para el modelo de transporte de MAPS.

El principal problema a la fecha de este modelo es que requiere de una gran de información la que no es directamente observable, más bien se deriva de otras series como parque vehicular y consumo energético, además las proyecciones requieren series largas las que no siempre están disponibles. En MAPS, gran parte de las series ocupadas se concentraban entre los años 1998 y 2012, lo que estadísticamente es muy escaso para una buena modelación econométrica. La herramienta se actualiza con los antecedentes del 2013 y que se estimaron en proyecto STEP (2014) de SECTRA,

Las fuentes de información utilizadas para levantar o construir las series de actividad se presenta en el siguiente cuadro.

Tabla 6 Fuentes de información MAPS Transporte Fase II.

Información	Subsector	Fuentes	Uso
PKM-aéreo	Modo Aéreo Interurbano	JAC (1984-2012)	Uso directo para estimación de emisiones pasajeros
TKM-aéreo	Modo Aéreo Interurbano	JAC (1984-2012)	Uso directo para estimación de emisiones carga
TKM-marítimo	Modo Marítimo Interurbano	No disponible	Emisiones de transporte de carga por cabotaje
Ton cabotaje	Modo Marítimo Interurbano	DIRECTEMAR Boletín Estadístico Marítimo (1991-2011)	Estimación de TKM marítimo
PKM-ferroviario	Modo Ferroviario Urbano/ Interurbano	INE Disponible solo a nivel nacional	Emisiones ferroviario pasajeros urbano/ interurbano
TKM-ferroviario	Modo Ferroviario Interurbano	INE Disponible solo nacional	Emisiones ferroviario carga interurbano

Información	Subsector	Fuentes	Uso
Pasajeros ferroviario	Ferrovial Urbano/ Interurbano	Disponible por empresas específicas (FESUB, Trenes Metropolitanos, EFE; Merval, METRO	Estimación de PKM ferroviario asignando distancias medias de viaje
Ton ferroviario	Modo Ferroviario Interurbano	INE Disponible solo nacional	Estimación de TKM ferroviario asignando distancias medias de viaje
Ton ferroviario	Modo Ferroviario Interurbano	Estudio referencia (SUBTRANS, 2007)	Distribución de TKM en regiones
Consumo combustible	Modo Caminero	Modelo STEP (SECTRA)	Estimación TKM y PKM
Rendimiento de vehículos de carga	Modo Caminero	Estudio de referencia SECTRA 2005	Estimación TKM
Tasa de carga por vehículo	Modo Caminero	Estudio de referencia Doña y Díaz, 2003.	Estimación TKM
Rendimiento de vehículos de pasajeros	Modo Caminero	SECTRA Información de Transporte Urbano	Estimación PKM
Partición Modal	Modo Caminero	SECTRA a partir de EODs	Estimación PKM
Tasa de Ocupación	Modo Caminero	SECTRA a partir de plataforma SINTIA	PKM

Una vez proyectada la actividad, ésta se lleva a consumo energético a través de intensidades energéticas, tasas de carga (ton/veh), tasa de ocupación (pax/veh) y factores de consumo o rendimiento de los vehículos según corresponda para cada modo.

Tabla 7 Drivers para cálculo de demanda energética desde los niveles de actividad.

Consumo	Tipo de operación	Variables
Carga marítima	Interurbano	Intensidad energética (Mcal/ton-km)
Carga ferroviaria	Interurbano	Factor de consumo (ton/convoy) Tasa de carga (km-convoy/lt)
Carga caminero	Interurbano	Factor de consumo (km/lt) Tasa de carga (ton/veh)
Pasajero aéreo	Interurbano	Intensidad energética (Mcal/pax-km)
Pasajero ferroviario	Interurbano	Intensidad energética (Mcal/pax-km)
Pasajeros caminero y ferroviario	Urbano	Partición modal (%) Factor de consumo (km/lt) Tasa de ocupación (pax/veh)

Una avance importante en la modelación del sector transporte fue el desarrollo de un modelo de partición modal sobre la base de la encuesta origen-destino (EOD) de SECTRA.

El método utilizado fue un modelo logit multinomial para la Región Metropolitana y un modelo simple univariable para el resto de las regiones. Esta distinción se basa en la limitación que presenta la información para un desarrollo adecuado del modelo logit multinomial, en particular, la ausencia de variaciones en los parámetros modales (cobertura, tarifa, velocidad de viaje, tiempo de espera) al disponer solamente de un año de información de la EOD limita el análisis de utilidad de estos parámetros.

En el modelo logit se estableció para cada modo j una función dependiente de variables clave como ingreso, costo de viaje, tiempo de viaje, velocidad media, motorización y otras variables: $p_j = f(y, c, T, v, m, x)$, En el caso del modelo las variables significativas dada la información disponible fueron el ingreso, la posesión de vehículos, y la distancia de viajes, sin embargo, esta última no es considerada dada la complejidad de ser definida prospectivamente. En el caso del modelo univariado la variable que define la probabilidad de cada modo de transporte es únicamente el ingreso.

CONSIDERACIONES CRÍTICAS

A continuación se lleva a cabo un análisis crítico de la modelación del sector transporte en el marco de MAPS. En particular, se analiza críticamente el nivel de detalle de la caracterización y de la proyección, dado que si bien están relacionados, su desagregación permite entender mejor los alcances de las posibles mejoras: <i>Caracterización inicial</i>		<i>Proyección</i>	
Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
La caracterización de consumos para el transporte caminero permite establecer una desagregación regional.	Los datos empleados, fueron en su mayoría, entregados por SECTRA y no corresponden a antecedentes públicos y actualizables de manera sencilla.	El enfoque de PKM y TKM se considera adecuado dado que permite parametrizar el nivel de actividad en función de variables económicas clave. En particular, la demanda de transporte se determina y es independiente del modo.	De todas maneras, se requiere la estimación del parque vehicular, categorías y desagregación tecnológica tanto para cuantificar emisiones como para estimar impacto de medias asociadas.

A continuación se lleva a cabo un análisis crítico de la modelación del sector transporte en el marco de MAPS. En particular, se analiza críticamente el nivel de detalle de la caracterización y de la proyección, dado que si bien están relacionados, su desagregación permite entender mejor los alcances de las posibles mejoras: <i>Caracterización inicial</i>		<i>Proyección</i>	
Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
La caracterización de consumos para el transporte caminero permite establecer una desagregación regional.	Los datos empleados, fueron en su mayoría, entregados por SECTRA y no corresponden a antecedentes públicos y actualizables de manera sencilla.	El enfoque de PKM y TKM se considera adecuado dado que permite parametrizar el nivel de actividad en función de variables económicas clave. En particular, la demanda de transporte se determina y es independiente del modo.	De todas maneras, se requiere la estimación del parque vehicular, categorías y desagregación tecnológica tanto para cuantificar emisiones como para estimar impacto de medias asociadas.
El modelo de partición modal de la Región Metropolitana es adecuado para representar cómo viajan los individuos en función de parámetros clave como ingresos y distancia recorrida.	Los antecedentes con que se estima el modelo de partición modal para la RM corresponden a una base de datos construida por SECTRA que combina antecedentes de la encuesta origen destino y otra información. Esto hace que su actualización sea infactible sin la ayuda de SECTRA. El análisis del impacto en la partición modal de variables como tarifa, cobertura, velocidad de viaje o tiempo de espera de cada modo de transporte se ve restringido por los datos. Para desarrollar modelos más complejos, es necesario un modelo de generación de información recurrente en el tiempo, hecho que se ve limitado por el alto costo que conlleva el detalle de información levantado en las EODs. Para el resto de las regiones los datos eran insuficientes para un modelo robusto de partición modal y se procedió a un enfoque secundario.	La ventaja del modelo de partición modal es que se modela explícitamente cómo compiten los modos por los viajes.	Un problema es que proyectar con un modelo de partición modal es el supuesto (fuerte) que la elasticidad ingreso de corte transversal coincide con la de serie de tiempo.
La caracterización de los consumos de transporte interurbano y de carga se desagrega a nivel regional	En el transporte interurbano es difícil asignar la demanda de transporte (y consumo de combustible asociado) a una región determinada. Se toman los supuestos típicos seguidos por modelaciones anteriores y los criterios de SECTRA.	Se analiza con criterios estadísticos y econométricos qué variables son las que explican estas demandas En cada caso.	El nivel y largo de las series es un problema para un análisis econométrico robusto.

SECTOR INDUSTRIA Y MINERÍA

El sector de industria y minería es el mayor consumidor de energía con aproximadamente un 36% de la demanda de uso final de energía durante el año 2013⁹ mientras que cerca del 32% de la demanda energética del sector corresponde a la minería del cobre, siendo el subsector más importante de la demanda energética.

El energético más intensivo en uso con el 34% de la demanda total del sector es la electricidad, asociada a usos motrices, térmicos y otros usos eléctricos, el 24% de la energía consumida corresponde a diésel asociado principalmente a uso motriz, y el 19% de la energía consumida corresponde a leña y biomasa para usos térmicos.

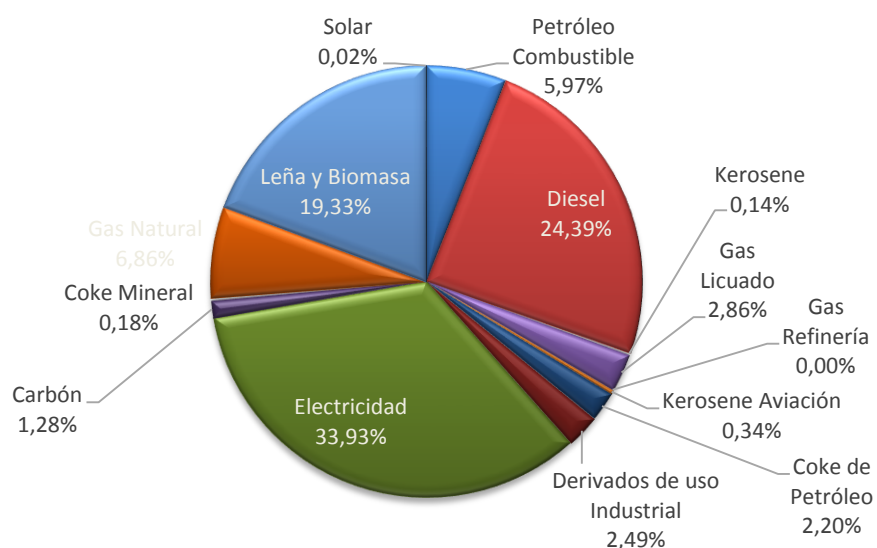


Figura 20: Distribución por combustible del consumo energético sector de industria y minería, año 2013.

Fuente: BNE 2013.

Las industrias más intensivas con más del 50% de la demanda energética del sector son la minería del cobre con un 32% de la demanda total y la industria forestal y papelera con el 21% del consumo energético de industria y minería.

⁹ BNE 2013

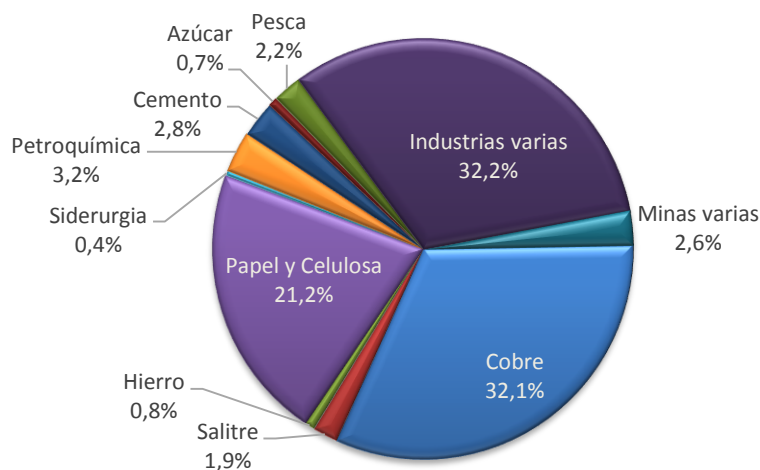


Figura 21: Distribución por subsector del consumo energético sector de industria y minería, año 2013.

Fuente: BNE 2013.

Por otra parte del consumo energético del sector cobre, un 54% corresponde a electricidad utilizada principalmente en los procesos de concentrado y lixiviación, mientras que 39% de la demanda energética corresponde a diésel principalmente utilizada en los procesos de extracción minera.

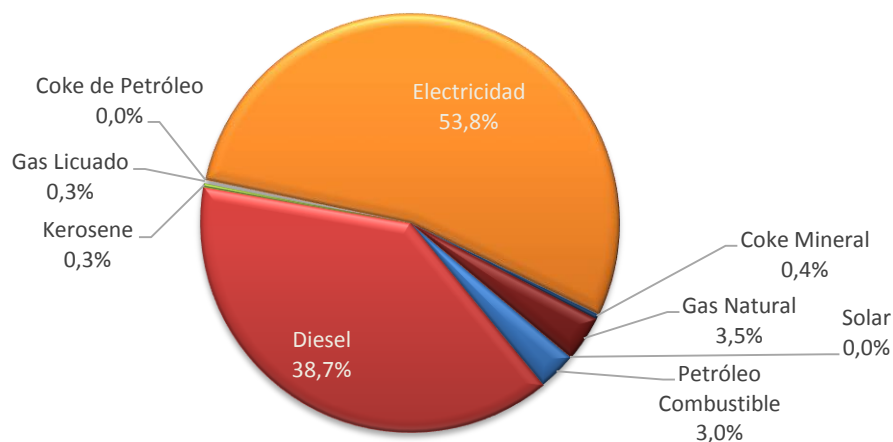


Figura 22: Distribución de combustibles del consumo energético sector cobre, año 2013.

Fuente: BNE 2013.

MODELO GENERAL

Para el desarrollo del modelo de industria y minería en MAPS se utilizó un modelo de uso final de energía desarrollado en la herramienta LEAP. Los usos energéticos industriales utilizados fueron motriz, eléctrico y térmico o calor como es la tendencia de modelación energética en el sector, sin embargo para el sector cobre se utilizaron usos específicos del sector.

Por otra parte, para cada subsector específico la demanda energética fue desagregada por sistema eléctrico. La figura siguiente resume el enfoque metodológico de uso final propuesto para predecir consumos energéticos. Cabe destacar que considera utilizar métodos estadísticos y/o econométricos para analizar las tendencias de los resultados, y en algunos casos, de los niveles de actividad.

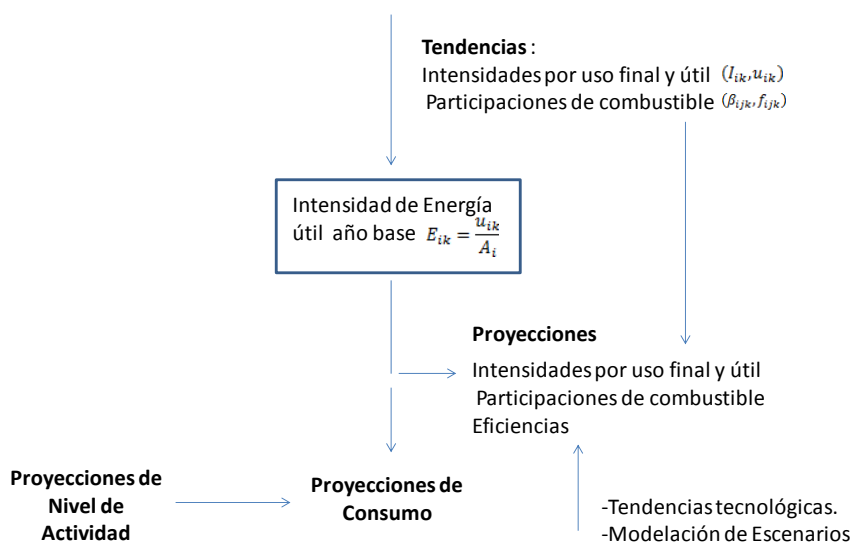


Figura 23: Resumen de Metodología de Uso Final Propuesta
Fuente Elaboración Propia

Adicionalmente el modelo consideró elasticidad de sustitución de combustibles de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio “Estudio de Demanda Energética para el sector industrial manufacturero y minero de Chile” (Benavente & Gómez Lobo, 2012). El uso de las elasticidades permite mediante un enfoque sencillo es cambiar la composición del consumo (participación de los energéticos) de acuerdo a cambios en los precios relativos.

MODELOS SECTORIALES

La importancia de la minería del cobre ha generado en los estudios prospectivos de los últimos años el desarrollo de modelos de mayor complejidad para el sector, en el caso de MAPS se utilizó un modelo de demanda de energía útil para cada subprocesso del sector como detalla el siguiente cuadro.

Tabla 8 Variables básicas de modelación del sector cobre para MAPS Chile fase II.

Proceso principal	Subprocesos	Driver
Procesos	Fundición	Saturación %/ Producción Cobre fino
	Refinería	Saturación %/ Producción Cobre fino
	Lixiviación	Saturación %/ Producción Cobre fino
	Servicios	Saturación %/ Producción Cobre fino
Desalinización	Desalinización	Demanda regional – Altura de las faenas
Mina	Mina Abierta	Material Procesado total
	Mina Rajo	Material Procesado total
Concentradora	Concentradora	Material Procesado concentradora

Fuente: Elaboración Propia

El driver principal corresponde a la producción total de cobre, como se realiza por ejemplo, en modelos de Agencia Internacional de la Energía. Para ello se utilizan las principales bases de datos de proyectos mineros como es Brook Hunt, CRU y Cochilco. Estas proyecciones consideran estimaciones de ley para óxidos y sulfuros, y de tasa de recuperación de mineral, permitiendo el cálculo de los drivers del modelo.

Las bases de datos de proyectos son utilizadas para la modelación del sector en el periodo 2012-2025 en donde se generan escenarios sobre supuestos de retraso en el desarrollo de los nuevos proyectos mineros.. Para ello se utiliza la estimación de demanda y oferta mundial de cobre realizada por CRU hasta el año 2035 (CRU, 2012) La producción posterior y hasta 2050 se estima suponiendo una participación de Chile en la oferta mundial de cobre

La ley es proyectada de acuerdo a un modelo logarítmico (Viera 2012¹⁰), esta función calcula la ley media de acuerdo a la producción acumulada. Sin embargo, la incorporación de nuevos proyectos corrige la tendencia de la ley media al alza, por lo que el modelo de ley media no representa con suficiente precisión la ley cuando se consideran proyectos prospectivos.

Adicionalmente el modelo utilizó sustitución entre los combustibles que participan en cada uso de acuerdo a las elasticidades calculadas en (Benavente & Gómez Lobo, 2012), permitiendo proyectar la participación de los combustibles. En forma resumida, esta información más las proyecciones de intensidad de energía útil permiten describir la demanda energética del sector.

¹⁰ Vieira, M. D. (2012). Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper. Environmental Science and Technology.

Además del sector cobre son modelados los sectores Hierro, Salitre, Minas Varias, Celulosa, Siderurgia, Cemento, Azúcar, Pesca, Petroquímica e Industrias Varias. En cada caso se utilizó un modelo de intensidad de energía útil clasificando los usos en Térmico, Motriz y Eléctrico, a partir de la información del BNE.

Los niveles de actividad o drivers de la demanda de estos sectores fueron definidos caso a caso de acuerdo a las características del sector.

Además suelen encontrarse restricciones estructurales, de abastecimiento o de mercado que inciden en la trayectoria de la producción de un determinado sector. Por ejemplo, la expansión de la producción siderúrgica China ha provocado que no sean viables en el corto plazo expansiones de capacidad productiva a nivel local. De igual modo, la restricción de uso de suelos limita la producción de la industria de la celulosa, o las leyes del sector pesquero contienen la extracción del recurso. Estas consideraciones deben ser analizadas en profundidad a la hora de definir un modelo de proyección para cada sector.

La tabla siguiente resume los modelos utilizados en MAPS fase II para la proyección del sector de I&M.

Tabla 9 Modelos de industria y minería utilizados en MAPS Chile Fase II.

Sector	Driver	Modelo para el driver
Hierro	Producción	M. Econométrico sobre PIB regional
Salitre	Producción	M. Econométrico sobre PIB de USA
Minas Varias	Producción	M. Econométrico sobre PIB Chile y PIB Europa
Celulosa	Producción	Intensidad por disponibilidad de suelos
Siderurgia	Producción	Capacidad de producción
Cemento	Producción	M. Econométrico sobre PIB Chile
Azúcar	Producción de remolacha	Área de plantación disponible
Pesca	Volumen extraído	Información de mercado
Petroquímica	Producción de metanol y etileno	Capacidad de producción
Industrias varias	PIB	Crecimiento económico

Fuente: Elaboración Propia

CONSIDERACIONES CRÍTICAS

A continuación, se lleva a cabo un análisis crítico de la modelación del sector Industria y Minería en el marco de MAPS. En particular, se analiza críticamente el nivel de detalle de la caracterización y de la proyección, dado que, si bien están relacionados, su desagregación permite entender mejor los alcances de las posibles mejoras:

<i>Caracterización inicial</i>		<i>Proyección</i>	
Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
La caracterización de consumos se desagrega por usos finales y procesos para el caso de minería del cobre.	La información de base es disímil entre sectores. La información de actividad económica (PIB) del Banco Central no coincide con las del BNE. Por lo anterior, no es posible establecer una intensidad sectorial por PIB clara (por ejemplo, industrias varias).	Para principales sectores de consumo existen antecedentes de expectativas que permiten modelaciones con la mejor información disponible.	La complejidad del modelo es muy alta como también el nivel de incertidumbre. Se requiere establecer fuera del modelo consistencia entre un sinnúmero de trayectorias de variables relevantes (producción, precios, PIB).
Se requiere contar con consumos a nivel regional consistente con los esfuerzos de las políticas locales.	La caracterización de consumos no es regional. Regionalizar estos modelos representa un desafío, si bien en algunos sectores esta labor es más sencilla ya que algunas industrias están desarrolladas en regiones específicas del país, en otros sectores como pesca, o industrias varias esta labor es mucho más compleja.	Permitirá establecer escenarios de consumo regional.	Se requerirá determinar drivers críticos a nivel de región con información escasa.
La penetración de combustibles por uso se estima a partir de información de consumo energético desagregado por combustible, recibida de COCHILCO	El análisis es referencial. No se consideran cambios en el nivel de actividad (no cambia producción, solo composición del consumo de energía).	Existe consistencia entre precios de combustibles y penetración de su consumo en usos pertinentes por sector.	Las elasticidades se emplean libremente independiente del nivel del cambio de precios (elasticidades válidas para cambios de precios pequeños). Elasticidades no permiten considerar nuevas tecnologías.
Modelo permite estimar demandas de energía útil por uso dado que se desagrega el consumo por combustibles y se consideran explícitamente rendimientos.	No se cuenta con análisis de stocks que pueden ser relevantes para algunas medidas de eficiencia energética	Se pueden proyectar tendencias tecnológicas, mejoras en rendimientos, sustituciones de combustibles	Muy difícil establecer impactos endógenos de medidas de eficiencia energética.

A continuación se presenta una descripción general del modelo desarrollado para el sector eléctrico. La modelación de este sector será definida en conjunto con el Ministerio contemplando que los acuerdos metodológicos que se alcancen en este ítem deben permitir a la herramienta prospectiva el cierre del balance energético nacional.

Como opciones para obtener la información del sector necesaria para el cierre del balance se proponen:

- Un modelo simplificado del sector que permita cerrar el balance sin los largos tiempos de ejecución que conlleva el sector generación (considerando que la modelación regional en los otros sectores provoca por si sola corridas de larga ejecución)
- Una sección dentro de la herramienta que permita incorporar las salidas del modelo del Ministerio sin modelar el sector, esta última tiene como ventaja que representaría con mayor precisión la operación y expansión de los sistemas eléctricos sin los costos asociados a modelar este sector dentro de la herramienta.

En el proyecto MAPS el sector eléctrico fue modelado en la herramienta LEAP en conjunto con WEAP para el análisis hidrológico, utilizando la integración de estas herramientas. La integración de ambas plataformas permite utilizar supuestos comunes, mismos escenarios, mismos bloques temporales, fronteras geográficas, etc.

Como se aprecia en la siguiente figura la metodología consta de 3 etapas principales. En la primera etapa se define un conjunto de 10 escenarios basados en 2 niveles de ingresos del país, y 5 potenciales intensidades hidrológicas representativas. En cada uno de estos escenarios se calcula la expansión óptima del sistema obteniendo así 10 planes de obra de capacidad de generación. La modelación no considera aspectos de transmisión en un análisis uninodal.

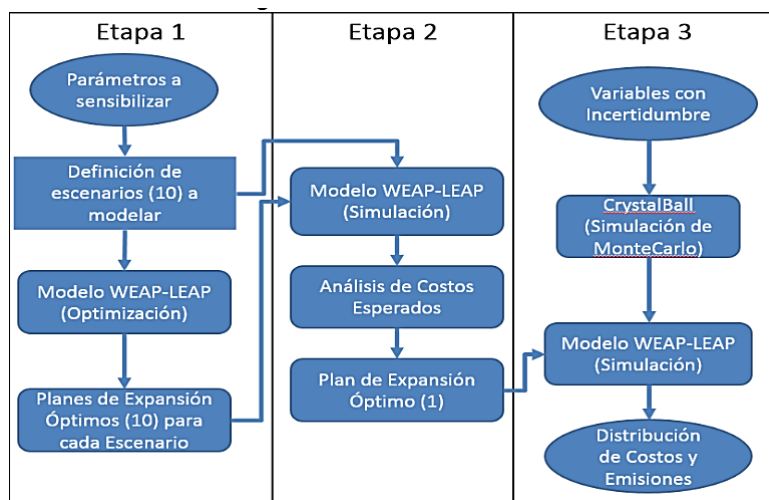


Figura 24: Metodología del sector generación eléctrica MAPS Fase 2.
Fuente MAPS Fase 2

Una segunda etapa se simula el funcionamiento de los actores que deciden las inversiones en un ambiente con incertidumbre siguiendo las reglas de mercado, en este caso minimizar el valor esperado de los costos de expansión y operación. Para ello se evalúa cada escenario definido en la primera etapa, en cada plan de expansión obtenido, considerando este último exógeno. De esta forma el plan de expansión óptimo es aquel que minimiza la esperanza de los costos dado los 10 escenarios iniciales.

En la tercera etapa se realiza un análisis de sensibilidad, para ello el plan óptimo es analizado mediante simulación de Montecarlo considerando la incertidumbre asociada al precio de los combustibles, la disponibilidad del recurso eólico, la disponibilidad hidroeléctrica, y la demanda eléctrica.

Un desafío adicional que presentó esta modelación fue la representación de la interconexión de los principales sistemas eléctricos del país. Para esto se desarrolló una versión especial del software que permite la transformación de un energético en otro. En este caso se utilizó un centro de transformación que fuera capaz de transformar la electricidad generada en un sistema, llámese por ejemplo electricidad-SIC, a la electricidad demandada por el otro sistema eléctrico, llámese electricidad-SING. El siguiente esquema representa el funcionamiento de estos módulos.

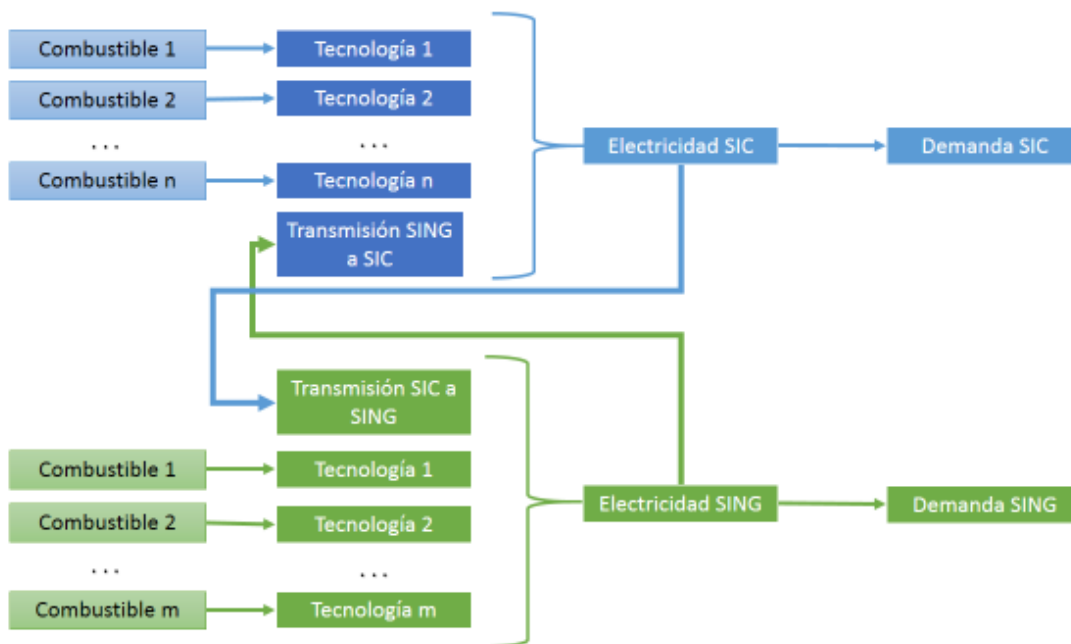


Figura 25: Esquema de modelación SIC-SING.

Fuente MAPS Fase 2

CONSIDERACIONES CRÍTICAS

A continuación se presenta un análisis crítico de la modelación del sector generación eléctrica en el marco de MAPS. En particular, se analiza críticamente el nivel de detalle de la caracterización y de la proyección:

<i>Caracterización inicial</i>		<i>Proyección</i>	
Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
Al ser un modelo uninodal permite la modelación de largo plazo con tiempos de ejecución “razonables”	Al ser un modelo uninodal no considera la carga en las líneas de transmisión ni potenciales “cuellos de botella”	El modelo calcula la expansión óptima dentro de un set de opciones tecnológicas disponibles y sus costos de operación e inversión	Al utilizar una curva de carga de demanda estática, la proyección no considera variaciones en comportamiento intra-anual de la demanda eléctrica
Permite modelar adecuadamente la interconexión de los sistemas eléctricos y su despacho bajo un criterio de mínimo costo del sistema	Los tiempos de ejecución limitan la caracterización anual a determinados bloques, lo que tiende a simplificar la oferta de algunas energías renovables como la solar y eólica.	Permite establecer megas de generación eléctrica para centrales específicas, como por ejemplo energías renovables no convencionales	No considera efectos de cambio climático que pueden modificar la estructura de la oferta de algunas energías renovables como la solar y eólica.
Puede modelar distintos niveles de sofisticación y rendimientos de centrales con tecnologías similares.			

