



Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación

Jacques Clerc
Manuel Díaz
Bruno Campos

**Banco
Interamericano de
Desarrollo**

Departamento
de Investigación
y Economista Jefe

NOTA TÉCNICA
IDB-TN-541

Mayo 2013

Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación

Jacques Clerc
Manuel Díaz
Bruno Campos



Banco Interamericano de Desarrollo

2013

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Clerc, Jacques.

Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación / Jacques Clerc, Manuel Díaz, Bruno Campos.

p. cm. (Nota técnica del BID ; 541)

Includes bibliographical references.

1. Climatic changes—Research. 2. Climate change mitigation. 3. Greenhouse gas mitigation. I. Díaz, Manuel. II. Campos, Bruno. III. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Investigación y Economista Jefe. IV. Título. V. Serie.

IDB-TN-541

<http://www.iadb.org>

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright © 2013 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

Resumen

El objetivo general del estudio es desarrollar una metodología para la elaboración de curvas de abatimiento de gases de efecto invernadero para el sector de demanda energética, incorporando la incertidumbre asociada a las variables involucradas en la estimación de los costos marginales de abatimiento. Posteriormente, esta metodología será aplicada en un caso de estudio al sector de generación eléctrica y a tres sectores de la demanda en seis países latinoamericanos.

Códigos JEL: L94, Q41, Q52, Q54

Palabras clave: Cambio climático, Abatimiento, Curva de costo marginal, Incertidumbre, Riesgo, Mitigación, Gases de efecto invernadero

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	4
1.1	Contextualización del Estudio	4
1.2	Contenidos del Informe.....	6
2	Incertidumbre en la Toma de Decisiones.....	8
3	Curva de Costos Marginales de Abatimiento.....	14
3.1	Definición de una Curva de Costo Marginal de Abatimiento.....	14
3.2	Ventajas y Desventajas de las Curvas de Abatimiento	16
3.3	Estimación de la Curva de Costo Marginal de Abatimiento.....	17
4	Análisis de sectores de consumo energético	19
4.1	Resumen.....	19
5	Revisión general de enfoques metodológicos	23
5.1	Enfoques de Modelación de Medidas de Mitigación.....	23
5.2	Levantamiento de Información para Alimentar el Análisis Determinístico y Probabilístico .	24
6	Desarrollo Metodológico y Resultados del Sector Generación Eléctrica	26
6.1	Identificación de las principales variables sujetas a incertidumbre.....	27
6.2	Aplicación de la metodología en la caracterización de variables estocásticas en el sector generación de energía eléctrica.....	31
6.3	Elaboración de la curva de abatimiento con incertidumbre del sector generación de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Central de Chile.	38
6.3.1	Análisis de Sensibilidad de las Variables	46
7	Desarrollo Metodológico y Resultados de los Sectores de Demanda Energética.	47
7.1	Modelación y Estimación de Impactos de Medidas de Mitigación de Gases Efecto Invernadero en el Sector Transporte	47
7.1.1	Variables asociadas a Medidas de Mitigación en el Sector Transporte.....	50
7.1.2	Vehículos livianos privados y taxis híbridos	52
7.1.3	Vehículos livianos privados y taxis híbridos plug-in	54
7.1.4	Conducción eficiente.....	56
7.2	Modelación y Estimación de Impactos de Medidas de Mitigación de Gases Efecto Invernadero en el Sector Cobre	57
7.2.1	Definición de Medidas de Eficiencia Energética	58

7.3	Modelación y Estimación de Impactos de Medidas de Mitigación de Gases Efecto Invernadero en el Sector Papel y Celulosa.....	64
7.3.1	Sistemas de cogeneración eficientes	67
7.3.2	Variadores de frecuencia en bombas.....	69
7.3.3	Mejorar aislamiento	70
7.4	Metodología genérica de cálculo de costos de abatimiento	72
7.5	Variables Aleatorias.....	73
8	Construcción de la curva	77
9	Comentarios y Conclusiones	82
10	Referencias.....	84
	Anexos.....	87
A.1.	Consideraciones de Análisis de Incertidumbre en Evaluación Económica	87
A.2.	La Modelación de Propagación de Incertidumbre	93
A.3.	Técnicas de Muestreo	96
A.4.	Teoría de Muestreo Latin Hypercube (Latin Hypercube Sampling LHS).....	98
A.5.	Elección de Distribuciones de Variables de Entrada	102
A.6.	La Correlación entre las Variables de Entrada	107
A.7.	Curvas de Costo de Abatimiento derivadas de Modelos	109
A.8.	Comentarios acerca del Análisis Costo Beneficio.....	110
A.9.	Selección de la tasa de descuento	113
A.10.	Análisis energético de países de la región.	115
A.10.1.	Argentina.....	115
A.10.2.	Brasil.....	116
A.10.3.	Chile.....	118
A.10.4.	Colombia	120
A.10.5.	México	121
A.10.6.	Perú	123
A.11.	Acciones de Eficiencia Energética en el Sector Industrial y Minero y Transporte	126
A.12.	Potencial global estimado de reducciones de CO2 el año 2030	132
A.13.	Análisis de disponibilidad de información.....	133
A.13.1.	Sector Transporte.....	134
A.13.2.	Evaluación del estado de la información	139

A.13.3.	Sector Industria del Cobre.....	142
A.13.4.	Evaluación del estado de la información	142
A.13.5.	Información del Sector Industrial.....	146
A.13.6.	Evaluación del estado de la información	155
A.14.	Resultados con tasa de descuento de 12%	158
A.15.	Resultados estocásticos de las variables	159
A.16.	Análisis de Sensibilidad de las Variables	167
A.17.	Regresiones de Precios.....	174
A.18.	Softwares de Modelación.....	176

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento ha sido elaborado por los profesionales Jacques Clerc, Manuel Díaz y Bruno Campos y corresponde al informe técnico final del proyecto **“Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación”**, desarrollado para el Banco Interamericano de Desarrollo.

En esta sección se presenta inicialmente una contextualización global del estudio y luego se presentan, de manera general, los contenidos de los capítulos que conforman el presente documento.

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El cambio climático como problema global plantea desafíos que eventualmente pueden transformarse en exigencias. Las regulaciones de mercado internacionales utilizan instrumentos que progresivamente intentan internalizar los costos externos asociados al calentamiento global por parte de actividades de consumo y producción. A modo de ejemplo, los mercados del carbono (tanto de cumplimiento como voluntarios) crecen, se espera que algunos países desarrollados en los próximos años deban certificar (o incluso establecer normas respecto de) la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero generadas en la producción de cada unidad de bien (huella de carbono), entre otras iniciativas. Además, los mismos mercados progresivamente incorporan la producción con bajo impacto en carbono en sus preferencias.

Conocidas son las discusiones respecto de mitigación y adaptación de cambio climático. Diversos estudios se realizan a nivel nacional e internacional en que a partir de un análisis contrafactual se estiman reducciones de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), costos asociados a las medidas de mitigación e incluso cobeneficios. Más recientemente, los esfuerzos tienden a centrarse también en evaluar los requerimientos y costos asociados a la adaptación. Además se intentan diseñar mecanismos de financiamiento a las estrategias de mitigación y adaptación.

Latinoamérica a pesar de aportar poco en términos relativos a las emisiones globales debe contribuir con la mitigación de GEI. Los países de la región deben planificar con antelación la estrategia de reducción de emisiones de GEI para alcanzar sus objetivos y honrar sus compromisos, pero al menor costo social posible.

Es por ello que este estudio tiene como propósito desarrollar y aplicar una metodología de curvas de abatimiento, pero revisando primero antecedentes de consumo energético, de emisiones de GEI y de metas de mitigación de distintos países de la región. El propósito de esta revisión es identificar similitudes y singularidades en las distintas experiencias.

Si bien por definición este estudio pretende analizar el sector de generación eléctrica, la revisión de antecedentes de consumo contribuye a la selección de sectores adicionales en los que Chile se tomará como caso de estudio del contexto latinoamericano. Los sectores escogidos son (1) Industria de papel y celulosa; (2) Minería del Cobre; y (3) Transporte. Los sectores han sido escogidos teniendo

en cuenta que también son relevantes en otros países de la Región¹. La metodología de construcción de curvas de abatimiento se aplicará en el caso chileno, pero quedarán las bases para que éstas sean empleadas también por otros países de la región y en sectores con desafíos similares a los chilenos.

En términos metodológicos se revisa cómo construir una curva marginal de abatimiento. Una curva de abatimiento muestra los impactos de reducción de emisiones de una medida y los costos relativos que cada una conlleva y permiten establecer un ranking entre distintas medidas de mitigación. Esta información permite a los distintos stakeholders determinar la planificación temporal de las medidas y dimensionar los esfuerzos asociados. Por otra parte, desde la perspectiva privada, de la curva se infiere el precio requerido para que un proyecto se realice y que resulte más conveniente que la inacción.

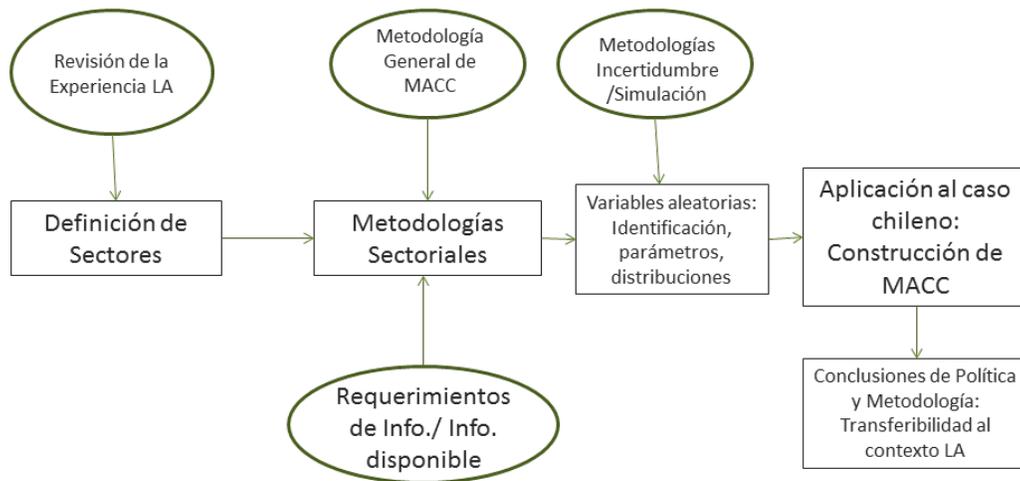
La contribución principal del estudio a otros realizados en el país es extender la metodología usual de construcción de una curva marginal de abatimiento para incorporar la incertidumbre inherente de las variables asociadas a los costos, beneficios y emisiones de cada medida. La importancia de la incorporación explícita de la incertidumbre está en enriquecer el conocimiento del tomador de decisiones.

De esta manera, en un marco conceptual de costo beneficio se establecerán métricas de valor presente (o de algún equivalente de costo anual) por tonelada de reducción y se establecerá su distribución de probabilidad. Esto se realizará a través de metodologías usuales de simulación. El incorporar la incertidumbre ayuda además a ordenar y explicitar los supuestos que permiten realizar los cálculos de costos por opción de abatimiento.

La figura siguiente resume las principales etapas y productos del estudio. De la revisión de la experiencia latinoamericana se definen sectores para ser estudiados en el caso chileno. En este sentido, para cada sector y a partir de la metodología general, se definen metodologías específicas de evaluación de medidas de mitigación. Estas metodologías se enriquecen incorporando aleatoriedad a la evaluación al identificar y caracterizar distintas variables estocásticas relevantes para su posterior simulación. Finalmente, la metodología se aplica al caso chileno para construir una curva marginal de abatimiento con los sectores escogidos, incorporando la incertidumbre en el análisis. Esta curva permite obtener conclusiones de política y, por otra parte, de su proceso de construcción pueden inferirse recomendaciones metodológicas para la aplicación en otros contextos.

¹ Varios países cuentan con industria de papel y celulosa. La minería del cobre, también muy presente en Perú, puede asimilarse a otras actividades mineras en la región. El transporte es un desafío de las principales ciudades de todos los países de la región.

Figura 1: Resumen del Estudio



Fuente: Elaboración propia.

1.2 CONTENIDOS DEL INFORME

El objetivo general del estudio es desarrollar una metodología para la elaboración de curvas de abatimiento de gases de efecto invernadero para el sector de demanda energética, incorporando la incertidumbre asociada a las variables involucradas en la estimación de los costos marginales de abatimiento. Posteriormente, esta metodología será aplicada en un caso de estudio al sector de generación eléctrica y a tres sectores de la demanda. Los capítulos de este informe son un paso necesario para cumplir con el objetivo de desarrollar una metodología específica y realizar una aplicación.

En particular, el capítulo 2 presenta la definición de los conceptos de incertidumbre y riesgo, además de mostrar por qué es importante incorporar la incertidumbre en la toma de decisiones y las opciones para ello. Para ello se consideran las alternativas de uso de escenarios (análisis simple de sensibilidad) y simulación.

El capítulo 3 define y presenta resumidamente los fundamentos de construcción de una curva de costo marginal de abatimiento. Para ello, se explica de manera general la metodología más conocida desarrollada por McKinsey & Co. (2009).

El capítulo 4 presenta una descripción de los consumos energéticos de un grupo de 6 países latinoamericanos, además se incluye la última información disponible contenida en las comunicaciones nacionales sobre cambio climático, respecto a emisiones de GEI en el sector energético. El objetivo de este capítulo es poder seleccionar sectores importantes en relación a sus emisiones de GEI, para la evaluación de medidas de mitigación.

El capítulo 5 define y presenta el marco metodológico general de cómo deben ser analizadas las medidas de mitigación, entregando un enfoque para la modelación energética, y enfoques de modelación para el levantamiento de la información requerida para la construcción del modelo. Es

importante destacar el uso de distintos enfoques usados para el levantamiento de la información y la asignación de su incertidumbre, lo que enriquece aún más el análisis metodológico para la replicación de este ejercicio en otros países de Latinoamérica.

En el capítulo 6 se presenta la metodología de elaboración de curvas de abatimiento de gases de efecto invernadero en el sector generación de energía. Ello incluye una aplicación de la metodología en la caracterización de variables estocásticas en el sector generación de energía eléctrica y la elaboración de la curva de abatimiento con incertidumbre del sector generación de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Central de Chile, incluyendo un Análisis de Sensibilidad de las variables consideradas en el modelo.

En el capítulo 7 se presenta un análisis de disponibilidad de información y metodologías para el levantamiento de opciones de mitigación para los sectores de transporte, minero del cobre e industrial de papel y celulosa, situándose en el caso chileno. Aquí se realiza un catastro de fuentes relevantes para la evaluación de las medidas de mitigación, y un análisis de debilidades en cuanto a la información disponible. Parte del contenido de este capítulo es el levantamiento de valores potenciales para las variables relevantes. En este caso se considerarán penetraciones, potenciales y costos, y otros aspectos técnicos relevantes, manteniendo un enfoque de incertidumbre frente a las principales variables clave y presentando dichas variables con la incertidumbre a ser considerada para el ejercicio

En el capítulo 8 se construyen las curvas de abatimiento y se presentan los resultados, haciendo un análisis breve de las particularidades de los mismos.

Finalmente, en el capítulo 9 se entregan comentarios y conclusiones respecto a la aplicación de esta metodología y de los resultados de este ejercicio.

2 INCERTIDUMBRE EN LA TOMA DE DECISIONES

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

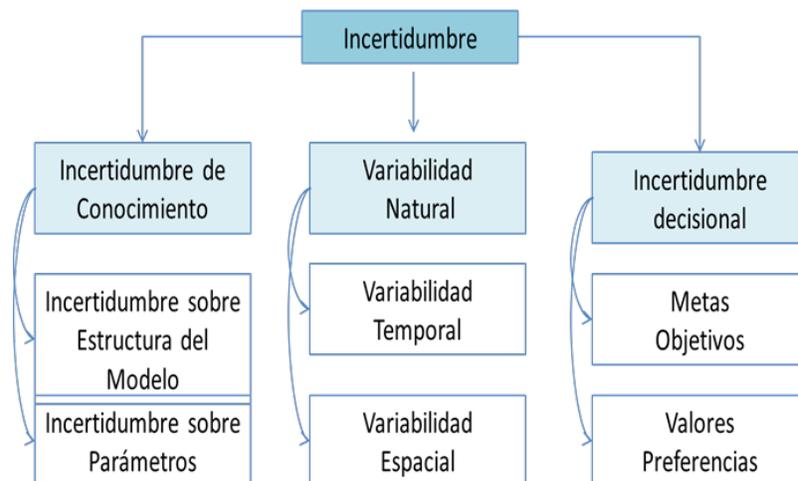
El propósito central en la toma de decisiones, y en la formulación y análisis de políticas, es identificar los factores relevantes y fuentes de desacuerdos en un problema, de tal forma de poder anticipar lo inesperado. El tratamiento consciente de la incertidumbre nos obliga a pensar más cuidadosamente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

En esta sección se definen los conceptos de incertidumbre y riesgo. Además se muestra por qué es importante incorporar la incertidumbre en la toma de decisiones y las alternativas para ello.

2.1 INCERTIDUMBRE

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

Figura 2: Una Clasificación de Tipos de Incertidumbre



Fuente: Water Resources Systems Planning and Management –UNESCO.2005.

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

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

En el anexo A.1 se discute con mayor detalle respecto de fuentes de incertidumbre, formas de clasificarla y la importancia de tomarla en cuenta en la toma de decisiones.

2.2 RIESGO

Existe un sinnúmero de definiciones de riesgo. La definición usual define el riesgo como la posibilidad (probabilidad) de ocurrencia de un evento adverso. Por el contrario, el concepto de incertidumbre se relaciona con indeterminación, indefinición o desconocimiento. La incertidumbre no conlleva el juicio de valor de definir el evento adverso.

Mientras algunas definiciones de riesgo se centran en la probabilidad de ocurrencia de un evento, otras incorporan tanto esta probabilidad de ocurrencia como las consecuencias de este evento. Por ejemplo, a pesar que la probabilidad de ocurrencia de un terremoto fuerte sea baja para un día cualquiera, el evento terremoto se considera de alto riesgo por sus impactos.

En un contexto de toma de decisiones, se debe reducir la incertidumbre y duda respecto de las alternativas para tomar una elección razonable entre ellas. El riesgo es no tomar la decisión adecuada en términos de las pérdidas asociadas (por ejemplo, monetarias).

En resumen, la incorporación de incertidumbre en la toma de decisiones enriquece enormemente el análisis, entregando información y análisis mejorados respecto de las evaluaciones o modelaciones desarrolladas determinísticamente y lineamientos acerca de dónde invertir mejor los recursos para mejorar la calidad de la información.

2.3 EL CRITERIO DE LOS VALORES MEDIOS

Un modelo que aplica directamente los “valores más probables” o “promedio” tiene importantes limitaciones. La probabilidad que el resultado de la variable de interés se iguale a la estimación usando valores promedio es prácticamente nula. Pero más importante se ignora el riesgo de equivocarse². No hay que preocuparse del promedio sino que del tamaño, frecuencia y causas de las variaciones [Fung, 2010].

² Esta sección se basa en contenidos disponibles en <http://www.strategy-at-risk.com/2011/03/01/plans-based-on-average-assumptions/>

Un ejemplo simple muestra cómo el ignorar la incertidumbre y utilizar valores medios puede llevar a decisiones incorrectas. Un agente tiene la posibilidad de invertir 5 y su retorno esperado es 10, por lo que obtiene una ganancia neta esperada de 5. Si el agente sólo considera este criterio entonces invierte.

Si el retorno esperado se construye a partir de una binomial en que con probabilidad 0,01 obtiene 1000 y con probabilidad 0,99 obtiene 0. Con probabilidad 0,99 el agente obtiene una renta neta de -5. La decisión de invertir ya no parece ser tan acertada para cualquier agente adverso al riesgo.

Este ejercicio sencillo revela cómo la ignorancia de la incertidumbre conlleva altos riesgos de tomar una decisión equivocada.

2.4 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE

Para mejorar la toma de decisiones debe tratarse la incertidumbre. Existen distintas alternativas para considerarla. En este documento se distinguen dos de las opciones más utilizadas para ello: El Uso de Escenarios/ Análisis de Sensibilidad y Análisis de Incertidumbre/Simulación.

Uso de Escenarios/ Análisis de Sensibilidad

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

Además del escenario valor medio, suelen construirse escenarios asociados al mejor y peor caso tomando el menor peor o mejor valor que cada variable puede tomar. Sin embargo, no es necesariamente cierto que la evaluación del peor caso en cada variable entregue el peor resultado a la salida del modelo³.

A pesar de las limitaciones de este enfoque, su uso permite establecer análisis exploratorios. El análisis de sensibilidad también permite identificar como los valores de salida cambian ante modificaciones en los valores de entrada. Por lo anterior, ante la incapacidad de desarrollar análisis

³ Para ilustrar el punto, en <http://www.strategy-at-risk.com/2011/03/01/plans-based-on-average-assumptions/> se muestra que la distribución conjunta de la suma de dos variables aleatorias normales e independientes $X+Y$ no coincide con la suma de las distribuciones de X y de Y para valores que se alejan de los valores esperados de las variables.

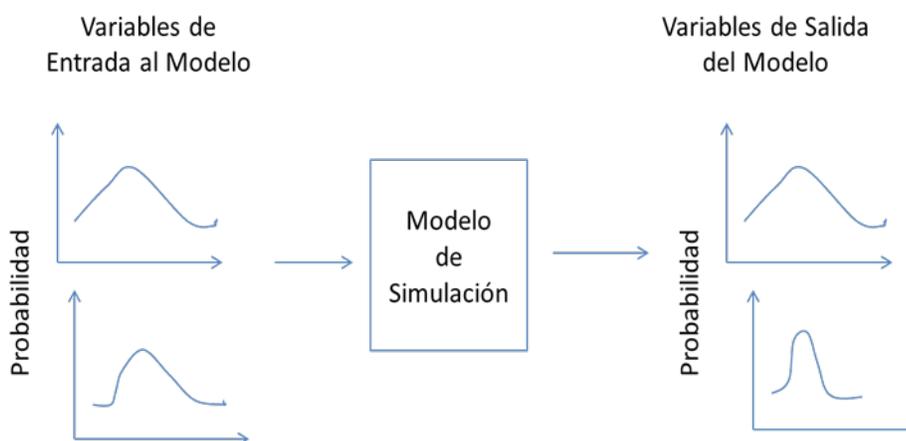
de incertidumbre formales, siempre es recomendable sensibilizar las variables principales mediante el uso de escenarios.

Análisis de Incertidumbre/Simulación

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

La simulación permite construir modelos de los resultados posibles asociados a valores distintos que pueden tomar ciertas variables. A cada variable que conlleva incertidumbre entonces se le asocia una distribución de probabilidad. Al utilizar distribuciones, las variables pueden asignar distintos pesos a eventos diferentes. Los valores de las distintas variables aleatorias entran a un modelo (función de transformación) para obtener la distribución de variables de salida (resultados). La figura siguiente esquematiza el análisis de incertidumbre realizado en una simulación.

Figura 3: 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 crítico⁴.

Ejemplo de Simulación: Análisis de Incertidumbre en Valor Presente Neto VPN de un Proyecto

El análisis de incertidumbre en la estimación del VPN de un proyecto de inversión es un caso particular de simulación. Se calcula el beneficio del Proyecto V_t en periodo $t=1, \dots, T$. Generalmente la

⁴ También permite realizar inferencia formal. Estimación de media, varianza, ajuste de una distribución, entre otros.

función de beneficios es una función compleja en que tanto los ingresos R_t como costos C_t dependen de varias variables inciertas. Si existen N factores que afectan ingresos y costos, el valor del proyecto en el periodo t es:

$$V_t = V_t(X_{1t}, \dots, X_{Nt}) = R_t(X_{1t}, \dots, X_{Nt}) - C_t(X_{1t}, \dots, X_{Nt})$$

Donde X_{1t}, \dots, X_{Nt} denotan las variables que determinan ingresos y costos.

De esta forma, el Valor Presente Neto se expresa como:

$$VPN = VPN(V_1, \dots, V_T) = \sum_{t=1}^T \frac{V_t}{(1+r)^t} - I_0$$

Donde I_0 representa los costos de inversión (CAPEX).

El modelo de simulación asume que las variables $M < N$ son aquellas que más inciden en los ingresos y/o costos. De esta manera el modelo entrega simulaciones $X_{1t}^b, \dots, X_{Nt}^b, t = 1, \dots, T, b = 1, \dots, B$ donde B es el número de corridas de la simulación. Los valores simulados del valor presente son:

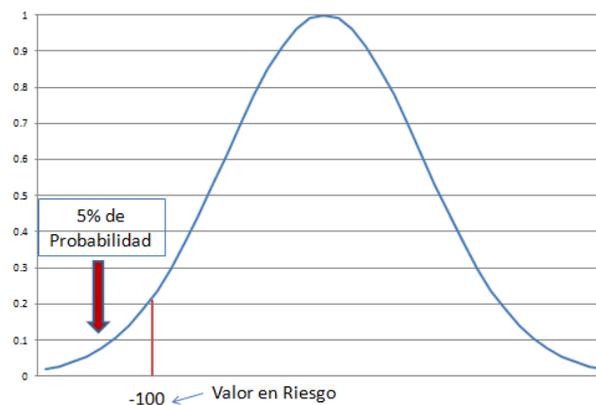
$$VPN^b = VPN(V_1^b, \dots, V_T^b), b = 1, \dots, B$$

$$\text{Donde } V_t^b = R_t(X_{1t}^b, \dots, X_{Mt}^b) - C_t(X_{1t}^b, \dots, X_{Mt}^b)$$

En la interpretación de los resultados además de las distribuciones de las variables de salida, es relevante considerar una medida de riesgo de la volatilidad. Por ejemplo, si una firma tiene la opción de invertir en dos proyectos con el mismo VPN (y usando la misma tasa de descuento), resulta razonable escoger primero el proyecto con menor volatilidad de los flujos de caja.

En este contexto puede resultar útil una métrica tipo "Value at Risk" o VaR del VPN. El VaR representa el monto máximo que se podría perder para un nivel de confianza definido, ese monto máximo tiene asociado una probabilidad de perder. Es de aplicación usual utilizar un VaR de 95%. La figura siguiente muestra un ejemplo en que con un 95% de confianza la pérdida es de a lo más 100.

Figura 4: Ejemplo de "Value at Risk"



Fuente: Elaboración propia

En los anexos se entregan mayor detalle en los puntos siguientes:

- Conceptos de Incertidumbre y Riesgo (Se discuten con mayor profundidad alternativas de clasificación de incertidumbre y consideraciones clave asociadas a la toma de decisiones). Anexo A.1.
- Modelación de la Propagación de Incertidumbre (Formaliza matemáticamente el proceso de simulación). Anexo A.2.
- Técnicas de Muestreo (Importante para lograr eficiencia computacional en corridas de simulación). Anexos A.3 y A.4.
- Elección de Distribuciones de Variables de Entrada (Muestra las alternativas de asignación de distribuciones para las variables de entrada y que determinarán las salidas). Anexo A.5.
- Correlación entre las Variables de Entrada (Consideración metodológica relevante para mejorar consistencia de las estimaciones). Anexo A.6.

3 CURVA DE COSTOS MARGINALES DE ABATIMIENTO

Chile se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI. Para ello, debe determinar una estrategia de reducción que le permita cumplir sus compromisos pero sin afectar el crecimiento económico. En la práctica debe determinar qué conjunto de medidas de mitigación impulsar para tal propósito.

Una herramienta que es utilizada en este contexto de costo beneficio (o costo efectividad) es la curva de costos marginales de abatimiento (MACC), la que permite comparar los costos y potencial de reducción de emisiones de distintas medidas de mitigación.

3.1 DEFINICIÓN DE UNA CURVA DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO

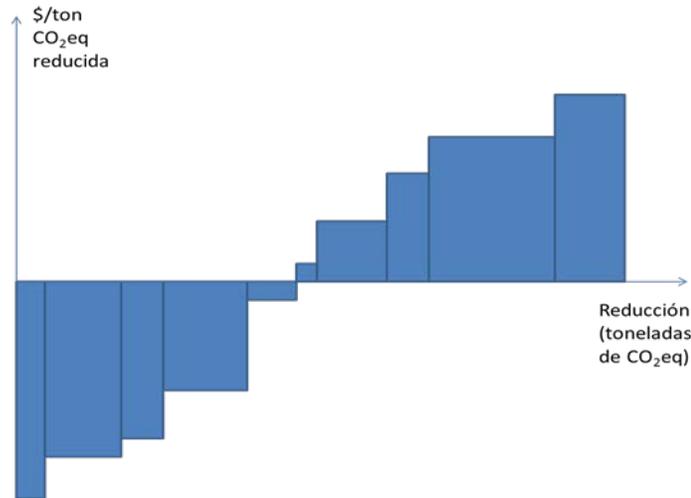
Una curva de costos marginales de abatimiento se define como un gráfico que indica el costo, generalmente en \$/ton de CO₂, asociada con la última unidad (costo marginal) de emisión abatida para distintas cantidades de emisiones reducidas. Por lo tanto, debe ser definida una línea base sin restricciones de CO₂ con el fin de evaluar el costo marginal de reducción relativo a la línea base. Una curva MAC permite analizar el costo de la última unidad abatida de CO₂ para un nivel de reducción definido, a la vez que presenta el costo total de abatimiento a través de la integral de la curva de costos de mitigación.

La curva de abatimiento es una representación gráfica de los costos de abatimiento de una cartera de opciones de mitigación junto a sus potenciales de mitigación, en ella se pueden observar las distintas opciones ordenadas ascendentemente de acuerdo al costo unitario de abatimiento. De esta forma la curva presenta de forma sintética la información relevante para poder evaluar y comparar los efectos de distintas medidas, considerando además que estas pueden ser agrupadas sectorialmente.

Los ejes de la curva combinan el costo de abatimiento que representan las medidas técnicas disponibles y su impacto relativo. Este impacto relativo corresponde al potencial de reducción del volumen de emisiones de gases de efecto invernadero de cada medida. La reducción mide de manera contrafactual (se compara la medida al caso BAU ("*business-as-usual*" o caso de referencia).

La siguiente figura presenta la forma de una curva de costos de abatimiento típica. Cada barra/rectángulo se asocia a una medida (al nivel de agregación definido por el modelador). El ancho de cada barra se interpreta como el *potencial* de reducción de emisiones asociadas a una medida dada. El potencial refleja la capacidad instalada de activos total de esa medida de abatimiento en el año del análisis, independiente de cuando esta capacidad ha sido construida. La altura de cada barra representa el costo promedio de evitar una tonelada métrica de tCO₂e en el año de análisis para cada oportunidad. El costo refleja la capacidad activa total de esa oportunidad, de este modo es la media ponderada a través de las sub-oportunidades, regiones y años.

Figura 5: Principales dimensiones de la curva de costos de abatimiento



Fuente: Elaboración propia

Para asegurar comparabilidad a través de sectores y fuente, todas las emisiones y sumideros han sido medidos en una manera común, usando medidas de CO₂ equivalentes en toneladas métricas (tCO₂e). En general, para cada medida se entrega un indicador de costo que muestra cuánto es posible reducir en un año.

El orden de mérito de las medidas de abatimiento está basado en las medidas con los menores costos (en \$ por tCO₂e). A pesar de llamarse curva de costo marginal de abatimiento, el término “marginal” se debe al ordenamiento creciente de las medidas. Para cada medida, en la construcción de una curva de abatimiento experta, se asocia un costo medio que es independiente de la cantidad de emisiones reducida.

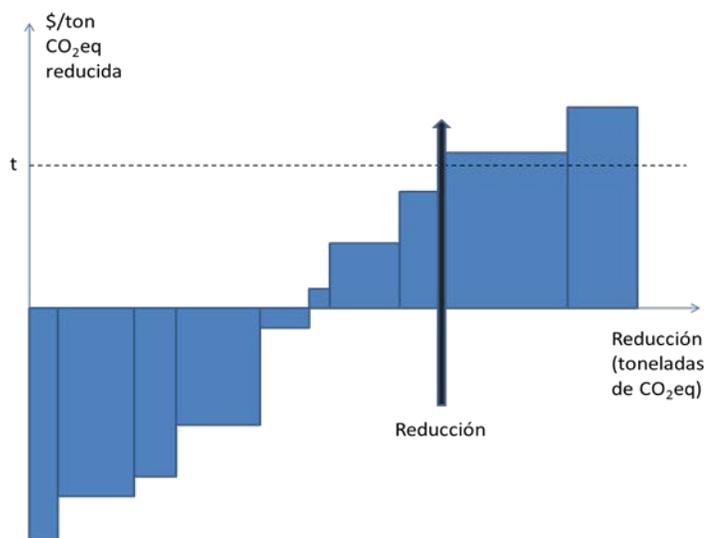
De acuerdo con la metodología utilizada, las curvas de MAC se pueden dividir en curvas basadas en opinión experta y curvas derivadas de modelos [Kesicki F. 2010 (a)]. Las curvas basadas en opinión experta evalúan el costo y potencial de mitigación de cada medida de abatimiento basado en consulta a expertos, mientras que las curvas derivadas de modelos se basan en cálculos de modelos energéticos o de otro tipo. Países como Estados Unidos y Europa cuentan con modelos de equilibrio general computable en que típicamente se ha medido el impacto de elevar el costo al carbono.

En este estudio nos centraremos en el **enfoque basado en opinión experta**, también llamado curva de costos tecnológicos. Este enfoque toma como base supuestos desarrollados por expertos para el desarrollo de la línea base de emisiones de CO₂, el potencial de reducción de emisiones y el correspondiente costo de las medidas individuales. Posteriormente, las medidas son explícitamente ordenadas desde la más económica a la más costosa, representando el costo de lograr niveles crecientes de reducción de emisiones.

Este tipo de curvas tampoco permite analizar instrumentos económicos como impuestos (de precio) o sistemas de permisos transables (de cantidad). Las curvas de abatimiento sí entregan una idea general de la cantidad a reducir frente a algún precio del carbono (como el nivel de impuesto t en la

figura siguiente). Alternativamente, ante la definición de una meta de reducción es posible establecer el precio que habría que asignarle al carbono para lograr tal nivel de abatimiento.

Figura 6: Interpretando la Curva de Abatimiento



Fuente: Elaboración propia

La curva de abatimiento puede construirse de acuerdo a una perspectiva privada o social. Desde la perspectiva privada se incorporan sólo las componentes de costos y beneficios que afectan directamente al desarrollador del proyecto y éste último define en su tasa de descuento la renta exigida de su iniciativa. En el caso social se utiliza una tasa de descuento social y existe la posibilidad de incorporar componentes de costos externos.

3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CURVAS DE ABATIMIENTO

La principal ventaja de las curvas basadas en opinión experta es que son fáciles de entender. En general, los costos marginales y el potencial de reducción pueden ser claramente asignados a una opción de mitigación. Además, los detalles tecnológicos pueden ser muy amplios, dependiendo del refinamiento del estudio.

Las curvas basadas en opinión experta suelen mostrar el potencial tecnológico de las medidas de mitigación. Las curvas de abatimiento que se basan en la opinión de los expertos, consideran cada tecnología posible por separado. Sin embargo, presentan un potencial de reducción máxima, ya que no consideran aspectos de comportamiento, ni barreras institucionales o de ejecución. Aspectos de comportamiento, como cambios en la demanda por ajustes del precio de los energéticos, y los efectos de rebote producidos por una demanda energética creciente en el caso de mejoras de eficiencia, son explicados por ajustes exógenos de la demanda de referencia. El incumplimiento de las imperfecciones del mercado es una razón para la representación de los costos de abatimiento negativo, es decir, medidas de mitigación que pueden al mismo tiempo ahorrar dinero. Sin embargo,

este ahorro sólo se puede realizar una vez que son superadas las distorsiones del mercado. Por ejemplo, en el sector residencial, estas distorsiones pueden tomar la forma de incentivos divididos⁵, la falta de información y pagos significativos por adelantado se asocian con un largo período de recuperación.

Ciertas curvas cubren algunos de los aspectos antes mencionados mediante la simplificación de la realidad. Aunque no es plausible asignar un solo nivel de costos de una tecnología, esto es una simplificación que se hace a menudo en muchas curvas. Además, para muchas fuentes de energía renovables, como la fotovoltaica o la eólica, se deben incorporar más detalles en la forma de medir los costos dependiendo de la ubicación de las capacidades de generación, y las condiciones ambientales. Además, los estudios basados en juicio experto consideran sólo una selección de las tecnologías existentes, por ejemplo, de acuerdo con la probabilidad de realización, lo que puede excluir tecnologías prometedoras en el futuro. Para los estudios sectoriales, por ejemplo, el sector del transporte, un problema puede surgir cuando los costos de mitigación se implementan desde distintas perspectivas de los tomadores de decisión, lo que significaría que una acumulación de los costos de mitigación en todos los sectores no está correctamente aplicada [Kesicki F. 2010 (b)].

Otra desventaja de las curvas de costo basado en juicio experto son las posibles inconsistencias en los supuestos de la línea base. Así ocurre, por ejemplo, para los supuestos en el caso de referencia. El cálculo del costo marginal y el potencial de abatimiento se realizan en comparación a un desarrollo de referencia. En este contexto, es importante adaptar el escenario de referencia en la medida en que las opciones más económicas de reducción ya han sido implementadas con el fin de evitar la doble contabilización.

El problema más importante es la no consideración de los diferentes tipos de interacciones. Una de ellas es la interacción intertemporal de reducción de emisiones. La trayectoria de la mitigación de emisiones, es decir, la cantidad disminuida y el camino de reducción de emisiones antes y después del punto considerado en el tiempo tiene un impacto significativo en la curva de reducción debido a la posible reducción de costos causados por el aprendizaje tecnológico. Por otra parte, las curvas basadas en opinión experta no son capaces de capturar adecuadamente las interacciones entre las medidas de reducción, las dependencias de la economía en general y las interdependencias de comportamiento. Consecuencias de un mayor uso de electricidad en el sector del transporte, producida en la matriz de generación eléctrica, no se puede integrar en una evaluación que se basa en medidas individuales.

3.3 ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO

En la construcción más usual y famosa, el costo de abatimiento se mide a través del costo anualizado o costo anual equivalente (CAE) de diferentes medidas en un año dado, por cada tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) evitada en comparación al escenario base o BAU (Business as usual).

⁵ Incentivos divididos describe la situación donde un arrendatario tiene incentivos a mejorar la aislación térmica de su hogar para reducir sus gastos energéticos, pero es el dueño del inmueble quien debe incurrir en estos costos sin recibir los beneficios que conllevan.

Esta métrica permite comparar la costo-efectividad de opciones de mitigación con distinta vida útil [McKinsey & Co. 2009].

$$CAE = VPN \cdot FRC$$

$$FRC = \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right]$$

Con

Donde:

CAE : Costo anual equivalente.

FRC : Factor de recuperación del capital.

VPN : Valor presente neto de todos los costos del proyecto.

r : Tasa de descuento.

n : Numero de periodos del proyecto, o vida útil del activo.

El valor presente neto de los costos debe incorporar todos los flujos que genere el proyecto a lo largo de su vida útil, estos pueden ser costos de inversión, costos de capital, gastos de operación y mantenimiento, costos transaccionales, impuestos, externalidades, etc.

Luego, el costo de abatimiento viene dado por la siguiente fórmula, la que representa la diferencia entre el costo de reducir una tonelada de CO₂, si se desarrolla una opción de mitigación, versus el escenario BAU.

$$\text{Costo de abatimiento} = \frac{CAE_{\text{opcion}} - CAE_{\text{BAU}}}{Emisiones_{\text{opcion}} - Emisiones_{\text{BAU}}} \text{ [$/tCO}_2\text{]}$$

La diferencia de emisiones entre ambos escenarios se define como el potencial de abatimiento de la opción de mitigación.

Los anexos A.7, A.8 y A.9 permiten profundizar en los temas siguientes respectivamente:

- Curvas de abatimiento derivadas de modelos.
- Análisis Costo Beneficio. Distinciones entre evaluación privada y social. Inclusión de efectos externos.
- Tratamiento de la Tasa de Descuento. Tema clave en el análisis costo beneficio y especialmente debatido en el contexto cambio climático.

4 ANÁLISIS DE SECTORES DE CONSUMO ENERGÉTICO

La selección de sectores se lleva a cabo de acuerdo al peso específico que tienen los potenciales sectores de estudio en Latinoamérica. Para ello se desarrolla un análisis energético para un grupo de 6 países latinoamericanos, la selección de éstos es principalmente la importancia en cuanto al consumo energético dentro de la región.

Los países seleccionados son:

- Argentina
- Brasil
- Chile
- Colombia
- México
- Perú

El análisis se basa en los balances energéticos nacionales, los cuales describen el consumo energético de los distintos sectores de la economía, pudiendo identificar en la medida que la información esté suficientemente desagregada, los sectores más relevantes en cuanto al consumo energético.

Una segunda componente del análisis proviene de la revisión de las comunicaciones nacionales para la convención marco de las naciones unidas para el desarrollo, estos permiten considerar otras fuentes de gases de efecto invernadero en el análisis, además obtener una mirada de las estrategias nacionales en cuanto a los sectores de estudio, que oriente sobre las potenciales medidas de mitigación relevantes para la región.

El análisis se lleva a cabo sólo para el sector energía, excluyendo el sector transformación y su autoconsumo. Esto último asegura la comparabilidad entre los balances energéticos ya que su estructura difiere de un país a otro.

A continuación se muestra un resumen compacto con las principales resultados del análisis. El detalle de la caracterización de los países se encuentra en el anexo A.10.

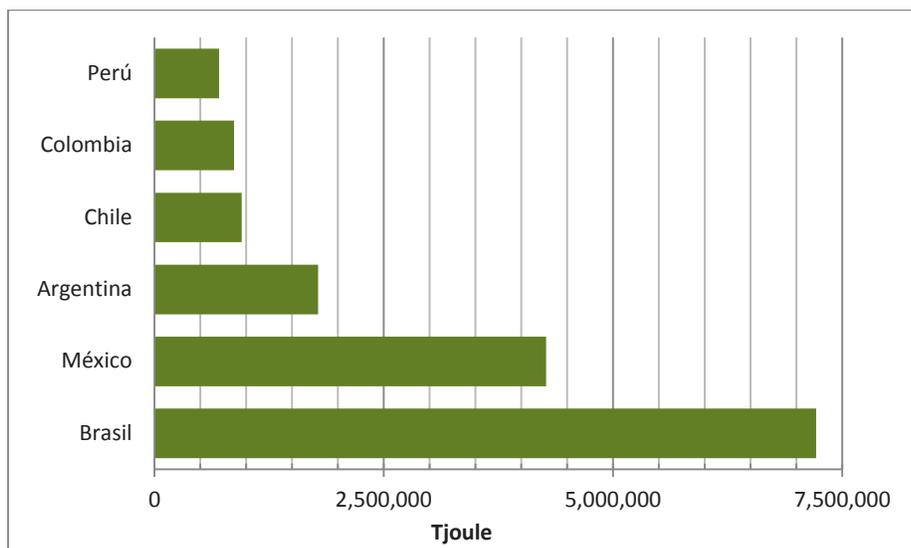
4.1 RESUMEN

El análisis del consumo energético de los países analizados permite establecer las comparaciones que describan de mejor manera el comportamiento energético de la región.

En primer lugar se observa un consumo dispar entre los países estudiados, principalmente basado en la diferencia entre los tamaños de las economías, poblaciones y territorios. Por ejemplo Brasil presenta una demanda final de energía seis veces superior a Chile, esto se observa en la 6. Un indicador más interesante en materia energética es la intensidad energética. Esta describe las unidades energéticas necesarias para generar una unidad de producto, y permite establecer comparaciones entre los países. En la Figura 8 se aprecia este indicador para los países analizados. La

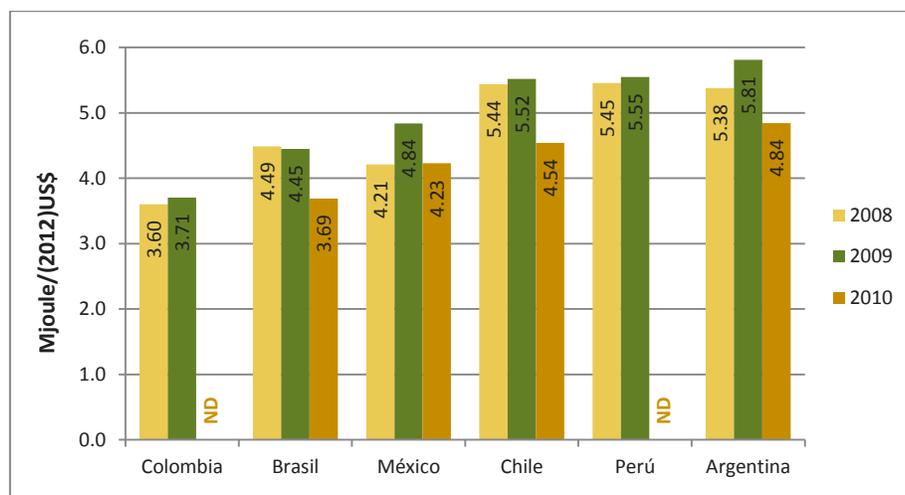
menor intensidad energética se da en Colombia seguido de Brasil, de lo que se concluye un mayor grado de eficiencia de dichas economías. Por otro lado la economía menos eficiente entre los países analizados es la Argentina llegando el año 2010 a 4,84 MegaJoule de energía final consumida por cada dólar del Producto Interno Bruto de dicho año.

Figura 7: Demanda final de energía 2009



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía 2009.

Figura 8: Intensidad energética de consumo final (Mjoule/(2012)US\$)

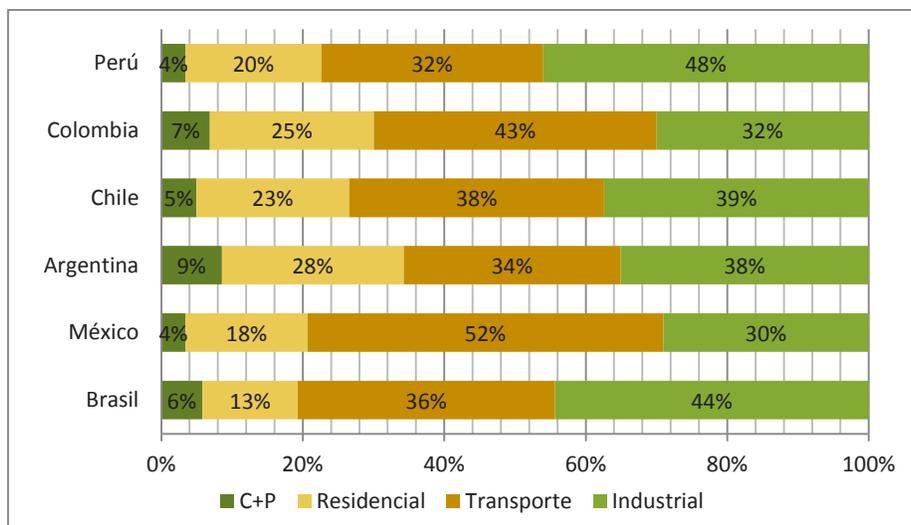


Fuente: Elaboración propia sobre la base de balances nacionales de energía 2008-2010 y el Banco Mundial.

En la mayoría de los países se observa que los sectores más significativos en cuanto a la demanda final de energía son los sectores industrial y transporte, este último en claro crecimiento durante los últimos años, lo que lo perfila como el principal demandante energético a corto plazo, superando al

sector industrial. Una excepción es el caso argentino en el cual el transporte está por debajo del consumo agregado de los sectores comercial, residencial y público. La Figura 9 ilustra este resultado.

Figura 9: Distribución de la demanda final de energía 2009



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía 2009.

El sector de transporte está dominado principalmente por el transporte caminero el cual en general consume cerca del 90% de la energía del sector. Sin embargo la distribución del consumo energético en la industria es mucho más heterogénea entre los países de la región.

En el siguiente cuadro se señalan los sectores más importantes para la demanda final de energía.

Cuadro 1: Principales sub-sectores industriales en los países con información disponible.

Sectores claves de la industria	País	Promedio de participación en el consumo energético industrial
Alimentos y bebidas	Brasil	27%
Hierro fundido y Acero	Brasil	20%
Papel y celulosa	Brasil	11%
Químico	Brasil	9%
Minería del cobre	Chile	31%
Papel y Celulosa	Chile	20%
Resto minería	Chile	7%
Alimentos y Tabaco	Colombia	22%
Cemento	Colombia	20%
Químico	Colombia	12%
Papel e Imprenta	Colombia	10%
Hierro y Acero	Colombia	9%
Siderurgia	México	14%
Cemento	México	10%
Minero Metalúrgico	Perú	30%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía 2007-2010.

Se observa que los sectores que más se repiten, en 3 ocasiones, son el sector minero y el sector paplero, con participaciones muy superiores del sector minero. Posteriormente, 2 apariciones de los sectores Hierro y Acero, Alimentos, cemento, y el sector químico, con una mayor participación para el sector alimenticio.

En particular, el sector minero tiene una tendencia creciente en cuanto al consumo energético, esto es producto del aumento de la intensidad energética del sector lo cual es consecuencia del agotamiento de las vetas, o de la explotación de vetas que se encuentran más alejadas de los centros de procesamiento originales, entre otros factores estructurales de la industria minera.

En conclusión, los sectores más relevantes para el análisis de medidas de mitigación de acuerdo a los datos de los países latinoamericanos analizados son en primer lugar el sector transporte, centrando la atención en el transporte caminero. Posteriormente se encuentra el sector minero, potenciado principalmente por las industrias mineras de Perú y Chile. El tercer sector es de más difícil selección y está dividido entre el sector paplero y la industria de alimentos.

El análisis de opciones de mitigación está subscrito a la importancia de los sectores en la demanda final de energía, pero también debe obedecer a la estandarización de los sectores. Sectores poco homogéneos en sus procesos y productos generan muchas medidas potenciales pero sin un valor agregado tan importante en el potencial mitigación de GEI. Adicionalmente esto puede ser cubierto por medidas transversales en la industria, convocando un mayor potencial de mitigación. Por ejemplo medidas como cogeneración, recambio de motores, o recuperación de energía son aplicables a la mayoría de los subsectores industriales, por lo que tienden a ser mucho más relevantes y con un potencial muy superior de abatimiento de gases de efecto invernadero. Factores como los mencionados sugieren que el tercer sector seleccionado sea el paplero

5 REVISIÓN GENERAL DE ENFOQUES METODOLÓGICOS

A continuación se presentan brevemente los enfoques de modelación a ser considerados para la cuantificación de los costos y efectos de medidas de mitigación en el sector energía y en particular en los sectores transporte e industria y minería; sectores en donde se indagará más específicamente en el capítulo 7, y los cuales se han escogido preliminarmente, ya que excluyendo el sector de generación eléctrica, son los más intensivos en consumo energético y emisiones de GEI en la región.

5.1 ENFOQUES DE MODELACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN

La modelación de las opciones de mitigación resulta crucial para la adecuada evaluación de distintas medidas. Generalmente, los reguladores utilizan estudios de escenarios para evaluar ex-ante los efectos potenciales de elecciones de política particulares. En el caso de medidas de mitigación, estos escenarios se construyen usando distintos enfoques metodológicos. Todos los modelos presentan virtudes y limitaciones.

Existen alternativas para analizar las relaciones entre consumos de energía y variables económicas como la producción, los precios y las emisiones. En este sentido existen enfoques metodológicos alternativos para analizar estas relaciones. Según UNFCCC (2008)⁶ las principales categorías de modelos son “top-down” y “bottom-up”.

En efecto, por un lado existen los modelos económicos de corte macroeconómico, que se conocen como “top-down”. En este caso destacan los modelos de equilibrio general computable que disponen de una importante consistencia con la teoría económica. También se cuenta con modelos de tipo econométricos que permiten incorporar de manera sistemática la información histórica disponible. Estos enfoques resultan útiles para examinar impactos macroeconómicos y fiscales asociados a la mitigación de GEI. Son especialmente útiles para analizar instrumentos económicos como impuestos al carbono o sistemas de permisos transables.

Por otro lado, se encuentra el enfoque asociado a los modelos microeconómicos conocidos como “bottom up”. Estos modelos disponen de una fuerte base de ingeniería y en muchos casos se especifican los requerimientos energéticos de equipos y maquinarias para determinar el consumo energético y las emisiones correspondientes. Puede asociarse un factor de emisión a cada proceso por tipo de combustible, existiendo desagregaciones por industria. Este tipo de enfoques es útil para estudiar impactos sectoriales y tecnológicos.

⁶UNFCCC. RESOURCE GUIDE MODULE 4: MEASURES TO MITIGATE CLIMATE CHANGE (2008).

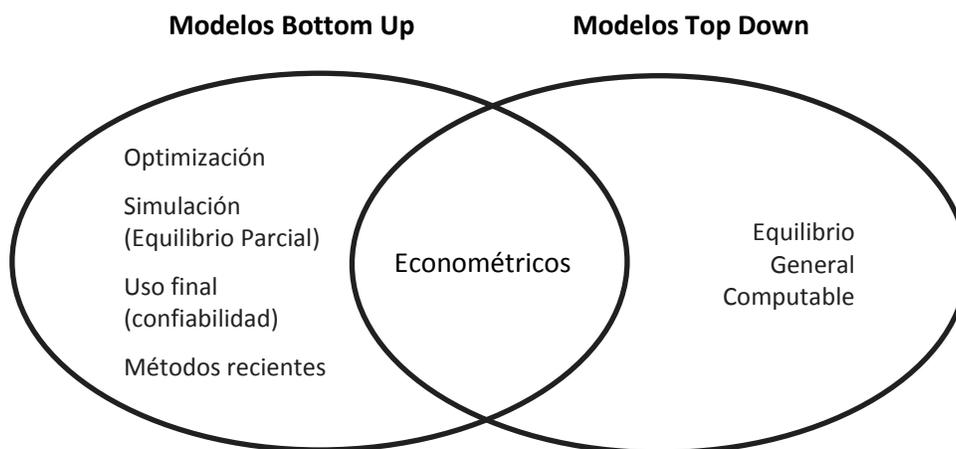
Cuadro 2: Comparación entre modelos "Top-Down" y "Bottom-Up"

Top-down	Bottom-Up
Usa datos económicos agregados	Usa datos detallado es combustibles, tecnologías y políticas
Evalúa costos/beneficios a través de impactos en producción, ingreso, PIB.	Evalúa costos/beneficios de tecnologías y políticas individuales
Generalmente asume eficiencia de mercados	No necesariamente asume eficiencia de mercados, sobrepasar barreras de mercado puede resultar en ahorros energéticos costo efectivos
Captura retroalimentación e interacciones intersectoriales	Captura interacciones entre proyectos y políticas
No es un enfoque adecuado para examinar políticas tecnológicas específicas	Utilizado para evaluar costos y beneficios de programas

Fuente: Basado en UNFCCC 2005

La siguiente figura presenta los principales tipos de modelos según si son top-down o bottom-up. Se puede apreciar que los métodos econométricos pueden ser tanto bottom-up o top-down según el caso y la aplicación. En efecto, y a modo de ejemplo, es posible estimar consumos energéticos a nivel nacional o global (modelos top-down) o bien sectoriales o de una pequeña comunidad (bottom-up).

Figura 10 : Presentación de categorías principales de modelos energéticos según clasificación "Top Down" o "Bottom up"



Fuente: elaboración propia.

Según UNFCCC (2008), la falta de modelos "top-down" junto con la necesidad de evaluar proyectos individuales ha llevado a que la gran mayoría de las evaluaciones sean llevadas a cabo utilizando enfoques de tipo "bottom-up". Este será el enfoque a considerar en el desarrollo de este proyecto.

5.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN PARA ALIMENTAR EL ANÁLISIS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO

El levantamiento de la información requerida puede ser conseguido generalmente de 3 formas, dependiendo de la información disponible.

- Levantamiento de información bibliográfica: Las variables y sus proyecciones se obtienen de la revisión de bibliografía relevante. Se debe buscar en la documentación existente métodos y valores adecuados para los cálculos. Por ejemplo para proyectar precios de combustibles (precio del petróleo y el carbón) se puede recurrir a proyecciones existentes de organismos de reconocida experiencia o relevancia en el ámbito de la variable a analizar, como la Agencia Internacional de Energía (EIA), el Departamento de Energía de EEUU (DOE), entre otras. También se puede usar una cartera de medidas de mitigación, obtenidas de estudios validados, para considerar adecuadamente los parámetros requeridos para los cálculos en algún sector específico.
- Análisis de opinión experta: A menudo puede ser muy complejo definir con precisión la proyección de una variable en un año determinado, pero aún más complejo puede ser acotar el grado de dispersión de dicho pronóstico. Una buena alternativa para obtener esta información es la consulta informada a expertos. Una gran variedad de sofisticadas evaluaciones bayesiana y combinaciones de técnicas han sido usadas para llevar a cabo el análisis de la información proporcionada por expertos. En la práctica, el enfoque bayesiano tiende a ser más difícil de aplicar, ya que requiere juicios completos de la dependencia entre los expertos. Sin duda, un enfoque más simple, compatible con algunas formulaciones bayesianas, es combinar las distribuciones de los expertos usando un promedio ponderado de las densidades de probabilidad de valor entregado [Morgan y Henrion, 1990].
- Modelación técnico económica: Esto considera la utilización de herramientas estadísticas econométricas para la proyección de variables, para ello se requiere de series históricas o datos de tendencia que permitan predecir el comportamiento futuro de las variables, típicamente estos métodos permiten hacer proyecciones con un grado de variabilidad, pero siempre y cuando exista la información previa necesaria para obtener resultados con un grado de confianza significativo.

6 DESARROLLO METODOLÓGICO Y RESULTADOS DEL SECTOR GENERACIÓN ELÉCTRICA

De acuerdo a lo presentado en la sección 3 respecto a los fundamentos de la elaboración de curvas de abatimiento y de incorporación de incertidumbre en los análisis, a continuación se describe la metodología de desarrollo en el sector generación eléctrica, además de su aplicación práctica en el subsector generación de energía eléctrica en Chile.

La construcción de una curva de abatimiento considera, a nivel general, la identificación de las medidas a evaluar y la estimación de sus costos anualizados y emisiones de CO₂e, en un año determinado. Ello permite obtener el potencial de abatimiento (eje horizontal del gráfico) y el costo de abatimiento por tonelada de CO₂e reducida (eje vertical).

El potencial de Chile para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es dependiente de una serie de variables, como son el sector productivo a analizar, la intensidad de consumo energético (relacionada con la eficiencia energética) del sector, el desarrollo tecnológico, entre otras variables.

En el caso particular del sector energético chileno el potencial se obtiene de acuerdo a la capacidad de incremento de las tecnologías en el corto plazo. De esta forma los potenciales se obtienen a través de opinión experta de profesionales del Centro de Energía de la Universidad de Chile, de lo cual se deriva el potencial de abatimiento.

Considerando lo anterior, en la elaboración de la curva de abatimiento para el sector energía se analizan las opciones de reducción más costo efectivas de generación de energía eléctrica. Las medidas se presentan considerando su costo por tonelada de CO₂e reducida y su potencial de reducción al año de entrada en operación tomando en cuenta que pueden comenzar su construcción a partir del año 2012.

La metodología adoptada para el desarrollo de este análisis comprende los siguientes puntos:

- Revisión de literatura internacional, en particular estudios que ya han evaluado el potencial de reducción de una serie de medidas en distintos sectores productivos.
- Consulta a expertos nacionales⁷ respecto a tecnologías, costos, niveles de emisión, factibilidad, aplicabilidad, aceptabilidad y adaptación de las tecnologías, etc.
- Establecimiento del costo de la medida, incluyendo sus costos subyacentes y del horizonte de penetración posible.
- El costo de las medidas corresponde al costo real para la sociedad de adoptar las medidas. Considera sus costos de inversión, operación y mantención, y los ahorros en insumos o combustibles cuando los hay. No considera algunos costos o beneficios sociales, por ejemplo, incremento de contaminantes locales, o situaciones de inundación de grandes áreas producto de la construcción de embalses.

⁷ Los expertos corresponden a profesionales de los Departamentos de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y PRIEN de la Universidad de Chile y Ministerio de Energía, entre otros.

- Identificación cualitativa de otros posibles impactos (positivos o negativos) de las medidas que pudieran favorecer u obstaculizar su implementación.
- Calibración de los resultados respecto a costos de tecnologías de organismos oficiales y a resultados de la literatura internacional.

Se han definido criterios para la selección y evaluación de las medidas, de manera de sólo incorporar aquellas factibles de ser aplicadas en Chile en el horizonte de evaluación. De esta forma, no se toman en cuenta medidas disponibles solo a nivel experimental o con un grado de desarrollo incipiente, medidas no aplicables en Chile, ni juicios u opiniones poco fundadas respecto a ciertas tecnologías.

A pesar que muchos estudios sólo incorporan aquellas medidas con costos inferiores a US\$ 50 por tonelada de CO₂e reducida, también es posible incorporar medidas con costos superiores a este rango, de acuerdo a su factibilidad de implementación en el país.

Los grupos de medidas consideradas, ordenadas de menor a mayor importancia respecto al potencial de reducción, son los siguientes:

- Nuevas centrales hídricas de embalse.
- Nuevas centrales geotérmicas.
- Nuevas centrales mini hidráulicas de pasada.
- Nueva central nuclear.
- Nuevas centrales eólicas.
- Nuevas centrales térmicas a biomasa.
- Nuevas centrales térmicas a carbón con sistema de captura de CO₂ (CCS).
- Nuevas centrales solares fotovoltaicas PV.
- Nuevas centrales solares de concentración CSP.
- Nuevas centrales mareomotrices
- Nuevas centrales a gas natural

En el caso de los costos, las principales variables que se requieren son los costos de inversión, operación, mantenimiento, vida útil, periodos de inversión, precios de los combustibles involucrados, tiempos de construcción, entre otras.

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES SUJETAS A INCERTIDUMBRE

Es posible identificar un amplio espectro de variables que pueden ser consideradas a la hora de realizar análisis de costo beneficio en el sector energía, para algunas de ellas se conoce a priori que tienen un efecto importante en la evaluación, como es el precio de los combustibles. Otras sin embargo poseen efectos importantes pero suelen considerarse de segundo orden, o muy complejos de cuantificar, por lo que no son incorporadas a la evaluación, subestimando en muchos casos los costos reales de un proyecto.

El cuadro siguiente muestra las variables que influyen en el costo de inversión, operación y mantenimiento de una planta generadora de electricidad, y que a la vez son en mayor o menor medida fuente de incertidumbre para el análisis, o fuente de variabilidad para la comparación entre tecnologías.

Cuadro 3: Variables relevantes para la evaluación del sector energía

Variables	
Costo de inversión	Factor de emisión CO2
Costo fijo	Tasa de descuento
Costo de O&M	Externalidades fijas
Costo de transmisión	↳ Empleo
Costo de combustible	Externalidades variables
↳ Transporte de combustible	↳ Contaminación local
Factor de planta	↳ F. de Emisión
Eficiencia de rendimiento	↳ Otras externalidades ambientales
Tiempo de construcción	Costo/Ingresos Bonos ambientales
Vida útil operativa	Variables de aprendizaje (Inversión/eficiencia)
Tiempo de transacción	Efecto sobre el precio nudo
Costos de transacción	Tipo de cambio

Fuente: Elaboración propia

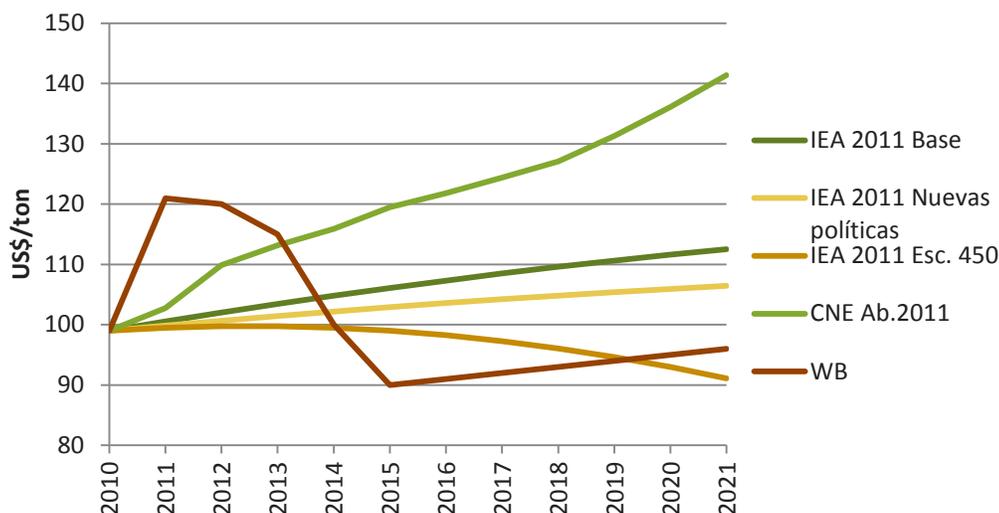
El análisis genérico de las tecnologías puede distorsionar la incertidumbre real que aportan al problema alguna de estas variables, por ejemplo la ubicación geográfica de un proyecto influye fuertemente en los costos de transporte de los insumos, en los costos generados por externalidades variables (que tan cerca se encuentra el proyecto de una localidad habitada), o en la inversión requerida en la línea de transmisión. De esta forma dichas variables deben ser consideradas para la evaluación de proyectos específicos ya que responden, y pueden ser cuantificadas sólo como efectos de la decisión de la ubicación geopolítica del proyecto, de lo contrario se reduciría la capacidad de comparación entre las distintas tecnologías del análisis de costo efectividad.

Las variables consideradas en esta evaluación se detallan a continuación:

Precio de los combustibles

El precio de los combustibles es a priori una variable clave en la evaluación de costo efectividad, y a la vez una importante fuente de incertidumbre dado que los resultados económicos dependen del consumo de combustible de hasta 40 años plazo o más para centrales térmicas a precios que se presentan muy erráticos, incluso a corto plazo. Esto se aprecia en la siguiente figura donde se muestran proyecciones del valor del carbón para generación eléctrica al año 2021 publicadas por la Agencia Internacional de Energía (IEA), el Banco Mundial (WB) y la Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE).

Figura 11: Proyección del precio de la tonelada de carbón bituminoso



Fuente: Elaboración propia

Acotar esta incertidumbre se hace vital a la hora de decidir un proyecto de generación eléctrica, dado que los resultados económicos del proyecto diferirán mucho en un escenario donde el precio se mantenga “bajo”, favoreciendo a las tecnologías que consumen combustible fósil, versus un escenario de precios “altos” en donde la energías renovables se encontrarían es una posición competitiva mucho más ventajosa.

Costo de las tecnologías

El costo de inversión de las tecnologías es otro de los flujos claves a la hora de evaluar un proyecto, en particular representa la mayoría del capital necesario para proyectos de energía renovable, pero a la vez para algunas tecnologías nuevas está sujeto a innovaciones constantes que le dan dinamismo al precio. Además de este factor, los costos difieren entre distintos países y zonas geográficas, es así como por ejemplo Price Water house Cooper consideraba el año 2010 un costo de inversión de entre 3000 y 3900 €/kW para una planta solar CSP en España, y entre 2300 y 2900 €/kW si se instalara en el Sahara⁸.

Costos de O&M

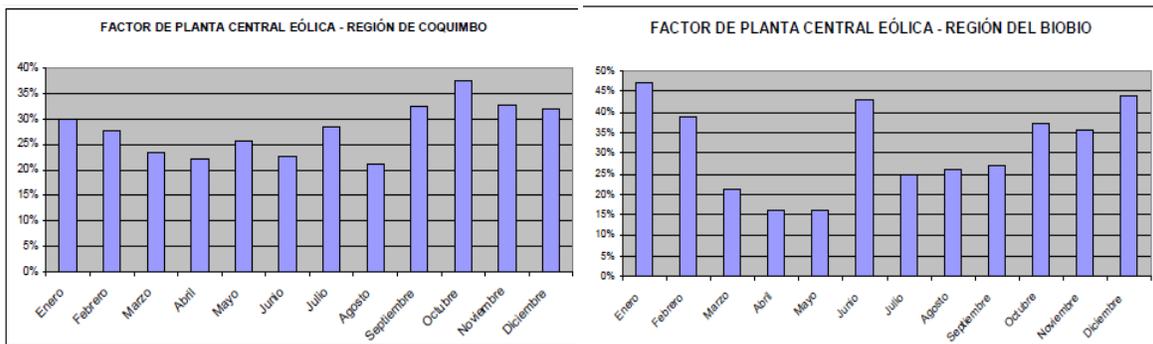
Los costos de operación y mantenimiento (excluyendo el consumo de combustible) son otra fuente de incertidumbre en la evaluación de proyectos de generación eléctrica. Estos se pueden ver afectados por la ubicación y consecuente distancia de una planta a los centros de abastecimiento, por la eficiencia alcanzada en los procesos operativos de las centrales o por otras variables inherentes a cada tecnología. En general los valores entregados por la literatura difieren mucho para cada tecnología, por ello esta variable se considera como una variable estocástica en este estudio.

⁸ “A roadmap to 2050 for Europe and North Africa”, Price Waterhouse Coopers 2010

Factor de planta

El factor de planta es una variable que agrega una incertidumbre importante a la evaluación, principalmente cuando se trata de fuentes energéticas que responden a fenómenos climáticos. De ahí se vuelve importante considerar el factor de planta como una variable estocástica ya que en tecnologías como la eólica y la solar se aprecian un rango mayor del factor de planta, lo que lleva a variaciones importantes del costo de abatimiento de estas tecnologías. A modo de ejemplo se presentan los factores de planta reales obtenidos para 2 centrales eólicas ubicadas en el norte y el centro de Chile respectivamente.

Figura 12: Factor de planta centrales eólicas, 2010.



Fuente: Informe de precio nudo abril 2011, CNE.

En los gráficos se observa que no sólo existe una diferencia entre las 2 plantas, sino que también una diferencia a lo largo del año dentro de cada planta, llegando en el caso de la región del Bío Bío a una diferencia de 200% en el factor de planta entre los meses "peak" y aquellos con el menor factor de planta.

Eficiencia

La eficiencia en la transformación energética influye en la cantidad de combustible que requiere una central para generar una unidad de energía. Esta puede variar de acuerdo a la capacidad calorífica del combustible consumido, y según parámetros particulares de la planta que se evalúa. Observando el consumo específico del informe de precio nudo de abril del año 2011 para las centrales de generación eléctrica instaladas en el sistema interconectado central de Chile, se observan valores para centrales térmicas a carbón de entre 0,35 y 0,4 toneladas de carbón por MWh generado, lo que involucra distintos niveles de eficiencia, y por consecuencia distintos requerimientos de combustible

Tiempo de construcción

Si bien las distintas tecnologías tienen tiempos de construcción relativamente estandarizados, en la práctica existen factores que provocan variaciones en dichas cifras. Factores políticos, geográficos y sociales pueden afectar dichos tiempos provocando, en caso de aumentar los plazos, que los flujos se retrasen en el tiempo con la consecuencia de un mayor descuento de los flujos desplazados en el futuro.

Factor de emisión

El factor de emisión de CO₂ difiere entre distintas instalaciones de una misma tecnología, este se ve afectado por los mismos factores que la eficiencia, en general el contenido de carbono del combustible utilizado y el consumo específico de la planta termoeléctrica provocaran diferencias en el factor de emisión.

6.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES ESTOCÁSTICAS EN EL SECTOR GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

A continuación se detalla la construcción de las variables estocásticas del modelo especificando los supuestos utilizados y las fuentes de información.

Precio de los combustibles

El precio de los combustibles es modelado considerando una estimación de mediano plazo y una de largo plazo sobre la base de proyecciones de organismos expertos en el tema. La aleatoriedad de las variables de precios sólo se considera en un año (2020) para el mediano plazo, y otro año (2035) para el largo plazo. Luego, el comportamiento en los años intermedios será una función de las variables aleatorias antes mencionadas. Este diseño se escoge dado que para la evaluación interesa el efecto producido por la tendencia del precio de los combustibles de mediano y largo plazo, y no por las oscilaciones de corto plazo naturales de los mercados.

En este caso se utilizaron las proyecciones generadas por la Agencia Internacional de Energía (IEA) presentadas en la publicación anual “World Energy Outlook 2011”, se presentan proyecciones para un escenario base, uno con aplicación de políticas acordes al cambio climático donde se proyectan metas de reducción de CO₂ para los principales países consumidores de energía, y un escenario que considera con un 50% de probabilidad lograr limitar el calentamiento global a 2 grados celcius⁹. Adicionalmente se utilizan las proyecciones del Banco Mundial y de la Comisión Nacional de Energía de Chile publicadas en el informe de precio nudo del sistema interconectado central de Octubre del año 2011.

Sobre la base de estas proyecciones se obtiene un valor aleatorio para el precio del combustible al año 2020 y 2035. Luego se interpolan dichos precios entre el año base y el valor de la variable aleatoria al año 2020. Para dicha interpolación se utilizó una trayectoria convexa con el objeto de cubrir aceleradamente las oscilaciones de corto plazo del precio del combustible, esto se puede apreciar en la figura 14. La interpolación entre el año 2020 y 2035 se diseñó de forma cóncava, esto con el objeto de darle continuidad a la tasa de crecimiento de la interpolación 2011-2020, y generar

⁹ Para mayor detalle de los escenarios, acudir al documento World Energy Outlook 2011 (IEA), capítulo 1: “Defining the scenarios”

una mayor amplitud de la distribución de probabilidad del valor hacia los años finales de la proyección

Precio del carbón

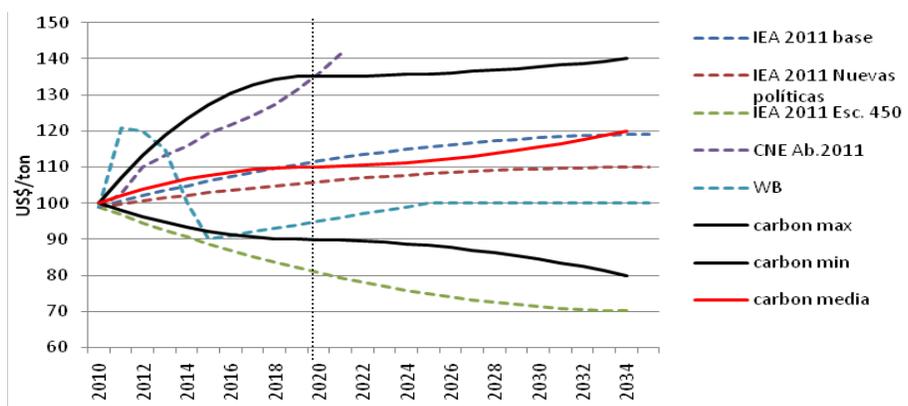
La figura 14 muestra las proyecciones observadas en las distintas fuentes, sobre ellas se trazan los límites al precio, y la esperanza del precio de la tonelada de carbón (carbón máximo, carbón mínimo y carbón media) utilizados para definir la variable aleatoria del precio al año 2020 y 2035. De las proyecciones analizadas no se consideró a cabalidad la proyección del escenario 450 de la IEA por ser demasiado optimista versus el comportamiento de los últimos años observable en la figura 13, por esta razón se considera una caída del 50% de lo proyectado en este escenario para el año 2020, y de 66% para lo proyectado el año 2035. Dado que se desconoce la forma como se distribuirían estas proyecciones, se utiliza una distribución triangular centrada en la esperanza del precio y acotada por los máximos y mínimos definidos en las proyecciones. Posteriormente al año 2035 se considera un precio constante.

Figura 13: Precio histórico Carbón



Fuente: Elaboración propia en base a datos de CNE

Figura 14: Proyecciones del precio del carbón bituminoso US\$/ton

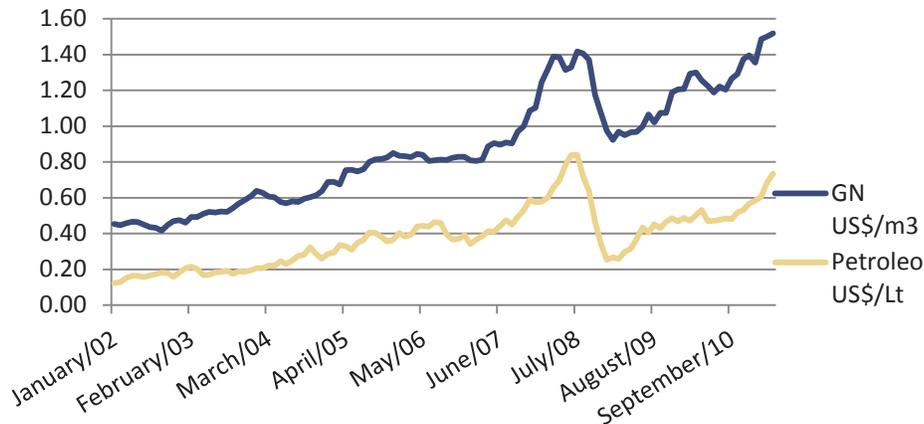


Fuente: Elaboración propia

Gas natural

La siguiente figura muestra el precio promedio del gas natural en la zona central de Chile y el precio observado del petróleo entre los años 2002 -2010, de ella se desprende una relación directa entre estas variables. Dada esta situación, se genera una predicción econométrica del precio del gas natural en función del precio del barril de petróleo y de los rezagos de precio del gas natural. Ver anexo A.17.

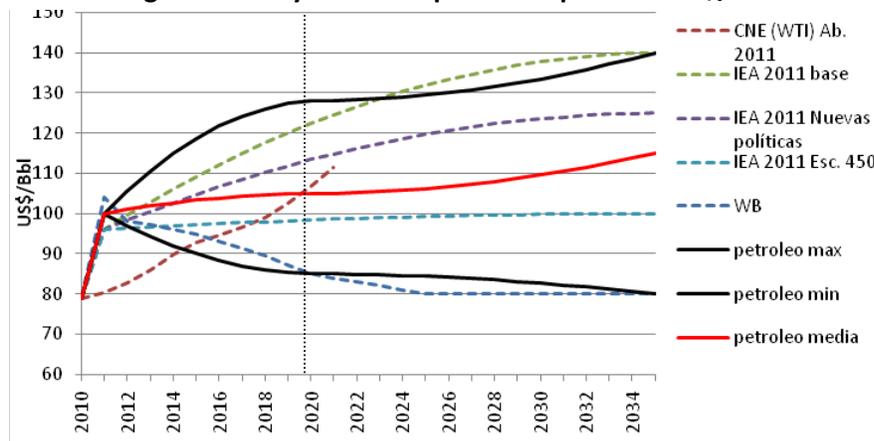
Figura 15: Precios históricos del petróleo y gas natural



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la CNE

A través de la predicción econométrica se obtienen los parámetros con los cuales se proyecta el precio de acuerdo a las variables aleatorias para el precio del barril de petróleo¹⁰, estas se definen de acuerdo a los límites y la esperanza de la estimación al año 2020 y 2035, obtenidos de las proyecciones de las fuentes consultadas señaladas en el siguiente gráfico.

Figura 16: Proyección del precio del petróleo US\$/Bbl



Fuente: Elaboración propia

¹⁰ Ver modelo econométrico en anexo A.17.

Biomasa

Proyectar el precio de la biomasa es más complejo dado que últimamente se han potenciado nuevos usos como fuente energética, pero aún se trata de un mercado incipiente. Se recurrió al informe de precio nudo de la CNE (Octubre 2011) donde se observa un costo de combustible para las centrales térmicas a biomasa de entre 35 y 45 US\$/MWh. Aunque se espera estabilidad en el precio, se modela un precio máximo de hasta 80 US\$/MWh en un escenario donde la demanda aumenta producto de las tendencias medioambientales al no utilizar combustibles fósiles.

Uranio

La demanda de uranio es considerada estable y relativamente bien conocida, dado el número de centrales instaladas en el mundo y su consumo. Dado esto su proyección y precio también se considera relativamente estable en 9,33US\$/MWh considerando el ciclo completo del uranio¹¹.

El siguiente cuadro resume los valores adoptados por las variables aleatorias.

Cuadro 4: Parámetros de variables aleatorias

Variable	Valor medio	Mínimo	Máximo
Precio petróleo 2020 US\$/Bbl	105	85	128
Precio petróleo 2035 US\$/Bbl	115	80	140
Precio carbón 2020 US\$/Bbl	110	90	135
Precio carbón 2035 US\$/Bbl	120	80	140
Precio biomasa 2020 US\$/MWh	47	40	60
Precio biomasa 2035 US\$/MWh	55	40	80
Precio Uranio US\$/MWh	9,3	7,9	11,6

Fuente: Elaboración propia

Se incorporó adicionalmente una correlación positiva entre las variables de mediano plazo y largo plazo de cada combustible, esto para potenciar el hecho de que la tendencia obtenida de mediano plazo, hasta el año 2020, necesariamente tiene un efecto sobre el comportamiento del precio del combustible a largo plazo (2020-2035). De esta forma se esperaría que a variables aleatorias altas para el precio del año 2020, al menos el precio del año 2035 no esté en el rango inferior. La correlación si bien es desconocida y arbitraria, se ajusta a un valor que permite modelar el efecto mencionado, de esta forma se utilizó una correlación de 0,6 entre el precio de cada combustible al año 2020 y el precio al año 2035.

Costo de inversión

Para modelar la distribución del costo de inversión se recurrió a literatura de evaluación de proyectos de generación eléctrica, en donde se presentan rangos de costo de inversión¹². Adicionalmente se

¹¹ "Projected Costs of Generating Electricity 2010", IEA y Nuclear Energy Agency NEA, Pag. 42.

consultó a expertos del Centro de Energía. Con esta información se construye el rango de precios probables y un valor medio, el cual se asignó de acuerdo a la opinión experta si es que esta se encontraba en los rangos de la literatura, o como el valor del rango que más se acerca a la opinión experta.

Las distribuciones de probabilidad asignadas son triangulares dado que se desconoce cómo se distribuyen los posibles valores, pero se cuenta con un valor “más probable”, un máximo y un mínimo. Los parámetros se presentan en el cuadro 5.

Costo de O&M

Para diseñar la distribución de esta variable se recurre a la literatura de evaluación de proyectos de generación eléctrica, en donde se presentan rangos de costos de O&M, además se cuenta con el costo variable promedio de cada central del sistema interconectado central a través del informe de precio nudo. En base a esta información se tienen valores posibles de costo de O&M los cuales se modelan triangularmente centrado en el valor de mayor densidad. El costo de operación y mantenimiento del sistema de Captura y Almacenamiento de carbono CCS resulta más complejo de cuantificar dado que la tecnología aún se encuentra en una etapa de desarrollo. Para diseñar un rango de CCS se consideró la información del paper “Realistic Costs of Carbon Capture” [Al-Juaied 2009].

Cuadro 5: Parámetros de variables aleatorias

Tecnologías	Valor medio costo inversión US\$/KW	Min	Max	Valor medio costo O&M US\$/MWh	Min	Max
Carbón	2000	1800	2500	2,25	1	6
Mini Hidráulica	2800	2600	2800	5	4,25	6,97
Geotérmica	3550	3000	5000	2	2	10
Biomasa	2600	2500	3000	6,71	2,4	10
Nuclear	4000	3500	5500	15	9	20
Eólica	2100	1500	2400	7,7	7,7	10
Solar CSP	6200	5000	6800	20	10	20
Solar PV	4000	3500	4500	4,45	4,45	20
Mareomotriz	5000	4500	6000	17,5	17,5	28
CCS ¹³	1900	1500	2100	100	80	120
Embalse	2000	1900	2100	5	2,5	7
Gas CC	1000	800	1200	3,8	2,5	6

¹² “A Risky Proposition: The Financial Hazards of New Investments in Coal Plants”, Union of Concerned Scientists, Marzo 2011.

“Building a low-carbon economy – the UK’s contribution to tackling climate change”, Committee on Climate Change, Diciembre 2008.

¹³ El costo de inversión de la tecnología CCS se refiere al valor adicional, sobre el costo de la instalación de una central convencional térmica a carbón.

Fuente: Elaboración propia

Factor de Planta

Para diseñar la distribución de esta variable se recurre a la literatura de evaluación de proyectos de generación eléctrica, en donde se presentan rangos de factor de planta para cada tecnología, además se recurrió a opinión experta con los expertos del Centro de Energía. Se utilizó una distribución triangular utilizando como criterio primario para la media al valor entregado por opinión experta, si es que se encuentra dentro de los márgenes de la literatura. De lo contrario se utiliza el valor más cercano de la literatura. Los parámetros se detallan en el cuadro 6.

Eficiencia

Para diseñar la distribución de esta variable se recurre a la literatura de evaluación de proyectos de generación eléctrica, en donde se presentan rangos de eficiencia para cada tecnología. Además se contrasta con la información entregada por expertos. La variable se modelo con una distribución triangular cuyos parámetros se presentan en el cuadro 6.

Tiempo de construcción

Para diseñar la distribución de esta variable se recurre a la literatura de evaluación de proyectos de generación eléctrica, en donde se presentan estimaciones del tiempo de construcción para las distintas tecnologías, esto se complementa con información de expertos. En general esta información es bastante estándar y los valores difieren muy poco entre una publicación y otra. Con la información obtenida se diseñan distribuciones discretas, donde el valor medio posee el doble de probabilidad de ocurrencia que los otros valores probables los cuales poseen la misma probabilidad de ocurrencia. Los parámetros se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 6: Parámetros de variables aleatorias

Tecnologías	Valor medio FP (%)	Min	Max	Valor medio eficiencia (%)	Min	Max	Valor medio TC años	Min	Max
Carbón	0,82	0,8	0,85	0,43	0,4	0,46	4		
Mini Hidráulica	0,62	0,5	0,7	1	1	1	2		
Geotérmica	0,84	0,8	0,85	1	1	1	5		
Biom	0,8	0,8	0,8	0	0	0	4		

asa	5	,8	,8	,4	,4	,5			
Nuclear	0,85	,8	,9	,3	,4	,6	7		
Eólica	0,3	,2	,3	1	1	1	1		
Solar CSP	0,45	,3	,5	1	1	1	2		
Solar PV	0,28	,2	,3	1	1	1	1		
Mareomotriz	0,28	,2	,3	1	1	1	2		
CCS*	0,82	,8	,8	,4	,4	,6	4		
Embalse	0,54	,5	,7	1	1	1	4		
Gas CC	0,7	,6	,8	,5	,5	,5	2		

Fuente: Elaboración propia

Factor de Emisión

El factor de emisión se obtuvo a través de un análisis de los rendimientos de las plantas térmicas a carbón y gas natural. Para ello se determinó el factor de emisión de cada planta de acuerdo a su consumo específico (Ton/MWh). Del set de factores de emisión resultante se extrajo un rango y un valor medio para el valor estocástico del factor de emisión. Por simplicidad se asume un factor de emisión de 0,108 tCO₂/MWh para una planta térmica a carbón con sistema CCS.

Cuadro 7: Parámetros de la variable Factor de Emisión.

Tecnologías	Valor medio FE tCO ₂ /MWh	Min	Max
Carbón	0,95	0,9	1,05

CCS*	0,108	0,108	0,108
Gas CC	0,45	0,35	0,55

Fuente: Elaboración propia

6.3 ELABORACIÓN DE LA CURVA DE ABATIMIENTO CON INCERTIDUMBRE DEL SECTOR GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL DE CHILE.

En esta sección se presenta la metodología general de estimación de una curva de abatimiento para el sector eléctrico. En este análisis se asume que la central eléctrica de base corresponde a la tecnología de carbón pulverizado. Las medidas de abatimiento corresponden a centrales con tecnologías menos intensivas en emisiones de CO₂e. Por ejemplo, se consideran las tecnologías asociadas a energías renovables no convencionales, hidroelectricidad y energía nuclear.

Inicialmente es necesario proponer un portafolio de medidas factibles técnica y económicamente, relevantes de acuerdo a la contribución de GEI a las emisiones totales del sector involucrado. La evaluación contempla el análisis de las variables relevantes de las medidas definiendo una distribución estadística de su comportamiento. Posteriormente se desarrolla un análisis estocástico de costo efectividad de las medidas generando una curva de costos de abatimiento que permite apoyar la toma de decisiones respecto a cuales medidas deben ser priorizadas.

En el caso del sector generación eléctrica nacional, que comprende los sistemas SIC, SING, Aysén y Magallanes, este aumentará el nivel de generación desde 62,5 GWh el año 2010 a 180 GWh el año 2030. Ello implica un aumento de capacidad desde 16.954 MW el 2010 a 40.000 MW el 2030, de los cuales un 52% corresponden a centrales térmicas alimentadas con carbón, en comparación con el 30% que había en 2010. Esto hace que las emisiones del sector aumenten a 85 millones de TCO₂e, con lo que la matriz eléctrica nacional incrementa su intensidad en carbón de 0,37 a 0,47 TCO₂e por MWh. Ello es inferior al valor actual de países desarrollados como España, Alemania, Japón y USA e incluso inferior al valor proyectado de algunos de estos países. Por ejemplo USA proyecta la intensidad en carbón de su matriz eléctrica a 0,62 TCO₂e por MWh en el año 2030 [PROGEA, 2008].

Este aumento de las emisiones producto del mayor uso del carbón en la matriz energética abre importantes opciones de reducción de emisiones de GEI, por medio de la búsqueda de alternativas de generación o de mitigación de dichas emisiones (CCS). En este sentido, este sector ofrece un potencial de reducción muy importante, que podría alcanzar un máximo de 37 millones de toneladas de CO₂e el año 2030. Ello corresponde al potencial de reducción de GEI más importante del país.

Las áreas factibles de ser consideradas para aproximarse a este potencial de reducción son Carbon Capture and Storage (CCS), Energías Renovables no Convencionales (principalmente mini centrales hidráulicas, geotérmicas, centrales eólicas y biomasa), energía nuclear y energía hidráulica de embalse.

Descripción del Modelo Básico

En esta sección se presenta la metodología general de estimación de una curva de abatimiento para el sector eléctrico. En este análisis se asume que la central de base corresponde a la tecnología del carbón. Las medidas de abatimiento corresponden a centrales de tecnologías que emitan menos que el carbón. Por ejemplo, se consideran las tecnologías asociadas a energías renovables no convencionales, hidroelectricidad y energía nuclear.

Un supuesto implícito (y fuerte) en este tipo de modelaciones es que el costo unitario de abatimiento es independiente del nivel de la reducción para cada tecnología. Esto permite estimar un costo unitario y luego determinar el potencial o ancho de la barra de la curva de costos.

El cuadro siguiente muestra las variables que se en el modelo se consideran aleatorias.

Cuadro 8: Formalización de variables del modelo.

Variable	Notación	Descripción
Costo de inversión unitario	I	Unidades de US\$/kW
Número de años de construcción del proyecto	τ	También los años en que se reparte la inversión. Única variable con distribución discreta.
Fracción de inversión en año t	λ_t	Aplica durante los años de construcción. $t = 0, \dots, \tau - 1$. Debe cumplir que $\sum_{t=0}^{\tau-1} \lambda_t = 1$. En nuestro caso se asume $\lambda_t = 1/\tau$.
Factor de planta	f	Representa la fracción del año en que la tecnología efectivamente está disponible para ser utilizada.
Precio del combustible en el año t	P_t	Los precios deben estar en unidades de US\$/MWh. En algunos casos se estiman utilizando métodos econométricos. ¹⁴
Rendimiento	η	Fracción que representa la eficiencia del proceso
Otros costos de operación	C	Unidades de US\$/MWh
Factor de emisión asociado a tecnología α	e_α	Unidades de ton CO ₂ eq/MWh.

Fuente: Elaboración propia

En la evaluación también intervienen la vida útil (T) de cada tipo de central y la tasa de descuento (r). Estas dos variables no se consideran aleatorias para efectos de la simulación¹⁵.

El primer paso considera estimar el valor presente neto de los costos asociados a cada una de las tecnologías. Se evalúa un caso sencillo en que se asume una generación de 1MWh por año para cada tecnología durante la vida útil del proyecto.

¹⁴ Por ejemplo, se establece una relación econométrica entre el precio del crudo y del diesel. Ante una salida de simulación de los precios del crudo, esta relación permite obtener estimaciones de los precios del diesel.

¹⁵ En general, en estos ejercicios se sensibilizan los resultados utilizando distintas tasas de descuento pero no se incluye ésta como una variable a simular.

A cada tecnología se le asocian tres categorías principales de costos: Inversión, costos de combustible y costos de operación.

- Valor Presente de los Costos de Inversión

-Se invierte $\lambda_t I$ (US\$/Kw) cada año de construcción $t = 0, \dots, \tau - 1$.

-La central opera $365 \cdot 24 \cdot f$ horas al año. Luego el costo anterior puede expresarse como $\frac{\lambda_t I}{365 \cdot 24 \cdot f}$ ahora en unidades de US\$/kWh, o bien, $\frac{1000 \cdot \lambda_t I}{365 \cdot 24 \cdot f}$ en US\$/MWh.

-El valor presente de los costos de inversión resulta ser:

$$VPN(inversión) = \frac{1000}{365 \cdot 24 \cdot f} \sum_{t=0}^{\tau-1} \lambda_t \frac{I}{(1+r)^t}$$

- Valor Presente de los Costos de Combustible.

-El valor presente de los costos de combustible se construye a partir de todos los flujos en que se incurre durante la vida útil del proyecto de generación $t = \tau, \dots, T + \tau - 1$.

-Con un monto monetario de P_t se puede comprar 1MWh de combustible en el periodo de operación t . Sin embargo, como la eficiencia del proceso de generación es menor que 1 entonces se requieren $\frac{P_t}{\eta}$ para generar 1MWh de electricidad. Por lo tanto, el VPN asociado a los costos de combustible es:

$$VPN(combustible) = \sum_{t=\tau}^{T+\tau-1} \frac{P_t}{\eta(1+r)^t}$$

- Valor Presente de Otros Costos de Operación

-Dado que cada año de operación se incurre en un costo de C (US\$/MWh), el VPN queda simplemente:

$$VPN(operación) = \sum_{t=\tau}^{T+\tau-1} \frac{c}{(1+r)^t}$$

En resumen, el VPN asociado a cada una de las tecnologías resulta ser:

$$VPN = \frac{1000}{365 \cdot 24 \cdot f} \sum_{t=0}^{\tau-1} \lambda_t \frac{I}{(1+r)^t} + \sum_{t=\tau}^{T+\tau-1} \frac{P_t}{\eta(1+r)^t} + \sum_{t=\tau}^{T+\tau-1} \frac{c}{(1+r)^t}$$

Para anualizar, el monto equivalente constante anual K (con periodo igual a la vida útil de cada proyecto) se estima como:

$$VPN = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{K}{(1+r)^t} = K \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}}$$

Identificando el factor de recuperación del capital FRC:

$$FRC = \frac{r(1+r)^{T-1}}{(1+r)^T - 1}$$

Queda $K = VPN \cdot FRC$. Lo último tiene unidades de \$/MWh.

El abatimiento se estima mediante un análisis contrafactual. Así se define un abatimiento unitario (ton reducidas/MWh) como la diferencia entre los factores de emisión del carbón (c) y la tecnología alfa: $a = e_c - e_\alpha$.

Luego el costo unitario de abatimiento de cada tecnología alfa se estima como:

$$\delta_\alpha = \frac{K_\alpha - K_C}{a}$$

De esta forma, el modelo de simulación entrega una distribución para cada costo unitario y anual de abatimiento δ_α .

Para construir el gráfico se combina la información de δ_α con la del potencial de abatimiento por medida (que determina el ancho de la barra). En este estudio no se incorpora incertidumbre al potencial de abatimiento.

Potencial de abatimiento

La construcción de la curva requiere de un potencial de abatimiento para cada opción de mitigación, en este caso particular nos referimos a opciones reales de incorporación de capacidad eléctrica de las tecnologías evaluadas. Estos valores fueron obtenidos a través de opinión experta de los profesionales del Centro de Energía.

Cuadro 9: Potencial de abatimiento de las tecnologías

Tecnología	Capacidad	Potencial reducción anual (MMtonCO2)
Embalse	1000	4,38
Mini Hidráulica	300	1,50
Geotérmica	500	3,41
Nuclear	1000	6,90
Eólica	600	1,46
Biomasa	100	0,69
CCS*	300	1,76
Solar PV	200	0,48
Mareomotriz	10	0,02
Solar CSP	200	0,89

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En esta sección se presentan los resultados del modelo de estimación de costos de mitigación incorporando la incertidumbre en las variables mencionadas anteriormente y la consolidación de dichos resultados en la curva de abatimiento de gases de efecto invernadero.

La evaluación económica se lleva a cabo con dos tasas de descuento, la primera utiliza la tasa social (6%) y la segunda corresponde a una tasa de descuento más cercana a un negocio privado (12%).

En el caso de la evaluación para la tasa del 6%, en el cuadro siguiente se presenta en la segunda columna el costo de mitigación determinístico y en las siguientes, los valores probabilísticos en su valor más probable (Moda), y los niveles de confianza del 5% y del 95% del costo de abatimiento. Por ejemplo, la tecnología nuclear tiene costos unitarios menores a US\$2.15 con 5% de confianza y menores a US \$24.66 con un nivel de confianza de 95%.

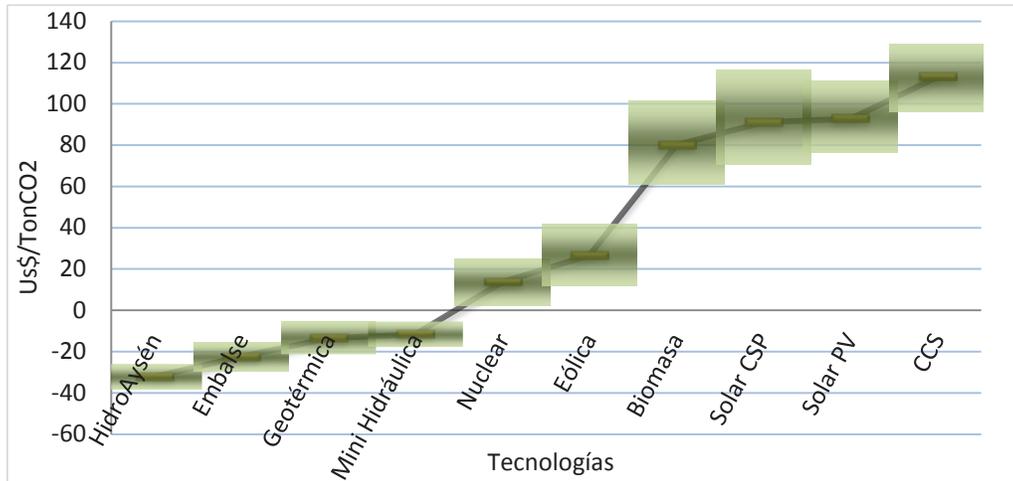
Cuadro 10: Tecnologías de generación eléctrica ordenadas por costo de mitigación (r=6%).

Tecnología	Costo Mitigación US\$/tonCO2	Moda	Nivel de confianza 5%	Nivel de confianza 95%
Embalse	-\$ 19.1	-\$ 21.2	-\$ 28.0	-\$ 15.2
Geotérmica	-\$ 18.1	-\$ 13.2	-\$ 20.6	-\$ 4.0
Mini Hidráulica	-\$ 10.8	-\$ 10.9	-\$ 16.9	-\$ 4.8
Nuclear	\$ 12.7	\$ 13.7	\$ 3.5	\$ 24.6
Eólica	\$ 31.5	\$ 25.2	\$ 14.0	\$ 38.5
Biomasa	\$ 75.7	\$ 79.0	\$ 61.6	\$ 102.3
Solar CSP	\$ 95.8	\$ 89.4	\$ 71.7	\$ 110.8
Solar PV	\$ 89.0	\$ 92.8	\$ 76.2	\$ 109.7
CCS	\$ 119.4	\$ 112.7	\$ 97.1	\$ 129.2
Mareomotriz	\$ 149.2	\$ 152.3	\$ 134.0	\$ 181.7
Gas CC	\$ 391.7	\$ 371.1	\$ 301.4	\$ 459.5
Diesel	\$ 5,470.3	\$ 5,795.7	\$ 2,173.1	\$ 13,899.6

Fuente: Elaboración propia

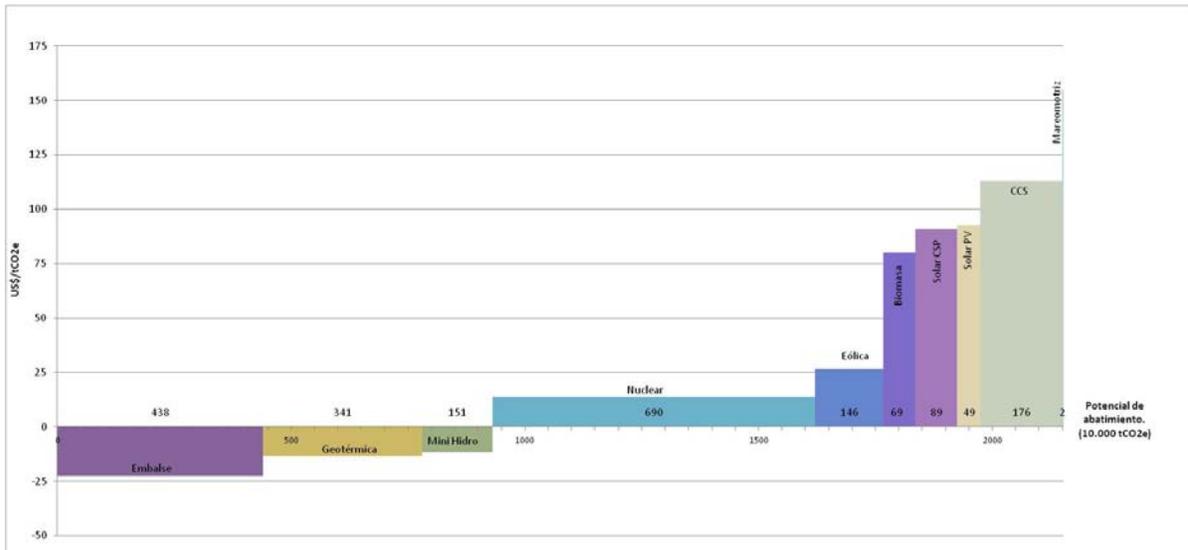
En las figuras 17 y 18 se presenta el resultado principal, la curva de abatimiento del sector generación eléctrica chileno, incorporando la incertidumbre en el costo de abatimiento de cada medida (tecnología) aplicada (Figura 17), y el potencial de abatimiento (Figura 18). La línea continua presenta la curva de valores esperados para este caso y las áreas sobre dicha curva son la incertidumbre propagada a través del análisis desarrollado y que representa la variabilidad de los resultados señalados en el cuadro 10.

Figura 17: Curva de abatimiento incorporando incertidumbre (r=6%)



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Curva de abatimiento incorporando valores medios (r=6%)



Fuente: Elaboración propia

Uno de los análisis importantes de destacar a partir de estos resultados es el cambio de decisiones de inversión que se podrían tener en un proceso de toma de decisiones que considera incertidumbre, respecto de uno determinístico. Por ejemplo si se considera como criterio de decisión de inversión el VaR con un 95% de probabilidad, es decir se ordenan las variables de acuerdo al costo probable con un 95% de confianza. En este caso, ello se produce un cambio de orden entre la tecnología Geotérmica y Mini Hidráulica, que cambia su prioridad en el caso determinístico (\$-18.12 vs \$-10.84) frente al criterio de VaR (95%) (\$-5.23 vs -\$5.55), usando como indicador el costo de mitigación en US\$/tonCO₂.

Por otro lado, en el cuadro siguiente se presenta la variabilidad comparada entre pares de tecnologías, revisando en qué porcentaje de los casos, la tecnología X es más cara que la tecnología Y. Esto permite visualizar en qué casos ciertas tecnologías pueden comportarse distinto al valor determinístico o al valor medio esperado, dada la incorporación de la incertidumbre.

Cuadro 11: Variabilidad de las tecnologías de mitigación

Geotermia>H. Embalse	Minihidro>Geotermia	Eólica>Nuclear
98%	69%	89%

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la evaluación para una tasa de descuento del 12%, en el cuadro siguiente se presentan los costos de mitigación determinístico y los valores probabilísticos en su valor más probable y los niveles de confianza del 5% y del 95% del costo de abatimiento.

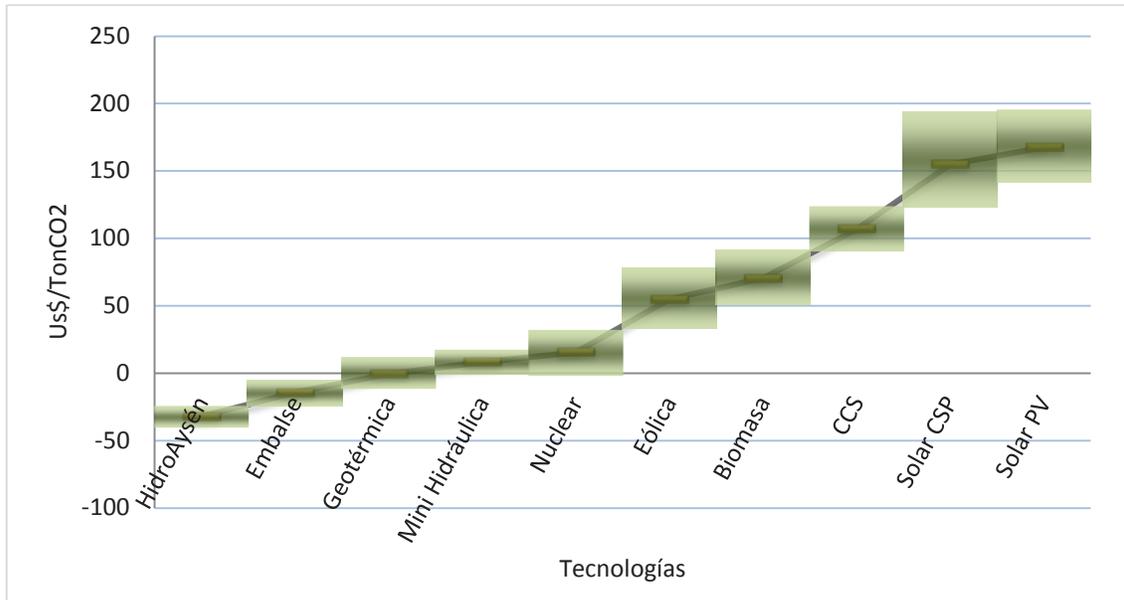
Cuadro 12: Tecnologías de generación eléctrica ordenadas por costo de mitigación (r=12%).

Tecnología	Costo Mitigación US\$/tonCO2	Moda	Nivel de confianza 5%	Nivel de confianza 95%
Embalse	-\$ 7.5	-\$ 14.4	-\$ 24.2	-\$ 5.4
Geotérmica	-\$ 5.9	-\$ 0.6	-\$ 11.7	\$ 11.8
Mini Hidráulica	\$ 9.8	\$ 8.0	-\$ 1.4	\$ 17.3
Nuclear	\$ 13.8	\$ 15.4	-\$ 2.1	\$ 32.0
Eólica	\$ 63.8	\$ 54.7	\$ 32.8	\$ 77.9
Biomasa	\$ 65.8	\$ 70.4	\$ 50.6	\$ 90.9
CCS	\$ 115.8	\$ 106.7	\$ 90.1	\$ 123.7
Solar CSP	\$ 161.6	\$ 154.7	\$ 122.8	\$ 193.4
Solar PV	\$ 166.6	\$ 167.4	\$ 141.1	\$ 195.4
Mareomotriz	\$ 231.4	\$ 234.3	\$ 198.4	\$ 272.6
Gas CC	\$ 463.7	\$ 440.9	\$ 344.9	\$ 553.6
Diesel	\$ 5,384.9	\$ 5,706.8	\$ 2,146.7	\$ 13,662.1

Fuente: Elaboración propia

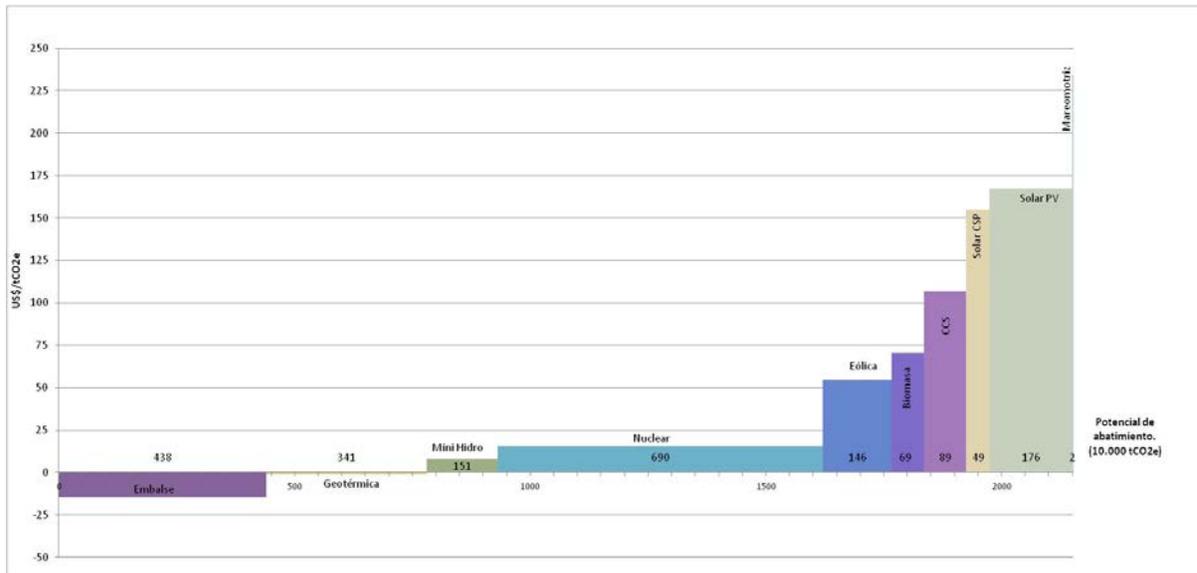
En las figuras 19 y 20 se presenta la curva de abatimiento del sector generación eléctrica chileno, incorporando la incertidumbre en el costo de abatimiento de cada medida (tecnología) aplicada y el potencial de mitigación. La línea continua presenta la curva determinística (valores esperados medios) para este caso y las áreas sobre dicha curva son la incertidumbre propagada a través del análisis desarrollado y que representa la variabilidad de los resultados presentados en el cuadro 12.

Figura 19: Curva de abatimiento incorporando incertidumbre (r=12%)



Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Curva de abatimiento incorporando valores medios (r=12%)



Fuente: Elaboración propia

En el cuadro siguiente se presenta la variabilidad comparada entre pares de tecnologías, revisando en qué porcentaje de los casos, la tecnología X es más cara que la tecnología Y. Ello permite visualizar en qué casos ciertas tecnologías pueden comportarse distinto al valor determinístico o al valor medio esperado, dada la incorporación de la incertidumbre.

Cuadro 13: Variabilidad de las tecnologías de mitigación

Geotermia>H. Embalse	Minihidro>Geotermia	Nuclear>Minihidro	Biomasa>Eólica
----------------------	---------------------	-------------------	----------------

97%	86%	77%	82%
------------	------------	------------	------------

Fuente: Elaboración propia

6.3.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES

En el anexo A.16 se presentan los resultados respecto al análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la estimación de emisiones y potenciales de reducción para el armado de la curva de mitigación de gases de efecto invernadero.

Uno de las variables que concentra la mayor importancia de la incertidumbre en la propagación de esta al resultado final de costos es el valor de la inversión de la tecnología. El modelo es sensible a variaciones del tipo de tecnología (carbón, gas, nuclear, solar, etc.) y dependiendo de ella aporta una mayor o menor incertidumbre al mismo. En el caso de las tecnologías mareomotriz y solar, que son las menos desarrolladas de las aquí presentadas, ellas son las que acumulan la mayor cantidad de incertidumbre en los análisis. Ello se debe en gran parte a las pobres estimaciones de costos futuros que tendrán dichas tecnologías.

Otra de las variables que concentran importancia en los resultados de incertidumbre, es el precio de los combustibles (petróleo, carbón, etc.), también es una variable de interés y que propaga una alta variabilidad debido a las diversas (y diferentes) proyecciones de costo y a su directa correlación con el resultado de las distintas tecnologías.

Una variable adicional que acumula y propaga importantes incertidumbre a través del modelo es el factor de planta de la tecnología. La variabilidad de este factor es muy grande y depende de los tipos de tecnologías, variables meteorológicas, inversiones en la industria, oferta y demanda, entre otras.

Para ver más detalle de cómo se comportan las distintas variables en los resultados finales de costo de mitigación de CO₂, se sugiere ver el anexo A.15.

7 DESARROLLO METODOLÓGICO Y RESULTADOS DE LOS SECTORES DE DEMANDA ENERGÉTICA.

A continuación se presenta el ejercicio de modelación de medidas de mitigación para los sectores transporte, minería y papel y celulosa. Se han escogido un grupo de medidas para las que se cuenta con información nacional o internacional disponible, las que serán descritas y caracterizadas de manera de obtener sus costos de abatimiento, su potencial de penetración y la incertidumbre asociada a las mismas.

De forma preliminar se muestran los potenciales de las medidas estudiadas, y su relación con el consumo del sector correspondiente. Para el cálculo de la fracción de las emisiones se consideran las emisiones por transformación evitadas por el consumo eléctrico, dado que la mayoría de las medidas implican mayor eficiencia en este energético.

Cuadro 14: Resumen de potenciales de mitigación de las medidas evaluadas.

	Medida	Potencial	% del total sector 2020
Transporte Caminero	Taxi Hibr.	63.093	0,2%
	Híbridos	78.096	0,3%
	Ecodriving	37.180	0,1%
	Taxis Plug-in	97.832	0,3%
	Plug-in	87.190	0,3%
	Total	363.391	1,3%
Papel y Celulosa	Aislación	11.760	0,2%
	VSD	45.599	0,7%
	Cogeneración	347.900	5,2%
	Total	405.259	6,0%
Cobre	PIME	4016	0,0%
	MEPS	74.448	0,2%
	PRM	43.790	0,1%
	PVSD	21.247	0,1%
	Total	143.501	0,4%

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se presenta una breve reseña del sector para entender su estructura y sus consumos energéticos.

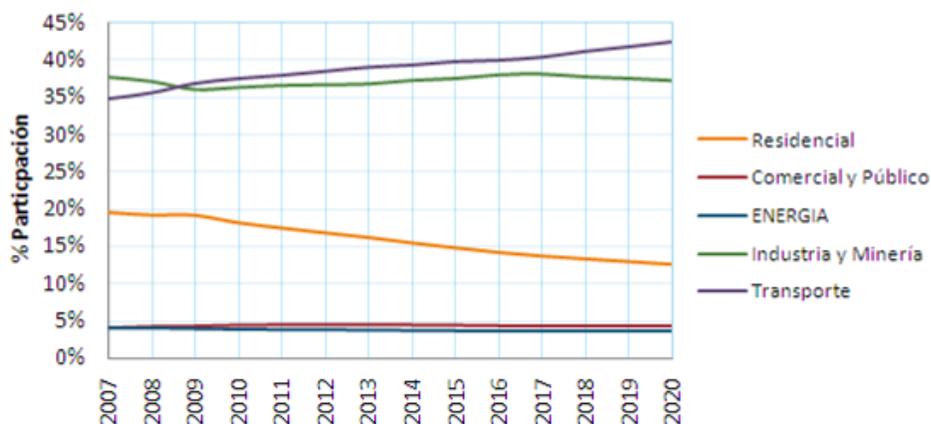
7.1 MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO EN EL SECTOR TRANSPORTE

Según IEA (2010), el transporte es responsable de alrededor del 23% de las emisiones del sector energía a nivel mundial. Las emisiones tendrían su origen principal en el transporte caminero, además

del marítimo y el aéreo, los que están sometidos a la consideración de los bunkers internacionales, lo que les agrega una dificultad adicional para el conteo y asignación a países y regiones del planeta.

Durante el año 2009 el sector Transporte casi desplazó a la Industria y Minería como el mayor demandante de energía en Chile, representando el 34,6% frente al 36,8% del consumo final de energía de este último, y proyectando una participación aún mayor en el corto plazo como se observa en la Figura 21. En este caso, el consumo energético se concentra en un 99% en un solo producto, los derivados del petróleo, que incluyen básicamente petróleo diesel y gasolinas. Existe además un consumo eléctrico menor asociado al Metro de Santiago (Tren eléctrico urbano) y Ferrocarril y gas asociado a un parque menor de vehículos livianos.

Figura 21: Participación sectorial en la demanda energética nacional.



Fuente: Elaboración propia en base a “Implementación de la herramienta de simulación LEAP para la proyección de escenarios de consumo de energía en el largo plazo y la evaluación de escenarios de mitigación de CO₂”, 2010. Ministerio de Energía. PROGEA.

El cuadro 15 presenta los consumos históricos del sector transporte por modo, desde el año 2007 al 2010, extraída a partir del Balance Nacional de Energía de la CNE (Comisión Nacional de Energía) para Chile.

Cuadro 15: Consumos históricos por modo

		Petróleo Diesel	Petróleo Combustible	Gasolina Motor	Gasolina Aviación	Kerosene Aviación	Elect.	Gas Natural	Total	Total Anual
		Tcal	Tcal	Tcal	Tcal	Tcal	Tcal	Tcal	Tcal	Tcal
2007	Caminero	33.780	0	24.795	0	0	304	253	59.132	86.853
	Ferrovionario	208	0	0	0	0	47	0	255	
	Marítimo	3.605	15.496	117	0	45	0	0	19.263	
	Aéreo	11	0	0	45	8.147	0	0	8.203	
2008	Caminero	35.006	2	25.682	0	2	321	144	61.157	89.894
	Ferrovionario	485	0	0	0	0	46	0	531	
	Marítimo	3.616	14.988	49	0	0	0	0	18.653	
	Aéreo	7	0	0	47	9.499	0	0	9.553	
2009	Caminero	35.166	25	27.879	0	2	318	223	63.613	86.027
	Ferrovionario	467	0	0	0	0	45	0	512	
	Marítimo	3.394	10.654	39	0	2	0	0	14.089	
	Aéreo	7	0	0	56	7.750	0	0	7.813	
2010	Caminero	37.870	809	31.482	0	0	351	197	70.709	85.336
	Ferrovionario	464	0	0	0	0	20	0	484	
	Marítimo	1.593	5.091	0	0	0	4	0	6.688	
	Aéreo	7	0	0	84	7.364	0	0	7.455	

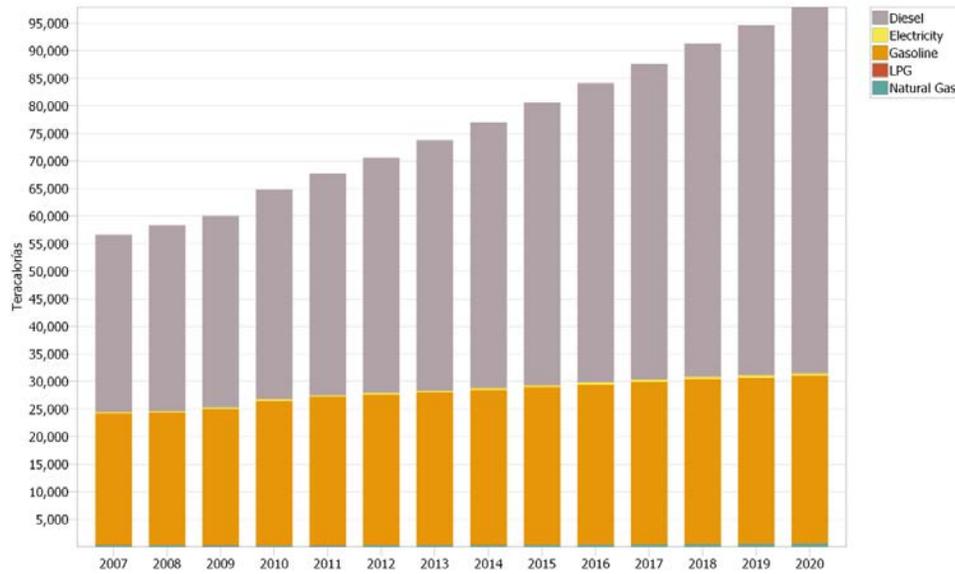
Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, CNE.

El sector Caminero representaba al 68% de consumo energético del transporte los años 2007 y 2008, sin embargo durante los 2 últimos años demostró un crecimiento importante en la participación, alcanzando un 74% el año 2009 y un 83% el 2010.

Para el sector caminero se puede observar una leve tendencia creciente en el consumo de diesel, mientras que para la gasolina esta tendencia se acentúa, incrementando el consumo en un 27% entre los años 2007 y 2010. En términos generales el sector caminero muestra un crecimiento durante los últimos años 2007 – 2010 de 19,5%. Por otro lado el modo marítimo presenta consumos decrecientes, puntualmente el consumo del año 2010 respecto del año 2009 cae un 47%.

El consumo del sector se proyecta creciendo fuertemente. En efecto, valores típicos estiman crecimientos anuales promedio entre 4-5% al menos hasta el año 2020. La figura siguiente presenta una estimación de la proyección de consumo energético de transporte caminero hasta el año 2020 por combustible, esta proyección es función de la serie histórica de consumos y no considera a la fecha, variaciones ni efectos de mercado de los impuestos específicos aplicados a la gasolina y el diesel.

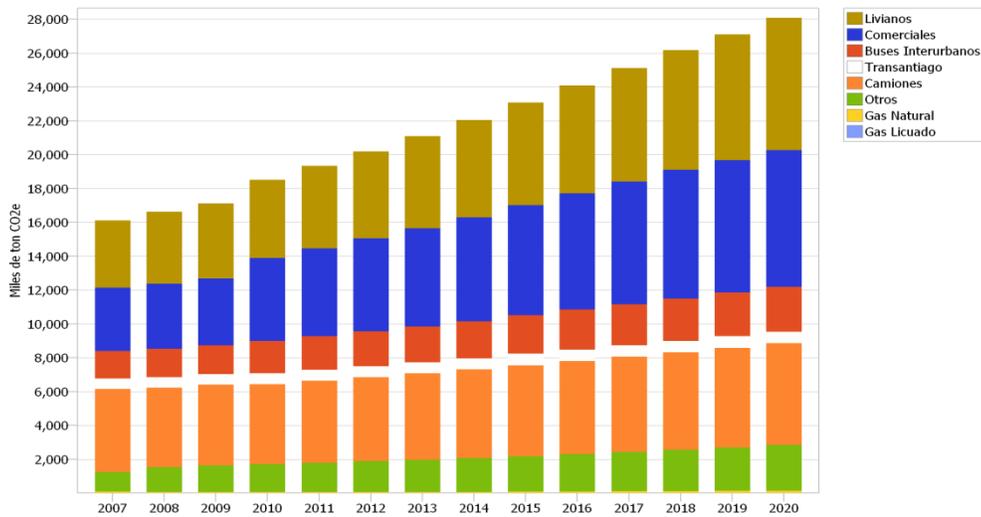
Figura 22: Proyección de consumo energético en Transporte Caminero 2007 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a LEAP 2011.

La siguiente figura muestra la proyección de emisiones del sector de transporte caminero. Está indica 28 millones de toneladas de CO₂e para el año 2020.

Figura 23: Proyección de consumo energético en Transporte Caminero 2007 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a LEAP (2011).

7.1.1 VARIABLES ASOCIADAS A MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN EL SECTOR TRANSPORTE

El sector de transporte se divide en transporte caminero, transporte aéreo y transporte marítimo. Solo transporte caminero es posible analizarlo con una metodología de stock mientras que los dos restantes se modelan con una metodología de nivel de actividad.

Las principales variables para caracterizar el transporte caminero son:

- Parque de vehículos y edad (región)
- Norma asociada a los vehículos.
- Ventas por región
- Variaciones en eficiencia (consumo)
- Tipo de combustible utilizado.
- Consumo de combustible (final/útil)
- Categorías de vehículos (normas)
- Peso de vehículos por categoría
- Carga promedio por categoría
- Distancia media recorrida
- Parque de bicicletas
- Tasa de uso de las bicicletas
- Kilómetros de ciclo vías

También se definen como variables de interés la tasa de crecimiento del PIB, motorización, obsolescencia de vehículos y población.

Las principales variables para caracterizar el sector transporte aéreo y marítimo son:

- Consumo de energía final/útil según tipo de energético
- Tipo de viaje (nacional/internacional)
- Distancia media recorrida

Además se requieren otras variables de interés: tasas de crecimiento del PIB, exportaciones, importaciones y población.

Sector transporte otros (Metro, otros).

- Consumo por tipo de energético
- Nivel de actividad (km, pasajeros, otros)

Las oportunidades de abatimiento en general se enfocan en camiones, automóviles particulares y comerciales, y buses, dado que el transporte terrestre es el mayor responsable de las emisiones de GEI. Ellas se pueden categorizar como medidas de eficiencia energética en camiones y buses, tecnologías con bajas emisiones de carbono, reducción de nivel de actividad y reducción de la intensidad de carbón en el combustible. A continuación se presenta el detalle de las medidas de mitigación de GEI a evaluar.

7.1.2 VEHÍCULOS LIVIANOS PRIVADOS Y TAXIS HÍBRIDOS

Descripción

La medida consiste en que cierta proporción de los vehículos nuevos que cada año ingresan al parque vehicular tengan tecnología híbrida. Los vehículos híbridos constan de dos motores, uno eléctrico y otro de combustión interna. Comparado con los vehículos convencionales, reducen considerablemente el uso del motor de combustión interna, lo que se traduce en un menor gasto de combustible y consecuentemente, un menor nivel de emisiones.

El driver para esta medida corresponde a la cantidad de vehículos híbridos que ingresan anualmente al parque vehicular. Esta cantidad se expresará como porcentaje del total de vehículos nuevos que ingresan al parque dicho año.

Adicionalmente se evalúa la misma medida para el reemplazo de taxis colectivos. Este medio tiene un parque constante y se considera que a partir del año 2013 se genera un cambio paulatino de estos vehículos a tasas de 5% anual, este caso es relevante dado el mayor nivel de actividad de los taxis que provoca una disminución del costo por unidad de CO2 mitigada.

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida, los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Evaluación de Flujos de Inversión y Financieros de los Sectores Silvoagropecuario, Transporte y Subsector Hídrico de la Infraestructura, PNUD 2011
2. Estimaciones de Costo y Potencial de Abatimiento de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Diferentes Escenarios Futuros. Centro de Cambio Global 2011.
3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile: Antecedentes para el desarrollo de un marco regulatorio y evaluación de instrumentos de reducción, PROGEA 2008
4. Memoria de título "Análisis estocástico del costo de una cartera eficiente de medidas de mitigación de gases de efecto invernadero para el cumplimiento de objetivos de reducción en Chile", Bruno Campos, 2011

Línea Base

Se considera como línea base la proyección del parque de vehículos livianos, esto considera ventas anuales sobre las cuales un porcentaje corresponderá a vehículos híbridos.

- El informe PROGEA 2008 considera una línea base sin vehículos híbridos.
- PNUD propone una penetración de línea base de 0,05% de las ventas el año 2010, un 1,5% el año 2015, y 5,5% el año 2020.
- CCG no especifica.

- Campos 2011 propone una penetración de línea base de 0,05% de las ventas el año 2010, un 0,5% el año 2015, y 3% el año 2020.

Penetración de la medida

- El informe PROGEA 2008 considera una penetración constante de 1% de las ventas de vehículos livianos.
- PNUD propone una penetración de la medida de 0,05% de las ventas el año 2010, un 5,0% el año 2015, y 8,5% el año 2020.
- CCG propone una penetración de la medida de entre 1 y 3% de las ventas el año 2010 y entre 1,5% y 4,5% el año 2020.
- Campos 2011 propone una penetración de la medida de 0,05% de las ventas el año 2010, un 3% el año 2015, y 10% el año 2020.

Costos

Costo (US\$)	PROGEA	PNUD	CCG	Memoria
Diferencial entre un vehículo híbrido y un vehículo convencional 2011	Entre 30% y 40%	5.000	7.500	5.000
Diferencial entre un vehículo híbrido y un vehículo convencional 2020	Entre 30% y 40%	5.000	4.000	3.000

*Los costos de combustibles se desarrollan una sola vez para todas las medidas.

Otras Variables

Variable	PROGEA	PNUD	CCG	Memoria
Nivel de Actividad (KM/año)	15.000	15.000	16.000	15.000
Nivel de Actividad taxis(KM/año)	25.000	N/D	27.000	N/D
Rendimiento convencional (KM/Lt)	N/D	12	11,46	10
Rendimiento Híbrido (KM/Lt)	N/D	19	15,62	19
Incremento anual de rendimiento convencional (%)	N/D	1,39	1,39	1,39
Incremento anual de rendimiento híbrido (%)	N/D	1,69	1,69	1,69
Vida útil (años)	N/D	N/D	13	N/D

Potencial de mitigación

- El informe PROGEA 2008 obtiene una reducción de emisiones GEI de 70.000 ton CO₂e el año 2020.
- PNUD obtiene una reducción de emisiones GEI de 107.000 ton CO₂e el año 2020.
- CCG obtiene una reducción de emisiones GEI de entre 20.000 y 60.000 ton CO₂e el año 2020.

- Campos 2011 obtiene una reducción de emisiones GEI de 245.000 ton CO₂e el año 2020, este valor es muy alto en comparación a las otras referencias, esto se produce por 2 factores, el alto nivel de penetración pronosticado para el año 2020 (7% sobre la línea base) y un menor rendimiento utilizado para los vehículos convencionales.

7.1.3 VEHÍCULOS LIVIANOS PRIVADOS Y TAXIS HÍBRIDOS PLUG-IN

Descripción

La medida consiste en que cierta proporción de los vehículos nuevos que cada año ingresan al parque vehicular tengan tecnología híbrida plug-in. Los vehículos Plug-in constan de dos motores, uno eléctrico alimentado por la recuperación energética del vehículo y directamente a través de la inyección de electricidad, y otro de combustión interna. Comparado con los vehículos convencionales, reducen considerablemente el uso del motor de combustión interna, lo que se traduce en un menor gasto de combustible y consecuentemente, un menor nivel de emisiones.

El driver para esta medida corresponde a la cantidad de vehículos híbridos plug-in que ingresan anualmente al parque vehicular. Esta cantidad se expresará como porcentaje del total de vehículos nuevos que ingresan al parque dicho año.

Adicionalmente se evalúa la misma medida para el reemplazo de taxis colectivos. Este medio tiene un parque constante y se considera que a partir del año 2015 se genera un cambio paulatino de estos vehículos a tasas de 5% anual, este caso es relevante dado el mayor nivel de actividad de los taxis que provoca una disminución del costo por unidad de CO₂ mitigada.

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida, los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Evaluación de Flujos de Inversión y Financieros de los Sectores Silvoagropecuario, Transporte y Subsector Hídrico de la Infraestructura, PNUD 2011
2. Estimaciones de Costo y Potencial de Abatimiento de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Diferentes Escenarios Futuros. Centro de Cambio Global 2011.
3. Memoria de título "Análisis estocástico del costo de una cartera eficiente de medidas de mitigación de gases de efecto invernadero para el cumplimiento de objetivos de reducción en Chile", Bruno Campos, 2011.

Línea Base

Se considera como línea base la proyección del parque de vehículos livianos, esto considera ventas anuales sobre las cuales un porcentaje corresponderá a vehículos híbridos plug-in.

- PNUD propone una penetración de línea base de 0,00% de las ventas el año 2010, un 0,03% el año 2015, y 0,5% el año 2020.
- CCG no especifica.
- Campos 2011 propone una penetración de línea base de 0,00% de las ventas el año 2010, un 0,03% el año 2015, y 1,5% el año 2020.

Penetración

- El estudio PNUD propone una penetración de 0,05% de las ventas el año 2010, un 1,5% el año 2015, y 5,5% el año 2020.
- CCG no especifica.
- Campos 2011 propone una penetración de 0,05% de las ventas el año 2010, un 0,5% el año 2015, y 3% el año 2020.

Costos

Costo (US\$)	PNUD	CCG	Memoria US\$
Diferencial entre un vehículo plug-in y un vehículo convencional 2011	30.000	15.000	30.000
Diferencial entre un vehículo plug-in y un vehículo convencional 2020	30.000	-2.43% anual	15.000

*Los costos de combustibles se desarrollan una sola vez para todas las medidas.

Otras Variables

Variable	PNUD	CCG	Memoria
Nivel de Actividad (KM/año)	15.000	16.000	15.000
Nivel de Actividad taxis(KM/año)	N/D	27.000	N/D
Rendimiento convencional (KM/Lt)	12	11,46	10
Rendimiento eléctrico(KM/Lt)	19	17.25	19
Consumo eléctrico (Kwh/Km)	0,25	0,95*	0.25
Incremento anual de rendimiento convencional	1,39	1,39	1,39
Incremento anual de rendimiento plug-in	1,69	1,69	1,69

*Dato del año 2007

Potencial de mitigación

- PNUD obtiene una reducción de emisiones GEI de 61.000 ton CO₂e el año 2020 sin considerar la medida sobre taxis colectivos.
- CCG obtiene una reducción de emisiones GEI unitaria de entre 17.3 ton CO₂e el año 2020.
- Campos 2011 no presenta esta información.

7.1.4 CONDUCCIÓN EFICIENTE

Descripción

La medida consiste en capacitar a los conductores de buses comerciales y camiones en flota livianos en mejores prácticas de manejo (Eco Driving) disminuyendo el consumo de combustible utilizado y por lo tanto disminuyendo las emisiones de CO2 de los vehículos.

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida, los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Evaluación de Flujos de Inversión y Financieros de los Sectores Silvoagropecuario, Transporte y Subsector Hídrico de la Infraestructura, PNUD 2011
2. Estimaciones de Costo y Potencial de Abatimiento de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Diferentes Escenarios Futuros. Centro de Cambio Global 2011.
3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile: Antecedentes para el desarrollo de un marco regulatorio y evaluación de instrumentos de reducción, PROGEA 2008

Línea Base

Se considera como línea base la proyección de cursos de capacitación efectuados como un porcentaje del total de conductores.

- PNUD considera una penetración desde 0% hasta 13,34% al año 2020.
- CCG considera un 10% de penetración al año base.
- El informe PROGEA 2008 considera un 5% de penetración al año base.

Penetración

- PNUD propone una penetración de 20% adicional de conductores sobre la línea base.
- CCG considera alcanzar una penetración de 43% al año 2020 (En 10 años).
- El informe PROGEA 2008 considera una penetración creciente hasta el 15% de los conductores al año 2020.

Costos

Costo	PNUD	CCG	PROGEA
Costos de capacitación (US\$)	126	148	N/D

*Los costos de combustibles se desarrollan una sola vez para todas las medidas.

Otras Variables

Variable	PNUD	CCG	PROGEA
Nivel de Actividad Buses(KM/año)	65.000	N/D	50.000
Nivel de Actividad Camiones(KM/año)	70.000	27.000	60.000
Rendimiento Buses (KM/Lt)	2,73	N/D	2,67
Rendimiento Camiones(KM/Lt)	3,5	8,33	4,84
Reducción de consumo por capacitación	4%	De 4% a 0% en 5 años	10%

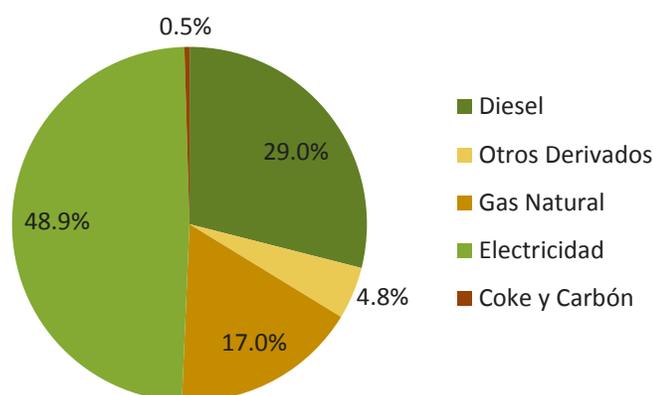
Potencial de mitigación

- PNUD obtiene una reducción de emisiones GEI de 66.000 ton CO₂e el año 2020 sin considerar la medida sobre taxis colectivos.
- CCG obtiene una reducción de emisiones GEI 133.000 ton CO₂e el año 2020.
- Campos 2011 obtiene una reducción de emisiones GEI 58.500 ton CO₂e el año 2020.

7.2 MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO EN EL SECTOR COBRE

El consumo energético de la minería del cobre ha crecido a una tasa promedio anual de 6.1% entre 2000 y 2010. Pasó de 18 mil tercalorías en 1990 a más de 33 mil en 2010. Los principales consumos del año 2010 según el Balance Nacional de Energía (BNE) corresponden a electricidad, diesel y gas natural. La figura siguiente muestra la composición del consumo del sector.

Figura 24: Composición del Consumo Energético del Sector Cobre-2010



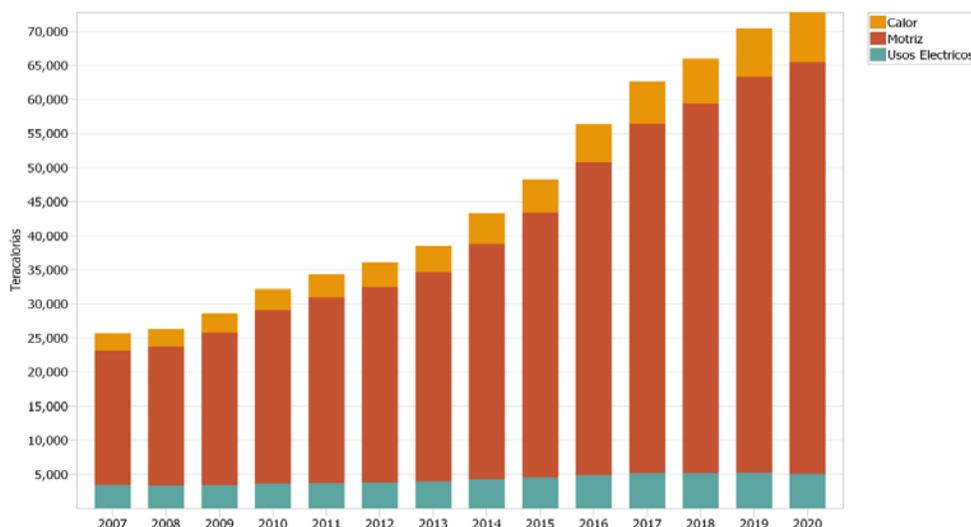
Fuente: Elaboración propia utilizando datos de BNE 2010. Ministerio de Energía.

Es importante destacar que el año 2010 muestra una diferencia importante con los años anteriores en la importancia del gas natural. En los años 2000-2009 la participación del GN está siempre bajo

8%. Los años 2007-2009 incluso bajo el 3% producto de la escasez de las importaciones desde Argentina. Por ello es que el 2010 aparece con un cambio, que de mantenerse, podría considerarse como estructural en la composición del consumo.

El consumo del sector se proyecta creciendo fuertemente. En efecto, valores típicos estiman crecimientos anuales promedio entre 6-8% al menos hasta el año 2020¹⁶. La figura siguiente presenta una estimación de la proyección de consumo energético de cobre hasta el año 2020 por usos. En particular el consumo eléctrico para el año 2020 alcanzaría los 42 TWh.

Figura 25: Proyección de consumo energético por uso del cobre en Chile 2007 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a LEAP 2011

7.2.1 DEFINICIÓN DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

En el sector cobre las principales medidas de mitigación corresponden a medidas relacionadas con eficiencia energética de consumo eléctrico. Por ello, las reducciones de emisiones serán indirectas y asociadas a las reducciones de emisiones por parte del sector de generación eléctrica.

Las medidas se eligen como provenientes del regulador y con metas específicas. Esto reduce su complejidad y dificulta menos la modelación.

Las medidas a considerar son:

1) Programa de inversión en motores eficientes (PIME).

¹⁶ Estas estimaciones suelen tomar como entrada la cartera de proyectos, tanto existentes como nuevos, de las principales empresas mineras. Cochilco estima periódicamente la producción de cobre de los próximos diez años.

Se asume que el regulador fija como meta que un 20% de los motores nuevos y que entran al parque en 2013 y 2014 sean eficientes (y donde se asume que no lo serían sin el Programa)¹⁷. Se consideran sólo motores con potencias menores a 100HP¹⁸.

2) Programa de Recambio de Motores (PRM).

El costo de inversión es el costo de los motores nuevos menos el valor residual. Podemos suponer este valor en el orden de 20-30% del valor del motor eficiente.

3) Normas de Eficiencia de Motores (MEPS).

Se considera que en 2014 se establece una normativa que exige que todos los motores (con potencias menores a 100HP) que entren al parque sean eficientes.

4) Programa de Fomento Variadores de Frecuencia cuando ingresan motores nuevos (Es decir motor eficiente + VDF). (PVSD):

-2013: 20% motores nuevos CON HP MENOR A 100 sean eficientes + VSD

-2014: 25% motores nuevos CON HP MENOR A 100 sean eficientes + VSD

-2015: 30% motores nuevos CON HP MENOR A 100 sean eficientes + VSD

Cabe hacer notar que este caso presenta la metodología con mayor desarrollo de datos y tratamiento de la información disponible y que se usa como una cota superior del tipo de análisis que se pueden hacer. Ello no es factible de realizar en el resto de las medidas, dada la falta de información y la complejidad y demanda de recursos que ello requiere, por lo que se evaluarán con métodos un poco más simplificados, aprovechando de conocer dichas metodologías.

7.2.1.1 Metodología de Estimación de Costo Efectividad por Medida

Para cuantificar el ahorro de electricidad y costo de las medidas se estima el parque de motores hasta el año 2020 por categoría de potencia. El cuadro siguiente muestra el stock total de motores por rango de potencia para la minería del cobre para los años 2010, 2015 y 2020.

Cuadro 16: Parque Total de Motores por Rango de Potencia (HP) 2010- 2020

Potencia (HP)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0 -5	53,782	57,215	60,012	63,766	71,355	77,772	83,793	89,806	91,154	93,724	96,092
5-20	18,854	20,057	21,038	22,354	25,014	27,264	29,375	31,483	31,955	32,856	33,686
20-50	10,080	10,724	11,248	11,952	13,374	14,577	15,705	16,833	17,085	17,567	18,011
50-100	5,573	5,929	6,219	6,608	7,395	8,060	8,684	9,307	9,446	9,713	9,958
100-200	3,472	3,694	3,875	4,117	4,607	5,021	5,410	5,798	5,885	6,051	6,204
200-500	2,338	2,487	2,609	2,772	3,102	3,381	3,643	3,904	3,963	4,074	4,177
500-1000	1,112	1,183	1,241	1,319	1,476	1,608	1,733	1,857	1,885	1,938	1,987

¹⁷ En estricto rigor, la meta sería lograr que en forma adicional entre un 20% de motores eficientes.

¹⁸ PRIEN 2006-2010 señala que para potencias sobre 100HP las inversiones en motores eficientes suelen entregar resultados que no son costo efectivos. Es por ello que los Programas se han centrado en potencias en el rango que aquí se considera.

más 1000	154	164	172	183	205	223	240	258	261	269	276
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

Se requiere también el crecimiento neto del parque, lo que se aprecia en el siguiente cuadro.

Cuadro 17: Entrada de Motores Nuevos 2011-2020

Rango de Potencia	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0 -5	3,433	2,797	3,754	7,589	6,417	6,021	6,013	1,348	2,570	2,368
5-20	1,203	981	1,316	2,660	2,249	2,111	2,108	472	901	830
20-50	643	524	704	1,422	1,203	1,129	1,127	253	482	444
50-100	356	290	389	786	665	624	623	140	266	245
100-200	222	181	242	490	414	389	388	87	166	153
200-500	149	122	163	330	279	262	261	59	112	103
500-1000	71	58	78	157	133	125	124	28	53	49
mas 1000	10	8	11	22	18	17	17	4	7	7

Fuente: Elaboración propia.

En el anexo A.11 se presenta la metodología de estimación de motores por rango de potencia.

También se estiman los ahorros de consumo resultantes de (1) usar un motor eficiente en vez de uno convencional y de (2) un motor eficiente con variador de frecuencia (VDF) en vez uno convencional (aquí se distingue para usos de motores de bombas y correas). El cuadro siguiente presenta estos ahorros anuales.

Cuadro 18: Entrada de Motores Nuevos 2011-2020

Rango de Potencia (HP)	Motor Eficiente	Motor Eficiente + VDF Bombas	Motor Eficiente +VDF Correas
5	1.2	4.0	1.7
5-20	3.2	19.4	8.3
20-50	5.7	50.9	21.8
50-100	8.8	93.7	40.1
100-200	4.8	185.6	79.5
200-500	16.0	431.1	184.8
500-1000	44.7	920.0	394.3
mas 1000	297.9	6133.5	2628.6

Fuente: Elaboración Propia

Estos ahorros se valoran al precio libre monómico de la electricidad o precio medio de mercado, proyectado de acuerdo a variables y parámetros oficiales usados en los estudios de Precio de Nudo del país¹⁹.

¹⁹ Informe de precio nudo de referencia para proyecciones ABRIL 2011

Para cada nivel de potencia media se consideran valores de inversión promedio de acuerdo al cuadro siguiente:

Cuadro 19: Valores de Inversión de Motores (US \$)

Potencia Media	Estándar	Eficiente	Eficiente+VDF
3	430	456	1,288
15	1,495	1,581	4,286
40	3,210	3,724	9,261
75	7,104	8,728	17,192

Fuente: Elaboración propia en base a PRIEN 2007 y Greenlab UC 2011.

Para estimar los valores de inversión de una medida el valor de interés es la diferencia entre el valor de un motor eficiente versus uno convencional en los casos que se invierta en un motor eficiente. Es decir, se aplica esta diferencia para las medidas: Programa de inversión, y normas de eficiencia en motores.

Análogamente, se aplica la diferencia entre los motores eficientes considerando VDF y los motores convencionales para la medida de fomento de VDF.

Finalmente, para el caso del recambio adelantado se utiliza sólo el valor del motor eficiente pero considerando un valor residual de 20% para el motor convencional (y por tanto respecto del valor del motor convencional).

7.2.1.2 Metodología de Estimación de Parque Motores

La metodología que se emplea en el sector minero requiere la estimación del parque actual de motores y su crecimiento. La metodología considera una versión simplificada de lo desarrollado por PRIEN (2007, 2011).

Según PRIEN (2007), el consumo eléctrico de motores del año 2004 de la industria del cobre casi alcanzó 11 mil GWh. El cuadro siguiente muestra el consumo y su composición según el rango de potencia de los motores.

Cuadro 20: Consumo de Motores de la Industria del Cobre- 2004.

Potencia (HP)	Potencia Media	Consumo de Motores	Total
5	3	415	3.8%
5-20	15	727	6.7%
20-50	40	1,036	9.6%
50-100	75	1,074	9.9%
100-200	150	1,339	12.4%
200-500	350	2,103	19.4%
500-1000	750	2,144	19.8%
mas 1000	5000	1,982	18.3%
Total	na	10,821	100.0%

Fuente: PRIEN (2007).

Según PRIEN, para cada rango de potencia, el número de motores que compone el parque viene dado por:

$$n = \frac{E}{\langle P \rangle \times 0.746 \times FC \times h}$$

Donde:

n : Número de motores.

$\langle P \rangle$: Potencia media del rango de potencia considerado (ver cuadro anterior).

E : Consumo anual de electricidad por parte de los motores (en unidades de kWh/año).

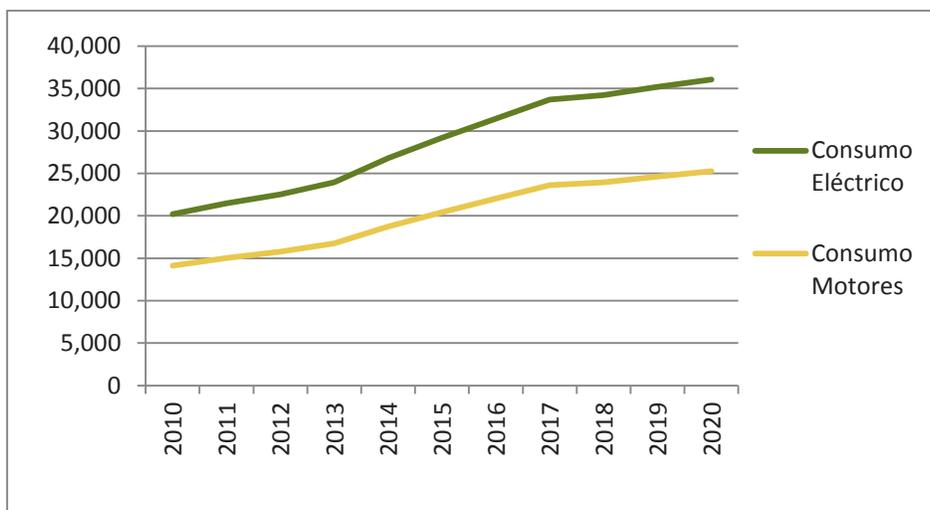
FC : Factor de carga. Se considera un valor de 0.6 tal como lo hace PRIEN (2007).

h : Horas de uso continuo de los motores. Tal como lo hace PRIEN (2007) se asume que este valor es 7500 horas.

Para calcular el parque actual de motores y proyectar utilizamos la ecuación anterior. Para el caso base utilizamos la proyección de consumo de electricidad para la industria del cobre desarrollada por PROGEA (2011) para el Ministerio de Energía. Se utiliza además el antecedente que alrededor del 70% de la energía eléctrica que se consume en el sector se asocia al uso de motores.

La figura siguiente presenta la proyección de consumo total de energía total y de motores considerado hasta el 2020.

Figura 26: Consumo Eléctrico Total y de Motores para la Industria del Cobre 2010-2020.



Fuente: Elaboración propia

Para desagregar el consumo de motores por rango de potencia se asume que la estructura de consumo permanece inalterada e igual a la presentada en el cuadro.

7.2.1.3 Estimación de Ahorros Unitarios

A continuación se presentan los ahorros obtenidos por usar un motor eficiente por sobre un convencional y, (2) de usar un motor eficiente con variador de frecuencia en vez de un convencional.

- **Uso de Motor Eficiente versus convencional**

El ahorro obtenido por el uso de un motor eficiente versus uno convencional se estima de acuerdo a la relación siguiente:

$$A = P \times 0.642 \times h \times FC \times \left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_2}\right)$$

Donde:

A: Ahorro Anual (en MCal/año).

P: Potencia del motor.

η : Eficiencia del motor (1 para convencional, 2 para eficiente).

- **Uso de Motor Eficiente con Variador de Frecuencia (VDF) versus convencional.**

En este caso el ahorro, para cada rango de potencia, queda definido por:

$$A = \frac{P \times 0.642 \times h \times FC \times S_r}{\eta}$$

Donde S_r corresponde al ahorro porcentual obtenido al utilizar variadores de frecuencia en un motor al cual se le da un uso r .

Se distinguen dos categorías de usos para los cuales el ahorro de un motor varía. El primer caso es para bombas y ventiladores, en donde se considera un ahorro porcentual de 35% (S_{bombas}) y otro ahorro para compresores de aire, correas transportadoras y otros²⁰, con un ahorro porcentual de 15% (S_{comp}).

Los ahorros se obtienen para cada rango de potencia utilizando la potencia media.

²⁰ Ambos valores son obtenidos del estudio "Estimación Preliminar del Potencial de la Eficiencia en el Uso de la Energía Eléctrica al Abastecimiento del Sistema Interconectado Central", PRIEN 2008 corresponden a 35 y 15% respectivamente.

7.3 MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO EN EL SECTOR PAPEL Y CELULOSA

En Chile existen, actualmente, doce plantas de celulosa que operan un total de 17 líneas de producción. De éstas, 11 líneas de producción fabrican celulosa Kraft y el resto produce pulpa mecánica.

La producción de celulosa en el país alcanza los 5.500.000 de toneladas, con un consumo energético aproximado de 200 KWh por cada tonelada de celulosa producida [Minenergía, 2010].

Este sector ha tenido un crecimiento promedio anual en los últimos 15 años del 7.5% y un crecimiento promedio en los últimos 4 años de un 7.2% anual. Su consumo total de energía en el año 2010 es de 13.404 teracalorías. Los principales consumos energéticos utilizados en la industria de papel y celulosa en ese año fueron fundamentalmente leña y electricidad.

La evolución del consumo industrial se concentra en los subsectores Industrias Varias, Papel y Celulosa, y Siderurgia. De ellos, el que presenta una dinámica mayor es el de Papel y Celulosa, en cambio la Siderurgia no presenta incrementos significativos en el período analizado. El gran aumento del consumo del sector celulosa puede deberse a que Nueva Aldea (Celulosa Arauco) inició actividades en 2006 para producir 85.6000 toneladas y la ampliación de Santa Fe (CMPC) en 2007 para incrementar su producción en 780.000 toneladas²¹. Por otra parte, las exportaciones de Papel y Celulosa aumentaron de 1.650 a 2.616 USD millones FOB (aprox. 60%) entre 2005 y 2009²².

De acuerdo al Balance Nacional de Energía, en el cuadro siguiente se presentan los consumos de los últimos 4 años. Se puede apreciar la importante reducción del consumo de leña en el año 2010, que tiene que ver con la implementación de los sistemas de cogeneración.

Cuadro 21: Consumo de energéticos Sector Papel y Celulosa (en Teracalorías)

TCal	Petróleo Diesel	Petróleos Combustibles	Gas Licuado	Electricidad	Carbón	Gas Natural	Leña y Otros	Total Energéticos
2007	53	2,332	165	4,586	4	904	11,376	19,420
2008	104	2,260	190	4,597	0	18	12,390	19,559
2009	106	2,426	142	4,465	48	545	12,161	19,894
2010	119	1,199	58	3,767	0	976	7,285	13,404

Fuente: Balance Nacional de Energía

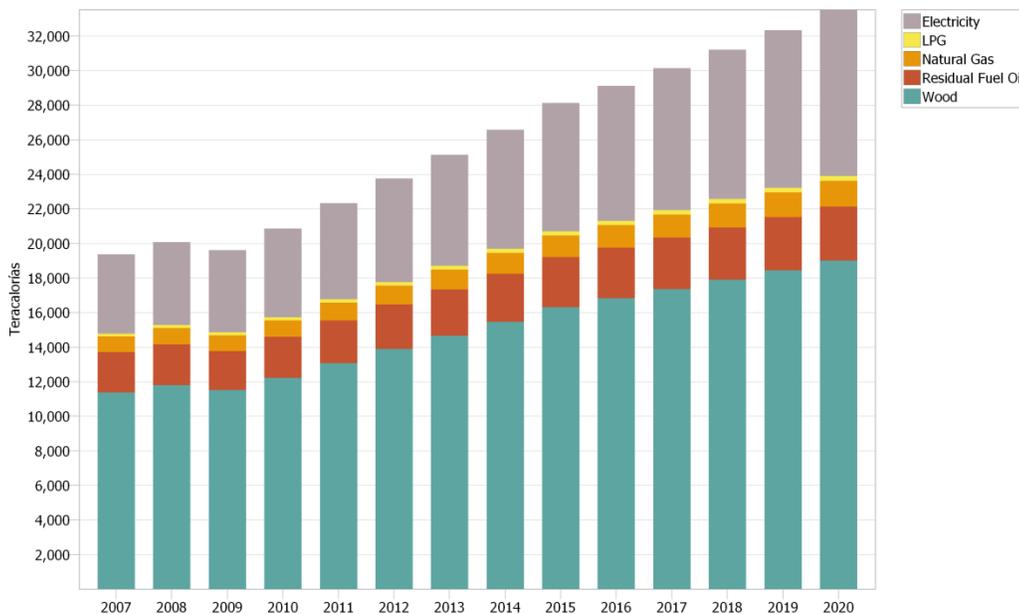
La energía consumida en los procesos industriales es utilizada principalmente como vapor dentro de los procesos industriales. Por otra parte, el mayor consumo eléctrico del sector es utilizado en Motor – Tracción – Fuerza.

²¹Fuente: “Latin American Markets”.

²²Fuente: Banco Central de Chile.

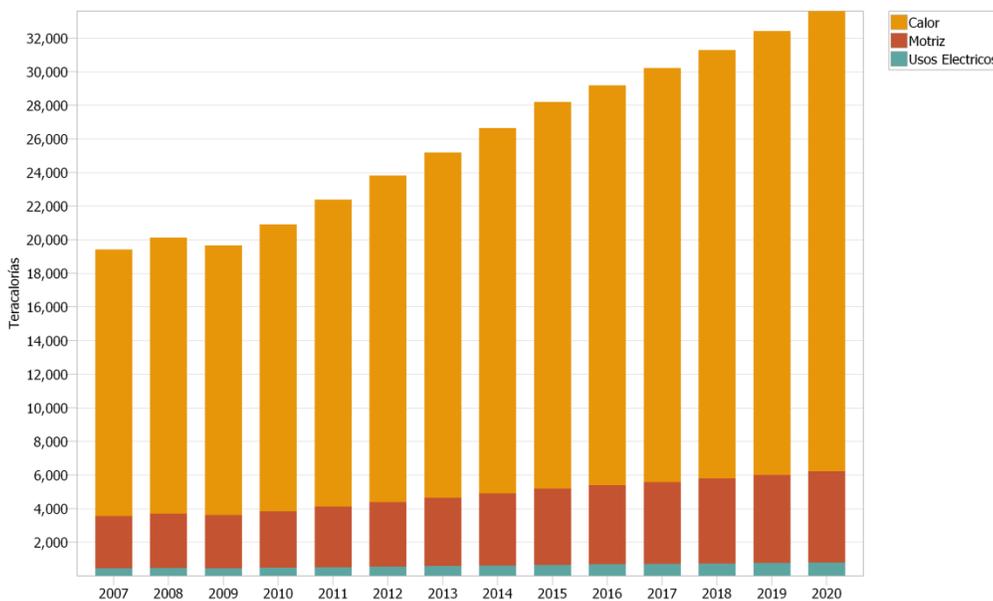
El consumo del sector se proyecta creciendo fuertemente. En efecto, valores típicos estiman crecimientos anuales promedio entre 6-7% entre los años 2010 y 2015, y de 3-4% entre 2015 y 2020. Las siguientes figuras presentan una estimación de la proyección de consumo energético de la industria de papel y celulosa hasta el año 2020 por combustible y por uso. En particular el consumo eléctrico esperado en el sector al año 2020 alcanzaría los 11,2 TWh.

Figura 27: Proyección de consumo energético, industria de papel y celulosa chilena 2007 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a LEAP (2011).

Figura 28: Proyección de consumo energético por uso, industria de papel y celulosa chilena 2007 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a LEAP 2011.

En lo que respecta a las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, básicamente se pueden diferenciar tres tipos de fuentes de emisiones.

En primer lugar, el consumo de combustibles fósiles que se requieren en las diversas fases del proceso de producción, tales como: las calderas o turbinas de gas para la producción de energía, las calderas de recuperación, los incineradores, los hornos de cal y la cocción, el lavado de gases residuales o secadores alimentados por combustibles fósiles.

En segundo lugar, el consumo de electricidad para el funcionamiento de la empresa, debido a la automatización del proceso y el desarrollo tecnológico en general.

Por último, las emisiones pueden ser generadas a partir de residuos del proceso orgánico, ya sea durante el tratamiento de aguas residuales o en la eliminación en un vertedero.

Las medidas de mitigación que principalmente se mencionan en la literatura se agrupan en las siguientes:

- Mejorar la eficiencia energética del proceso
- Uso de combustibles más limpios y la reutilización de biomasa generada por el proceso
- Uso de cogeneración para cubrir los requerimientos de calor y electricidad.

Mejorar la eficiencia energética del proceso

Dentro de este grupo de medidas se encuentran:

- Instalación de economizadores de combustible en las calderas.
- Cambio y ajuste de quemadores en calderas.
- Mejora del aislamiento de vapor y líneas de condensado.
- Optimización del proceso de fabricación de celulosa.
- Optimización de la evaporación, la quema y caustificación.
- Optimización del proceso de preparación de la pasta.
- Mejora de la eficiencia global de la fábrica.

Uso de combustibles más limpios y la reutilización de biomasa generada por el proceso

Dentro de este grupo de medidas se encuentran:

- Emisiones procedentes de biomasa se consideran neutras debido a su origen biogénico
- La industria tiene un gran potencial para la reutilización de la biomasa como combustible, ya que genera residuos de origen orgánico.
- Un doble beneficio que se obtiene mediante el uso de biomasa: la reutilización de un producto de desecho y la sustitución de un combustible fósil.

Uso de cogeneración para cubrir los requerimientos de calor y electricidad.

Dentro de este grupo de medidas se encuentran:

- Producción combinada de calor y electricidad para reducir la pérdida de ambos
- Reducción en el uso de combustible y por consiguiente de las emisiones a la atmósfera.
- Esta es una tecnología bien conocida y desarrollada que puede ser aplicada para las fábricas existentes y nuevas. No hay problemas significativos detectados en su uso
- Los requerimientos de energía y la relación calor / electricidad en la industria del papel y de cartón son los más apropiados para el uso de la cogeneración.
- Las emisiones por unidad de calor o electricidad se reducen considerablemente como resultado de una mayor eficiencia térmica.
- Las eficiencias térmicas generales puede alcanzar 93%, reduciendo así la tasa de emisiones de dióxido de carbono en aproximadamente un 50%, en comparación con los sistemas convencionales.

A continuación se presenta la evaluación de tres medidas que serán utilizadas para estimar el costo de abatimiento de las oportunidades de reducción de GEI en este sector.

En esta industria, los consumos específicos en Chile han decrecido desde 0,6 hasta 0,3 Tep/ton en el período 1990-2004. Internacionalmente se han alcanzado rendimientos del orden de 0,2 Tep/ton. Se estima que las medidas de este tipo podrían implicar mejoras en los rendimientos, alcanzando consumos del orden del 0,2 Tep/ton. En 10 años (al 2021), el potencial de reducción anual alcanzaría al 2,2% (PRIEN, 2008).

En la industria del papel y la celulosa la oportunidad real que existe es la de realizar una buena integración energética y una optimización de la utilización del agua de proceso (que se traduce también en una reducción en el consumo de energía). La introducción de los sistemas de cogeneración, una de las principales medidas evaluadas, depende de las curvas de oferta y demanda de calor, las cuales deben primero optimizarse y después diseñar el sistema de cogeneración (quiere decir el tamaño) a introducir. En el caso de la celulosa, prácticamente siempre es factible y rentable cogenerar, pero en principio no sirve de nada (la rentabilidad del proyecto es menor). Lo que se debe hacer son proyectos de desarrollo de integración energética más que sólo de cogeneración. El uso del agua también es un espacio no bien atendido y se puede reducir bastante energía por esta vía (PRIEN, 2008).

7.3.1 SISTEMAS DE COGENERACIÓN EFICIENTES

Descripción

La medida evaluada es la implementación de sistemas de cogeneración eficientes para la producción de vapor, agua caliente, y electricidad por medio de la quema de licores, cortezas, y otros desechos de la madera²³.

²³ CANMET Energy Technology Center – Varennes

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida. Los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Pulp and Paper Manufacturing Industry. EPA (2010).
2. PPEE (2010). "Estudio de Mercado de Eficiencia Energética en Chile", Programa País de Eficiencia Energética. Septiembre 2010
3. CP/RAC (2012). Regional Activity Center for Cleaner Production (CP/RAC). www.cprac.org.

Línea Base

Se considera como línea base la proyección de la tendencia histórica del consumo de energía del sector Papel y Celulosa, obtenida a partir del estudio PROGEA (2008). Ello no considera ninguna medida de reducción de consumos energéticos y sólo las variaciones del mercado. Los antecedentes recopilados en este estudio muestran que la tendencia de crecimiento de la industria se debería estancar a partir del año 2015, debido al estancamiento en la plantación de bosques.

Penetración de la medida

- En EPA (2010) se revisa un proyecto para instalar un sistema de turbina de gas de ciclo combinado con el objetivo de asegurar la viabilidad financiera de la empresa dado el marcado aumento de los precios de la energía. Corresponde a una planta de 92 MW.
- El caso de CP/RAC considera un proyecto con energía producida por la planta de cogeneración de 365 GWh y con un consumo de energía de 207 GWh, lo que se traduce en un excedente de 158 GWh que puede ser vendida. El ahorro de energía primaria es de 15%.
- En PPEE (2010), se evalúa la instalación de nuevas centrales de cogeneración en el tiempo, aumentando la capacidad instalada en 80 MW al 2015 (4 centrales de 20MW) y en 100MW adicionales al 2020 (5 centrales de 20MW).

Costos

Se han recopilado los costos de inversión, además de operación y mantenimiento, de acuerdo a la capacidad instalada del proyecto implementado. Adicionalmente, uno de los proyectos tenía antecedentes respecto a la amortización de la inversión.

Costo	CP/RAC	PPEE	EPA
Inversión	30 millones de Euros	15,43 MMUSD	75 MMUS\$
Potencia Instalada (MW)	41,5	20	92
Operación y mantención	N/D	0,0148 US\$ /kWhe	0,01 US\$/kWhe
Amortización	entre 8 y 10 años	N/D	N/D

Potencial de mitigación

- El caso de CP/RACy el de EPA no consideran una reducción de emisiones, pero esta se estimará con el factor de emisión de generación eléctrica del SIC. En el primer caso la reducción es de 365 GWh generados (158 GWh vendido a la red) y en el segundo de 75GWh.
- En el estudio PPEE (2010), la reducción de emisiones está ligada a un menor consumo eléctrico, aun cuando aumenta el consumo de combustible por el lado del proceso industrial. Estas emisiones son menores que las reducciones por electricidad (considerando Gas Natural como combustible base). Ello considera una reducción unitaria de emisiones de 0.169tCO₂e/kwh(eléctrico)-año. Ello se traduce en el siguiente horizonte de reducciones de emisiones por la generación adicional de energía eléctrica.

Potencial de Mitigación	CP/RAC	PPEE	EPA
Generación Eléctrica (GWh)	356	142	75
Emisiones de GEI (T CO ₂ e)	174.440	69.580	36.750

7.3.2 VARIADORES DE FRECUENCIA EN BOMBAS

Descripción

La medida consiste en la instalación de variadores de frecuencia en bombas de aguas blancas y bombas que requieran control de presión en la fabricación de papel. En este caso, la energía eléctrica consumida disminuye al reducir el caudal, en vez de disipar la energía en una válvula.

Las bombas representan una parte significativa del consumo de electricidad del sistema impulsado por motores en la industria del papel y celulosa. Las bombas se utilizan para presurizar y hacer circular agua, productos químicos de proceso, y las mezclas de fabricación de pasta, como parte del proceso de fabricación del papel y celulosa. Los costos de energía y costos de operación y mantenimiento son los componentes más importantes en los costos de vida útil de un sistema de bombeo. Por lo tanto, la optimización del diseño de un nuevo sistema de bombeo debe centrarse en la optimización de los costos del ciclo de vida [EPA, 2010].

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida. Los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Pulp and Paper Manufacturing Industry. EPA (2010).
2. “Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector industrial y minero de Chile”. Realizado para el Programa País de Eficiencia Energética, Ministerio de Energía por la Universidad Técnica Federico Santa María, Centro de Innovación Energética. Septiembre2010.

Línea Base

Se considera como línea base la proyección de la tendencia histórica del consumo de energía del sector Papel y Celulosa, obtenida a partir del estudio PROGEA (2008).

Penetración de la medida

- En el caso del estudio Minenergía, la energía ahorrada por ajustar el flujo a lo requerido es de un 10%. El consumo específico es de 1.034 [KWh/Ton], con una producción anual de 5.500.000 [Ton/año]. El estudio asigna un porcentaje de penetración del 76%.
- En el caso del estudio EPA, se estima un ahorro de 72.000 MWh/Año

Costos

Se estima un costo unitario de US\$ 1.000 para los 1.800 Variadores de Frecuencia existente, lo que implica una inversión de US\$ 2.880.000. Adicionalmente se calcula un ahorro de US\$ 6.824.214 al año.

En el caso del estudio EPA, sólo se obtuvieron los valores agregados para la inversión y el ahorro de energía, los que se resumen en el siguiente cuadro.

Costo	EPA	Minenergía
Inversión	US\$ 3.200.000	US\$ 2.880.000
Ahorro	72.000 MWh/Año	US\$ 6.824.214 al año

Potencial de mitigación

- Minenergía. Se estima un ahorro de 68.242 [MWh/año], que corresponde al 48% del potencial de ahorro en el ámbito eléctrico.
- El estudio EPA presenta una reducción de 72.000 MWh/Año.

Potencial de Mitigación	Minenergía	EPA
Generación Eléctrica (MWh)	68.242	72.000
Mitigación de GEI (T CO ₂ e)	33.438	35.280

7.3.3 MEJORAR AISLAMIENTO

Descripción

La medida consiste en mejorar el aislamiento de las líneas de vapor y condensados, de manera de disminuir la transferencia de calor entre equipos/líneas y el ambiente.

Antecedentes

Se han considerado los siguientes estudios donde se evalúa el efecto de implementar esta medida. Los datos obtenidos de estos estudios servirán de antecedente para describir los parámetros y variables de la evaluación.

1. Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Pulp and Paper Manufacturing Industry. EPA (2010).
2. "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry". An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency. Octubre 2009.

Línea Base

Se considera como línea base la proyección de la tendencia histórica del consumo de energía del sector Papel y Celulosa, obtenida a partir del estudio PROGEA (2008).

Penetración de la medida

Se han encontrado dos casos aplicados en la literatura, además que se estima un ahorro general de la industria de entre un 6 y 26%.

Costos

Los costos obtenidos del estudio EPA (2010) se resumen a continuación.

Costo	EPA 1	EPA 2
Inversión	US\$ 69.280	US\$ 25.000
Ahorro	US\$ 138.000	US\$ 80.000

Potencial de mitigación

De acuerdo al estudio EPA (2010), el ahorro total de energía asciende a unos 63.000 MMBtu, con un ahorro de más de US\$ 138.000. Ello implica un costo de implementación de US\$ 69.280, con un periodo de recuperación de seis meses. En otro caso, que considera la reparación del aislamiento se logra un ahorro energético anual de US\$ 80.000 a un costo de reparación de alrededor de US\$ 25.000. El periodo de recuperación para reparar el aislamiento es de cuatro meses.

Potencial de Mitigación	EPA 1	EPA 2
Generación Eléctrica (MWh)	18.460	10.695
Emisiones de GEI (T CO2e/año)	9.045	5.240

7.4 METODOLOGÍA GENÉRICA DE CÁLCULO DE COSTOS DE ABATIMIENTO

Los costos se evalúan como pagos anualizados para el costo de capital y gasto de operación y mantenimiento. Esto quiere decir que se considera un flujo anual constante durante un periodo de años fijo igual a la duración del proyecto o la vida útil del activo. Dicho flujo es la cuota constante de distribuir el valor presente del proyecto en los n años de vida del proyecto/activo.

Luego el costo anualizado es la suma de las inversiones anualizadas y los gastos de operación y mantenimiento anualizados.

$$CAE = I_{anualizado} + OM_{anualizado}$$

Por su parte la inversión anualizada corresponde al producto entre el valor anualizado de la inversión unitaria incurrida en cada año, y la penetración o números de inversiones que se realizaron durante el mismo año:

$$I_{anualizado} = VAN(I_i \times P_i) \cdot FRC$$

$$FRC = \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right]$$

Con

Donde:

I_i : Valor de la inversión unitario el año i .

FRC : Factor de recuperación del capital. La ponderación de un costo por este factor entrega el costo anualizado.

P_i : Penetración adicional de la acción o inversión unitaria el año i .

r : Tasa de descuento.

n : Numero de periodos del proyecto, o vida útil del activo.

El cálculo de los gastos de operación y mantenimiento anualizados es similar al caso de la inversión con la salvedad de que cada año de inversión o ejecución genera distintos flujos a lo largo de la vida útil del proyecto, a su vez estos flujos son consecuencia del parque acumulado de la acción o medida de mitigación.

$$OM_{anualizado} = VAN(FOM_i) \cdot FRC$$

FOM_i : Corresponde a todos los flujos de operación y mantenimiento gatillados por una acción ejecutada en el año i .

Los costos de abatimiento son definidos como el costo incremental de las medidas comparadas al escenario de línea base, evaluadas como unidades monetarias por cada tonelada de CO2 equivalente evitada, donde el capital disponible no es considerado una restricción.

Luego, el costo de abatimiento viene dado por la siguiente fórmula, la que representa la diferencia entre el costo de reducir una tonelada de CO₂, si se desarrolla una opción de mitigación, versus el escenario BAU.

$$\text{Costo de abatimiento} = \frac{CAE_{\text{Opcion}} - CAE_{\text{BAU}}}{Emisiones_{\text{Opcion}} - Emisiones_{\text{BAU}}} \text{ [$/tCO}_2\text{]}$$

La diferencia de emisiones entre ambos escenarios se define como el potencial de abatimiento de la opción de mitigación.

7.5 VARIABLES ALEATORIAS

A continuación se describen las variables aleatorias utilizadas en los distintos sectores de análisis considerando los rangos de los estudios de referencia. En el listado se excluyen la descripción de las variables aleatorias desarrolladas en la primera etapa de este estudio asociado exclusivamente al sector transformación, estas son todos los parámetros técnicos y de costos de las distintas tecnologías de generación, junto al precio del petróleo, el carbón y la biomasa para los años 2020 y 2035.

En general no se definieron correlaciones en las variables a excepción de los precios de un mismo combustible en 2 periodos distintos, este es el caso del petróleo, el carbón y la biomasa donde el valor del año 2020 posee un factor de correlación de 0,6 con el valor para el año 2035, Esto último con el fin de que la proyección asegure algún grado de coherencia en la tendencia a mediano y largo plazo del precio de los combustibles.

Sector transporte

Las variables consideradas como aleatorias en el sector son:

- El precio futuro de las tecnologías, el cual tiene una tendencia decreciente que está básicamente impulsada por la eventual caída del precio de las baterías de litio y la generación de economías de escala. Sobre la base de las distintas proyecciones de los estudios analizados se define una distribución triangular para dichas variables.
- Niveles de actividad de los vehículos y rendimientos, los cuales a pesar de ser variables técnicas medibles, deben ser extrapoladas a la totalidad del parque adicionando incertidumbre a su valor promedio real. En base a los valores de los distintos estudios se obtienen los parámetros de las distribuciones triangulares.
- Reducción de consumo y costos por capacitación son variables que presentan variabilidad de acuerdo a cada individuo que se le capacita, y de acuerdo al tamaño del grupo, región geográfica, etc., en caso del costo de la capacitación. Para estas variables se consideran distribuciones aleatorias, dados los valores presentados en los estudios de relevancia.

Cuadro 22: Variables aleatorias sector transporte.

Variables Transporte	Valor medio	Min	Max
Costo adicional Híbrido 2020 US\$	4000	3000	5000
Costo adicional Plug-in 2020 US\$	13500	12000	15000
Nivel de Actividad livianos KM/año	15300	15000	16000
Nivel de Actividad Taxis KM/año	26000	25000	27000
Rendimiento convencional KM/lt	11,46	10	12
Rendimiento Híbrido KM/lt	17,5	15,62	18,5
Rendimiento Plug-in KM/lt	28,5		
Rendimiento Plug-in e 2020 KM/KWh	5	4	5,2
Reducción consumo por capacitación %	4%	2,0%	5,0%
Nivel de Actividad Buses KM/año	60000	50000	65000
Nivel de Actividad Camiones KM/año	60000	55000	70000
Rendimiento Buses KM/lt	2,7	2,3	2,9
Rendimiento Camiones KM/lt	4	2,5	4,5
Costo Capacitación US\$	137	120	154

Fuente: Elaboración propia

Sector cobre

Las variables consideradas como aleatorias en el sector son:

- El precio de los motores convencionales y eficientes; si bien existe una estimación del precio, esta variable está sujeta a factores externos que pueden distorsionar el valor, como precio de commodities, distancias de embarque, etc. Por eso se considera que los precios pueden ser desde un 10% menor al valor estimado hasta un 20% superior, con una distribución triangular centrada en la dispersión cero.
- La eficiencia adicional por el reemplazo tecnológico puede variar de acuerdo a la eficiencia del motor convencional pudiendo ser mayor la ganancia de lo pronosticado, mientras por otro lado, los cálculos de aumento de eficiencia se realizan en condiciones particulares apropiadas que permiten explotar el máximo potencial de eficiencia para dicha evaluación, en otras condiciones esta ganancia de eficiencia puede caer considerablemente. Los valores presentados en la siguiente figura muestran la dispersión respecto al valor esperado de eficiencia ganado de un motor. Sus valores mínimos y máximos indican la mayor probabilidad de que la eficiencia efectiva sea menor (hasta 50%) que el valor esperado, a que sea mayor (20%), sobre el valor de referencia.
- El tiempo de uso de los motores dependerá de las variables productivas anuales, por lo que puede ser un factor importante de dispersión. Con este motivo se incluye como variable aleatoria de forma de medir el efecto de este factor en la incertidumbre de los resultados la variabilidad posible del tiempo de uso.

Cuadro 23: Variables aleatorias sector cobre.

Variables cobre	Valor medio	Min	Max
Dispersión precio motor (%)	0	-10	20
Dispersión eficiencia 5 (%)	0	-50	20
Dispersión eficiencia 5 - 20 (%)	0	-50	20
Dispersión eficiencia 20 -50 (%)	0	-50	20
Dispersión eficiencia 50 - 100 (%)	0	-50	20
Tiempo uso	7500	6500	8000

Fuente: Elaboración propia

Sector papel y celulosa

Las variables consideradas como aleatorias en el sector son:

- La inversión y los costos de operación y mantenimiento son consideradas variables aleatorias, dada la dispersión de los valores específicos encontrados en los estudios. Por esta razón se utiliza el promedio de los valores obtenidos de los estudios y los máximos y mínimos para generar una distribución aleatoria triangular.
- El nivel de cogeneración dependerá de las variables productivas anuales, por lo que puede ser un factor importante de dispersión. Con este motivo se incluye como variable aleatoria triangular de forma de medir el efecto de este factor en la incertidumbre de los resultados la variabilidad posible del tiempo de uso.
- Finalmente se consideran los costos y los ahorros potenciales de las medidas de variadores de frecuencia y aislamiento, de acuerdo a los promedio de los estudios referenciados, estos valores son distribuidos triangularmente.

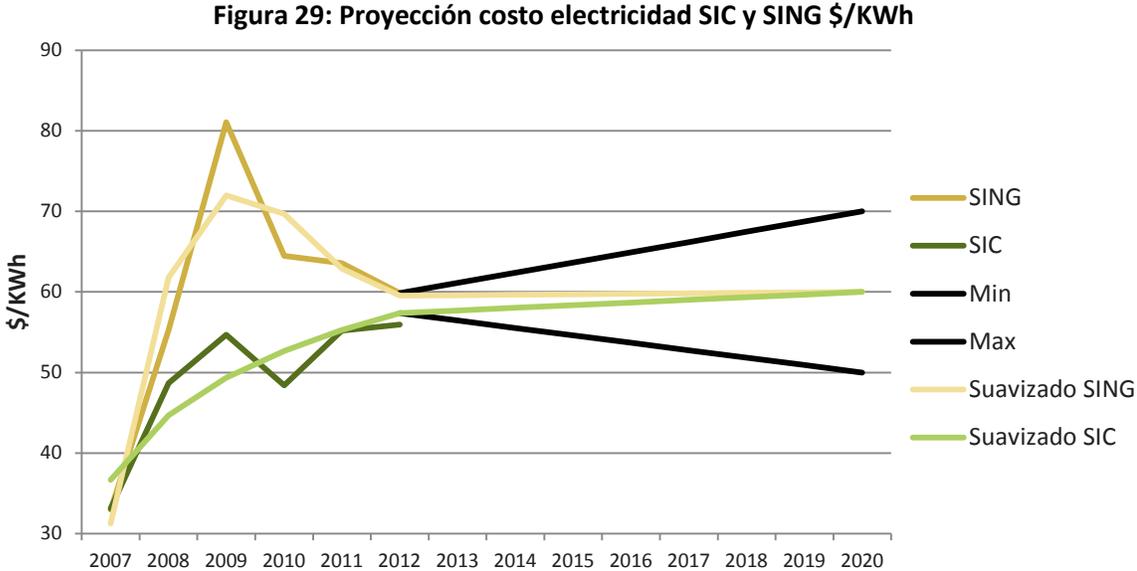
Cuadro 24: Variables aleatorias sector papel y celulosa.

Variables C&P	Valor medio	Min	Max
Tiempo cogeneración (hrs/año)	7100	6200	7300
Inversión Cogeneración MMUS\$/MW	0,8297	0,77	0,9
O&M cogeneración US\$/KWh	12,4	10	14,8
Ahorro variadores	10%	5%	15%
Costo variadores	1.600	1.500	1.700
Ahorro aislamiento	16%	6%	24%
Costo Aislamiento US\$/MWh ahorrado	3,00	2,34	3,75

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación de estas medidas se debe considerar la proyección del precio de la electricidad para ello se considera el precio monómico, el cual es básicamente la suma del precio promedio de la energía eléctrica del spot más el cociente entre el monto total de pagos por potencia puesta a disposición, dividido por la cantidad de energía comercializada. Este precio es un buen indicador del costo promedio de la energía. En nuestro caso se consideró el promedio anual entre los años 2007 y 2012 para generar una proyección. La curva de datos reales es suavizada y proyectada al año 2020

con un precio único para ambos sistemas eléctricos chilenos, el SIC y el SING: La siguiente figura muestra la proyección del precio medio con un máximo y mínimo al año 2020.



Fuente: Elaboración propia

8 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA

Para la construcción de la curva se procede a ordenar las medidas de menor a mayor costo de abatimiento, de acuerdo a su costo medio (se presenta también el costo con un 5% y un 95% de confianza), y se presentan sobre el eje de potencial de abatimiento, medido en Toneladas de CO₂e²⁴. A continuación se presenta el cuadro que ordena el grupo de medidas analizadas (incluidas las medidas de generación eléctrica) y las curvas de abatimiento que incluye las medidas de generación eléctrica y una que incluye sólo aquellas que corresponden a los tres sectores de demanda energética (transporte, cobre y papel y celulosa).

Cuadro 25: Costo de abatimiento para medidas de mitigación sectores generación eléctrica, transporte, papel y celulosa y cobre (r=6%).

Sector	Medida	Moda (US\$/tCO ₂)	5%	95%	Potencial (tCO ₂)
Transporte	Taxis Hibr.	-289,0	-323,6	-232,6	63.093
Transporte	Híbridos	-276,0	-309,2	-224,0	78.096
P&C	VSD	-200,4	-236,1	-170,5	45.599
Cobre	PIME	-198,3	-228,0	-165,7	4.016
P&C	Aislación	-191,7	-224,3	-161,7	11.760
Cobre	MEPS	-174,1	-205,2	-141,0	74.448
Cobre	PRM	-168,8	-198,5	-136,0	43.790
Transporte	Capacitación	-143,0	-248,6	147,7	37.182
P&C	Cogeneración	-79,4	-114,2	-44,8	347.900
Cobre	PVSD	-57,0	-98,8	-12,1	21.247
Transporte	Taxis PI	-38,0	-83,5	-1,1	97.832
Transformación	Embalse	-21,2	-28,0	-15,2	8.760.000
Transformación	Geotérmica	-13,2	-20,6	-4,0	6.820.000
Transformación	Mini Hidráulica	-10,9	-16,9	-4,8	3.000.000
Transformación	Nuclear	13,7	3,5	24,6	6.900.000
Transporte	Plug-in	22,0	-25,0	57,2	87.193
Transformación	Eólica	25,2	14,0	38,5	4.866.667
Transformación	Biomasa	79,0	61,6	102,3	1.380.000
Transformación	Solar CSP	89,4	71,7	110,8	890.000
Transformación	Solar PV	92,8	76,2	109,7	4.800.000
Transformación	CCS	112,7	97,1	129,2	1.760.000
Transformación	Mareomotriz	152,3	134,0	181,7	200.000

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro se puede apreciar que existe una importante cantidad de medidas (con un nivel de confianza del 95%) con costos negativos en los 4 sectores, lo que es un resultado muy importante,

²⁴ En el informe final de la etapa 1 de este estudio se detalla la metodología de construcción de la curva.

teniendo en cuenta los esfuerzos de mitigación que deben realizar los países en que se aplicará esta metodología.

Figura 30: Curva de abatimiento para medidas de mitigación sectores generación eléctrica, transporte, papel y celulosa y cobre (r=6%).

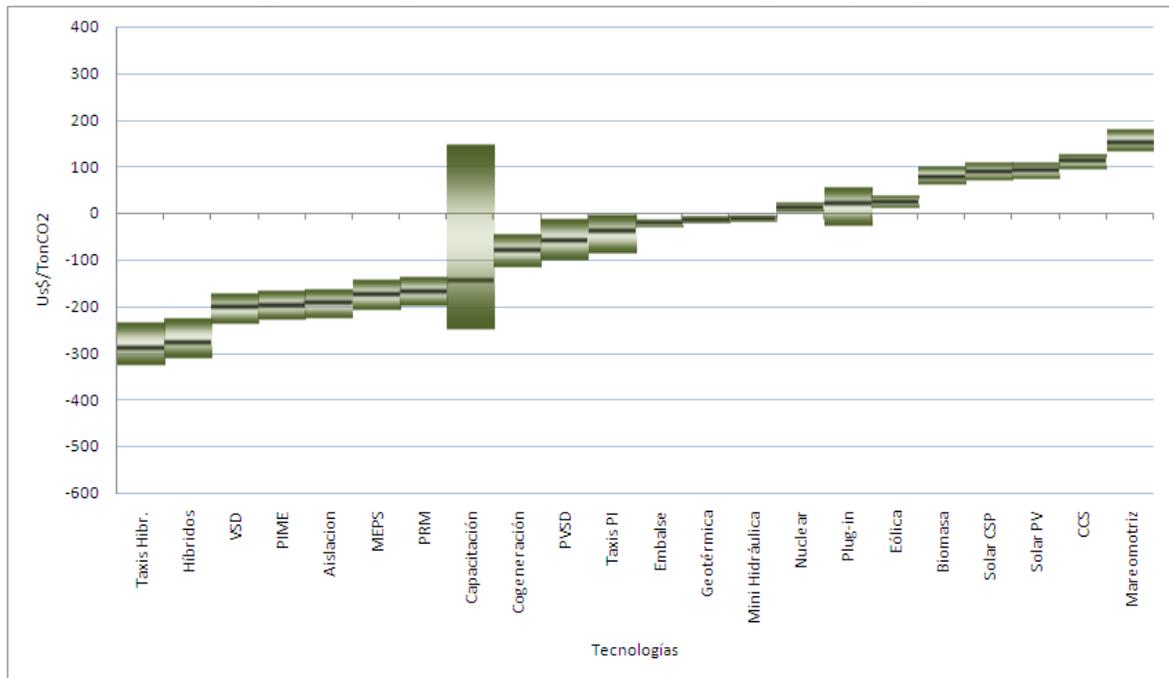


Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se aprecia que el sector generación posee el mayor potencial de reducción entre los sectores revisados, seguido por las medidas del sector papel y celulosa (en particular cogeneración). En este caso, la mitad del potencial de reducción se puede alcanzar con medidas con costos negativos.

En la figura siguiente se aprecia esta misma curva que incluye la variación de los resultados (incertidumbre) en el valor de la tonelada reducida de cada medida presentada. Se puede apreciar rangos de dispersión bastante importantes en algunas de las medidas (incluso superiores a los valores del resultado de la medida). Ello reafirma la importancia de hacer estos análisis en este tipo de ejercicios.

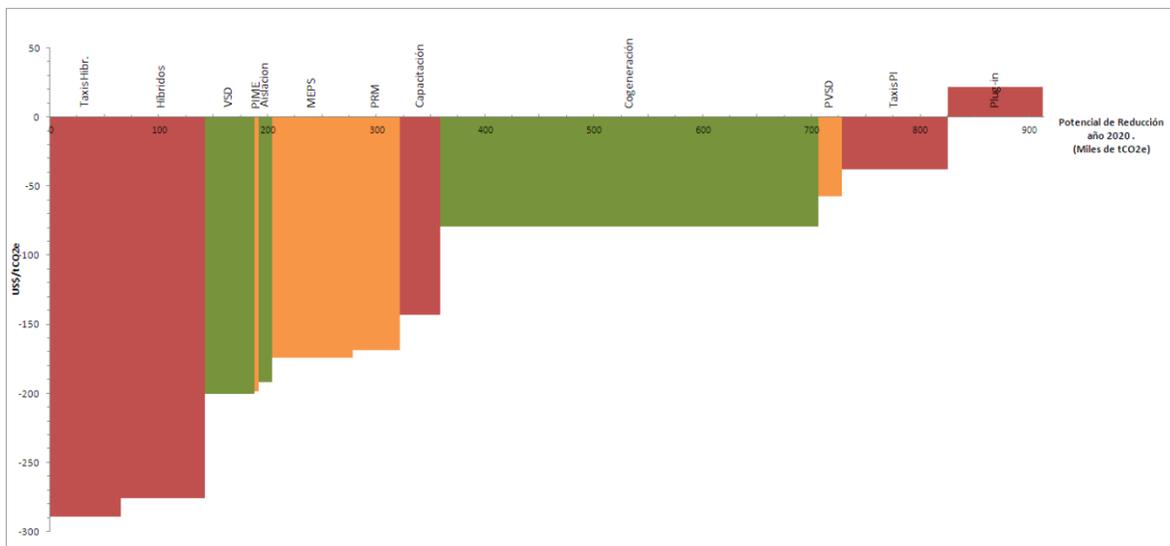
Figura 31: Dispersión de los resultados completos (r=6%).



Fuente: Elaboración propia

En la figura siguiente se aprecia que la mayor parte de los sectores posee medidas con costos negativos (resultado esperado, dado que en gran parte son medidas de eficiencia energética) y sólo la implementación de vehículos plug-in es una medida con costos positivos. Casi el 90% del potencial se puede lograr con estas medidas “gratuitas”.

Figura 32: Curva de abatimiento sectores transporte, papel y celulosa y cobre (6%).

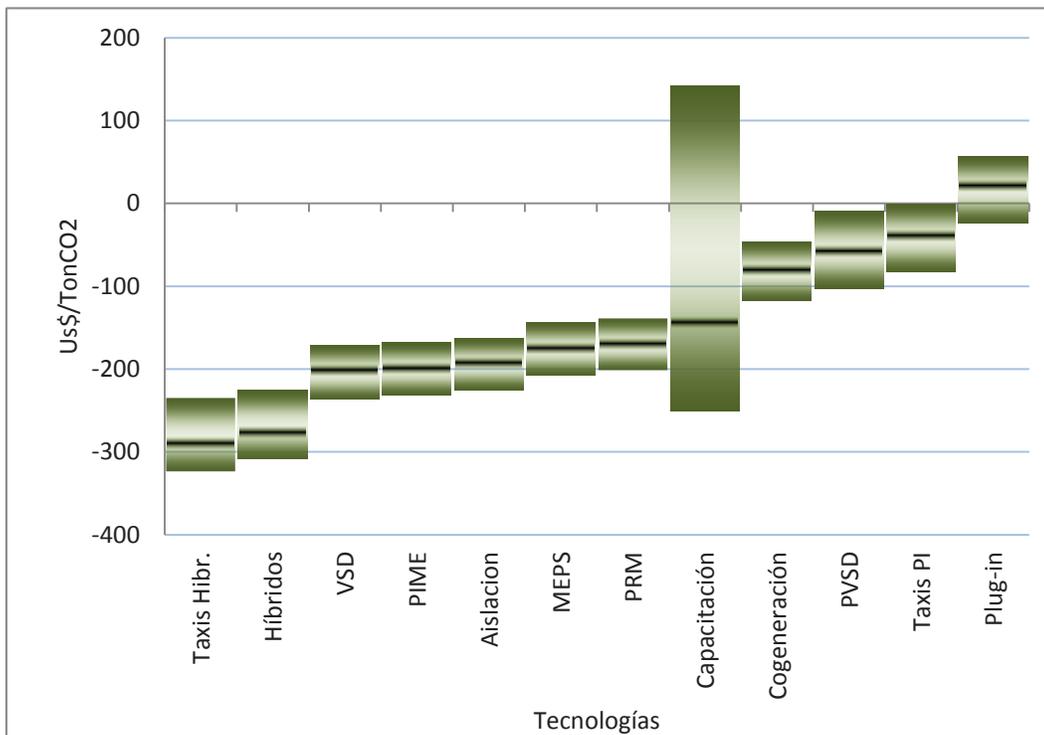


Fuente: Elaboración propia

En la figura siguiente se puede apreciar de mejor forma que existen medidas como capacitación, cogeneración, vehículos plug-in o los variadores de frecuencia en cobre con una incertidumbre muy

alta y que podría cambiar alguna decisión al no saber si tiene costo positivo o negativo o si la medida tendrá un costo real superior a la que se supone que es más cara (medida posterior de izquierda a derecha) dada la alta variabilidad de la misma.

Figura 33: Dispersión de los resultados demanda (r=6%).



Fuente: Elaboración propia

En el cuadro siguiente se presenta uno de los análisis mencionados más arriba, que es la comparación entre medidas contiguas en la línea ascendente de costo de abatimiento. En este caso se consideran todas las medidas evaluadas (incluidas las de generación eléctrica) y se relevaron aquellas que tenían una probabilidad superior al 30%, de ser mayores que la medida que se encontraba a su derecha en la curva. En el caso de que sean medidas de sectores distintos (por ejemplo transporte vs. minería) este análisis cobra aún mayor relevancia, dada la nula correlación que existe entre los sectores y sus variables input.

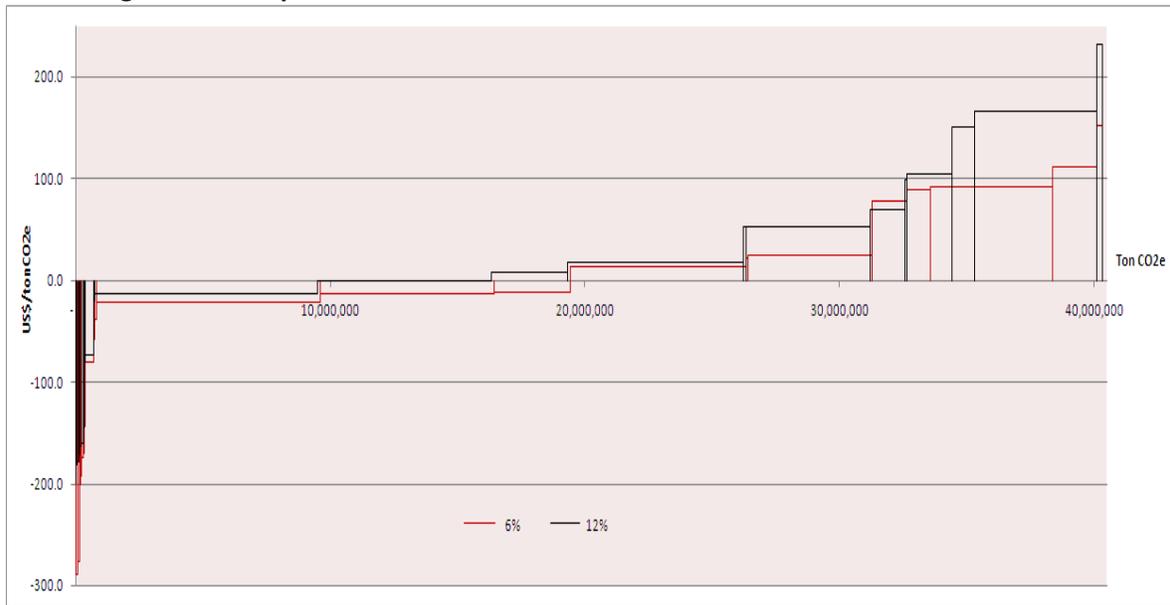
Cuadro 26: Evaluación comparativa de medidas con resultados inciertos

	VSD Bombas P&C > PIME	PIME > Aislamiento P&C	PVSD > Taxis PI	Geotermia >Minihidro	Nuclear > PI	PI > Eólica	Solar CSP > Solar PV
Pbb	45%	39%	35%	32%	48%	33%	43%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se presentan conjuntamente las curvas de costos marginales de abatimiento para ambas tasas de descuento utilizadas, la social de 6% y la privada de 12%.

Figura 34: Comparación de Curvas de Abatimiento con distintas Tasas de Descuento



Fuente: Elaboración propia

Lo último es relevante porque los resultados de las curvas de costo marginal de abatimiento sugieren que existe espacio para obtener beneficios sociales y privados. Que exista potencial de aumentar la eficiencia significa que abundan barreras y fallas de mercado que impiden la concreción de un sinnúmero de buenas iniciativas.

9 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Este estudio aporta en términos metodológicos respecto de incorporar la incertidumbre en la toma de decisiones para el caso específico de la mitigación del cambio climático. La incorporación de la incertidumbre a través de la simulación permite mostrar la importancia de incluirla en estos tipos de análisis, que involucran variables técnico-económicas y “ambientales” (en este caso gases de efecto invernadero). Ello va asociado a la mejora en la calidad y cantidad de la información que se requiere en las evaluaciones y los costos que involucra el logro de una base de información más fidedigna. La metodología resulta ser muy relevante y existen espacios reales de su utilización en distintos sectores productivos del país y en otros países de la región.

Los resultados derivados de este estudio permiten enriquecer el análisis determinístico. En particular, es posible conocer rangos de probabilidad de ocurrencia para los niveles de costos de las distintas medidas. De los resultados es posible desprender que el valor obtenido ignorando la incertidumbre difiere del valor esperado del costo unitario de abatimiento. Esto confirma que evaluar cada parámetro en su valor medio no entrega el valor más probable de la función de costos de abatimiento.

En el proyecto se han podido caracterizar opciones de mitigación para el sector de generación eléctrica y tres sectores específicos de demanda y con relevancia en su intensidad energética y de emisiones de GEI en Latinoamérica, con el propósito de construir una curva de abatimiento, incluyendo explícitamente la incertidumbre.

La incorporación de la incertidumbre permite reducir la posibilidad de cometer errores en las decisiones de política. Esto considerando que la probabilidad que todas las variables aleatorias tomen su valor medio es nulo. Por ello, la costo-efectividad resulta altamente incierta y este tipo de análisis permite estimar cotas de estos costos. En general, las principales fuentes de incertidumbre resultan ser las variables transversales de precios de los energéticos y los costos de inversión de las tecnologías de generación eléctrica.

Los resultados obtenidos permiten visualizar algunas oportunidades en que el análisis determinístico entrega valores distintos al probabilístico, con un nivel de confianza definido (95%), lo que haría cambiar la decisión de inversión. En efecto, como se aprecia en la sección de resultados del sector generación eléctrica, al considerar incertidumbre el ranking de algunas opciones resulta incierto. Considerando un nivel de confianza de 95% cambia el orden del ranking para las opciones mini-hidro con geotermia y solar PV con solar CSP, confirmando la relevancia de las consideraciones de incertidumbre en la toma de decisiones.

Los sectores cobre y papel y celulosa muestran medidas que se diseñan de manera de obtener resultados costo efectivos. Así se muestra que los ahorros provenientes de la eficiencia energética se traducen en ahorros económicos importantes que justificarían la inversión y la incorporación de instrumentos que ayuden a derribar las barreras asociadas a su implementación.

Dado que el sector transporte es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, la implementación de medidas de mitigación como las que se proponen en este estudio es clave para la sustentabilidad del mismo y para cumplir con los compromisos respecto a cambio climático que están adquiriendo los países de la región. Lamentablemente, los potenciales de reducción que se logran son bastante bajos y con incertidumbres no despreciables.

Este trabajo entrega un primer acercamiento al análisis de mitigación de gases efecto invernadero utilizando métodos de simulación. Sin embargo, sería deseable profundizar el estudio en varios puntos de la investigación:

- En términos de enriquecimiento del modelo, existe la alternativa de incorporar costos externos en la medida y que éstos puedan ser cuantificables. Por ejemplo, se pueden incorporar co-beneficios derivados de mejor calidad ambiental del aire en el sector de generación eléctrica.
- Profundizar respecto del rol de las distribuciones es otro punto importante. Específicamente, resulta relevante estudiar seriamente cómo cambia la distribución final del costo de abatimiento si se cambian las distribuciones. Por ejemplo, determinar si existen diferencias significativas si se considera una distribución uniforme o triangular.
- En el mismo sentido del punto anterior, es clave profundizar respecto de cómo asignar la forma funcional de las distribuciones y los parámetros clave que la caracterizan.
- Resulta importante analizar el rol que tiene el análisis de correlaciones. En el modelo sólo se correlacionan las trayectorias de precios de un mismo energético. Resulta relevante profundizar en aspectos teóricos para después aplicar distintos niveles de correlaciones entre variables. Preguntas clave resultan ser: ¿Cómo inciden en los resultados consideraciones de correlación? ¿Son estos cambios significativos? ¿Qué correlaciones son las más significativas?
- Resulta interesante también incorporar trayectorias para muchas de las variables aleatorias. Actualmente variables como los costos de inversión, otros de operación, el factor de planta, la eficiencia muestran aleatoriedad pero sólo una vez (en el primer año y no una trayectoria). Resulta relevante considerar movimientos en que, por ejemplo, el factor de planta de una central eólica vaya aumentando y acercándose a su potencial.
- Por último, también resulta interesante poder desarrollar un análisis del valor esperado de la información, que permita cuantificar cuánto cuesta mejorar la incertidumbre en aquellos casos que no es posible tomar decisiones con el criterio de certidumbre definida previamente

En general, los resultados del estudio muestran que suele haber proyectos de mitigación rentables. Una amplia gama de fallas han sido analizadas en la literatura de cambio climático, entre las que destacan la baja prioridad de los agentes (consumidores y empresas) a reducir costos de energía y a reducir emisiones, desconocimiento y problemas con el acceso al capital.

Por último, entendemos que esta metodología tiene una alta replicabilidad en países de la región, para lo cual se requiere de información de cierta calidad o de expertise en el sector involucrado, de manera que se puedan establecer los parámetros, criterios y enfoques necesarios para incorporar la incertidumbre en las variables de interés.

10 REFERENCIAS

- EPA (2010). "Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Pulp and Paper Manufacturing Industry". Prepared by the Sector Policies and Programs Division Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency. Octubre 2010.
- Minenergía (2010). "Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector industrial y minero de Chile". Realizado para el Programa País de Eficiencia Energética, Ministerio de Energía por la Universidad Técnica Federico Santa María, Centro de Innovación Energética. Septiembre 2010.
- UPME et al (2010). "Ahorro de energía en la industria del papel". Elaborado por Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente, para la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) y el Instituto Colombiano para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología. "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS).
- CCG (2011). "Estimaciones de Costo y Potencial de Abatimiento de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Diferentes Escenarios Futuros". Preparado para el Ministerio de Hacienda por el Centro de Cambio Global, 2011.
- PNAEE (2010). "Plan nacional de acción de eficiencia energética 2010-2020". Elaborado por Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, Instituto de Asuntos Públicos, para el Programa País de Eficiencia Energética de la Comisión Nacional de Energía. Abril de 2010.
- PPEE (2010). "Estudio de Mercado de Eficiencia Energética en Chile", Programa País de Eficiencia Energética. Septiembre 2010
- Regional Activity Center for Cleaner Production (CP/RAC). www.cprac.org.
- EPA (2009). "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry". An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency. Octubre 2009
- Madrid (2005). "Proyectos emblemáticos en el área de la energía". Dirección general de industria, energía y minas. Comunidad de Madrid. 2005
- PNUD (2011). "Evaluación de Flujos de Inversión y Financieros de los Sectores Silvoagropecuario, Transporte y Subsector Hídrico de la Infraestructura", 2011.
- PROGEA (2008). "Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile: Antecedentes para el desarrollo de un marco regulatorio y evaluación de instrumentos de reducción", PROGEA 2008
- CAMPOS (2011). Memoria de título "Análisis estocástico del costo de una cartera eficiente de medidas de mitigación de gases de efecto invernadero para el cumplimiento de objetivos de reducción en Chile", Bruno Campos, 2011.
- LEAP (2011). "Implementación del modelo LEAP" PROGEA para el Ministerio de Energía, Enero 2011.
- Morgan y Henrion(1990), Morgan, M Granger; Henrion, Max, "Uncertainty". A Guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis, Cambridge, University Press.

- SS (2012). "Perspectivas y Factibilidad de Tecnologías de Transporte en Chile" Sistemas Sustentables para el Ministerio de Energía
- Alarcón (1992), Alarcón Cárdenas L.F., "Project Performance Modeling: A Methodology for Evaluating Project Execution Strategies", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, May, 1992.
- Burmaster y von Stackelberg (1991), Burmaster, David and von Stackelberg Katherine, "Using Montecarlo Simulations in Public Health Risk Assessments: Estimating and Presenting Full Distributions of Risk", Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, Vol. 1, No. 4, 1991.
- Burmaster y Harris (1993), Burmaster, David and Harris, Robert, "The Magnitude of Compounding Conservatism in Superfund Risk Assessments", Risk Analysis, Vol 13, No 2, 1993.
- Burmaster (1996), Burmaster, David, "Benefits and Costs of Using Probabilistic Techniques in Human Health Risks Assessments — with Emphasis on Site-Specific Risk Assessments", Human and Ecological Risk Assessment, Vol 2, No 1, pp. 35-43, 1996.
- Gratt (1996), Gratt, Lawrence, "Air. Toxic Risk Assessment and Management: Public Health Risk from Normal Operations", Van Nostrand Reinhold, A Division of International Thomson Publishing Inc.
- Group of Economic Experts (1991), Group of Economic Experts, "Dealing with Uncertainty", Organisation for economic co-operation and development, Paris, Documento de Trabajo.
- Morgan (1993), Morgan, M. Granger, "Risk Analysis and Management", Scientific American, July, 1993, pp. 24-30.
- Salinas (1994), Salinas, Julio, "Stochastic Health Risk Assessment for a Hazardous Waste Incinerator", Hazardous Waste and Public Health, International Congress on the Health Effects of Hazardous Waste, Princeton Scientific Publishing Co., Princeton New Jersey, pp. 29-44, 1994.
- Mietzner, D. and Reger, G (2005). "Advantages and disadvantages of scenario approaches for strategic foresight". Int. J. Technology Intelligence and Planning, Vol. 1, No. 2, 2005
- O'Ryan, R. and Díaz, M. (2008), "The Use of Probabilistic Analysis to Improve Decision- Making in Environmental Regulation in a Developing Context: The Case of Arsenic Regulation in Chile". Journal of Human and Ecological Risk Assessment; Vol. 14, Nº 3, May – June 2008.
- McKinsey & Co. (2007). "Reducing U.S. Greenhouse Gas Emissions: How Much at What Cost?. U.S. Greenhouse Gas Abatement Mapping Initiative, 2007.
- McKinsey & Co. (2009). "Pathways to Low-Carbon Economy": Version 2 of the Global Greenhouse gas Abatement Cost Curve.
- JANSEN J.C. (2006), "Social cost-benefit analysis of climate change mitigation option in a European context".
- PWC (1999). "Uncertainty & Risk Analysis, A practical guide from Business Dynamics", PricewaterHouse, 1999.

- Díaz M. 1997. Manuel Díaz R. “Desarrollo de un Modelo para el Análisis de Instrumentos de la Regulación Ambiental: Aplicación al Arsénico”, Tesis, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Oxera (2002). “A social time preference for use in long-term discounting”, UK, 2002.
- McKittrick R. 1999. A Derivation of the Marginal Abatement Cost curve. Journal of Environmental Economics and Management.
- Kesicki F. (2010 (a)). Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making – Expert-Based vs. Model-Derived Curves.
- Kesicki F. (2010 (b)). Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis.
- Jackson (1991). Least-cost greenhouse planning.
- Clerc, Díaz (2010). Opciones de Estudio de Cambio Climático, PROGEA.
- Philibert C. (2008). Price caps and price floors in climate policy.
- IEA (2010). Projected Costs of Generating Electricity 2010”, IEA y Nuclear Energy Agency NEA.
- UCS (2011). A Risky Proposition: The Financial Hazards of New Investments in Coal Plants, Union of Concerned Scientists, Marzo 2011.
- CCCUK (2008). Building a low-carbon economy – the UK’s contribution to tackling climate change, Committee on Climate Change, Diciembre 2008.
- Sujiyama S. (2007). Monte Carlo simulation/risk analysis on a spreadsheet: review of three software packages, Publicación nº 9, Primavera 2008. SOBOL I. M. 1967. Distribution of points in a cube and approximate evaluation of integrals
- <http://www.orms-today.org/RD/companies/lumina.html>
- Guía para el uso de @RISK. Versión 5.7, Septiembre 2010.
- SimulAr: Simulación De Monte Carlo En Excel, Manual de Usuario.

ANEXOS

A.1. CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN EVALUACIÓN ECONÓMICA

Uno de los principales problemas que entorpecen la toma de decisiones en la mayoría de las situaciones de la vida diaria, es la presencia de incertidumbre en las variables que rigen los procesos.

El análisis de incertidumbre de la evaluación económica es uno de los temas más importantes que deben considerarse, ya que permite determinar qué tan sensible es el análisis realizado a las inherentes y grandes incertidumbres en muchas de las variables claves del modelo.

En el caso de la evaluación de una medida de mitigación, esta requiere integrar muchos tipos y fuentes de información conocida sólo con algún nivel de precisión. Es por esto que utilizar directamente los "valores más probables" o "promedio" tiene importantes limitaciones. La probabilidad que el resultado de la variable de interés se iguale a la estimación usando valores promedio es prácticamente nula. Pero más importante se ignora el riesgo de equivocarse²⁵. Por lo tanto no hay que preocuparse del promedio sino que del tamaño, frecuencia y causas de las variaciones [Fung, 2010].

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

Para realizar un análisis de incertidumbre existen varias metodologías, algunas de ellas se describen a continuación.

¿Por qué realizar Análisis de Incertidumbre?: El problema del Enfoque Determinístico

Hoy en día, se recomienda el uso de los enfoques determinísticos para el análisis de los problemas relacionados con la toma de decisiones. Dicho enfoque se basa en el uso de algoritmos, metodologías y datos disponibles, que se consideran adecuados al momento de llevar a cabo una evaluación. Este tipo de datos de entrada constituye el denominado "enfoque determinístico".

Las principales falencias que se presentan en los análisis del tipo determinístico son: i) Las variables de entrada o inputs de los modelos asumen un valor fijo simple, sin considerar la variabilidad inherente de los parámetros de exposición. En general las variables son no representativas y en algunas ocasiones demasiado conservadoras. ii) El output es un valor simple que no estima la propagación de la incertidumbre ni considera la variabilidad que debiera tener el resultado final. iii)

²⁵ <http://www.strategy-at-risk.com/2011/03/01/plans-based-on-average-assumptions/>

No se pueden examinar los efectos de las variables independientes o las correlacionadas, ya que en este tipo de análisis la covarianza no es estudiada. Por todas estas falencias, este enfoque ha sido criticado duramente [Salinas 1994].

Un problema muy particular es el del análisis de sensibilidad determinístico, que consiste en estimar los valores extremos de las variables inputs de un modelo (máximo y mínimo) y combinarlos para obtener los casos extremos de la variable resultante. El enfoque clásico consiste en modelar el “mejor caso”, basado en las estimaciones de los valores mínimos de los inputs; y el “peor caso”, basado en las estimaciones de los valores máximos de los inputs; y concluye que el valor más probable se encuentra entre los dos casos extremos calculados.

Este método se vuelve sumamente complejo cuando se aplica a modelos con un gran número de inputs, y además los valores extremos de la variable output tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja. Por ejemplo, se desea calcular la razón entre el “peor caso” y el valor nominal de una variable que depende de la multiplicación de cinco variables, cuyo rango varía entre 0 y 1, y con un valor probable estimado de 0,1 para cada una. Se tiene lo siguiente:

$$\text{Factor para "peor caso"} = (1)^5 = 1$$

$$\text{Factor para "caso nominal"} = (0,1)^5 = 10^{-5}$$

$$\text{Razón}_{\text{nominal/peor}} = 10^{-5}/1 = 10^{-5}$$

Luego, la razón representa un factor de 1 a 100.000, el cuál es un rango de estimación sumamente amplio, que hace imposible tener alguna luz acerca de los probables valores extremos de la estimación [Gratt, 1996]. Ejemplos similares que confirman la inconveniencia del uso del enfoque determinístico y más aún, del uso de valores determinísticos conservadores (extremos), se pueden encontrar en [Burmater y Harris, 1993], [Burmater, 1996], y [Burmater y von Stackelberg, 1991].

Dadas las desventajas y sesgos que presenta el enfoque determinístico, se propone la alternativa de incorporar y cuantificar la incertidumbre en cada etapa del proceso de análisis. La probabilidad es ciertamente el formalismo más conocido y más usado para cuantificar la incertidumbre, y los avances en softwares comerciales facilitan su análisis y tratamiento, permitiendo la representación de variables aleatorias en forma sencilla.

La teoría de decisiones ha demostrado que es importante considerar la relevancia de la incertidumbre en casos como los siguientes:

- Cuando se analiza un problema en el cuál la actitud de las personas en cuanto al riesgo es muy importante.
- Cuando se debe combinar información de diferentes fuentes que presentan gran incertidumbre.
- Cuando se debe tomar la decisión de la conveniencia de utilizar más recursos en la adquisición de información adicional. En general mientras más grande es la incertidumbre mayor es el valor esperado de la información adicional.

Algunas otras ventajas y desventajas del análisis de sensibilidad son su fácil aplicación y entendimiento; teniendo en contra que sólo permite analizar variaciones de un parámetro a la vez,

no utiliza información como las distribuciones de probabilidad del parámetro a sensibilizar y no entrega distribución de probabilidades de los indicadores de rentabilidad VPN y TIR.

Por otro lado, las principales ventajas de los métodos de simulación de muestreo aleatorio, sobre los enfoques determinísticos son las siguientes:

- 1) Los inputs definidos como distribuciones estadísticas cubren el rango completo de valores posibles.
- 2) Los parámetros de los inputs son variados aleatoria y simultáneamente, permitiendo la propagación de la incertidumbre a través del modelo.
- 3) La simulación genera distribuciones de frecuencia estadísticamente válida y totalmente caracterizada, cubriendo el rango completo de valores posibles.

De esta forma, se aprecia que por medio de los métodos de muestreo aleatorio se puede realizar un análisis más riguroso que con los métodos de simulación discretos, haciendo posible un buen análisis de sensibilidad y de importancia de las variables. Además permite obtener, siendo cuidadosos en los análisis, resultados mucho más confiables y de una presentación estadística con mayor calidad.

Si bien la aplicación del método de simulación conlleva muchas ventajas, también existen desventajas asociadas. Dentro de las principales desventajas se pueden nombrar:

- 1) El valor de la simulación depende de la calidad de la información asociada con los parámetros de distribución del input (por lo que se requiere una caracterización cuidadosa de la distribución asignada).
- 2) Cualquier cambio en un input implica volver a correr el modelo completo.
- 3) La covarianza o el grado de interdependencia entre las variables debe ser conocido.
- 4) Se necesitan más fuentes y documentación para establecer distribuciones, suposiciones y covarianzas.
- 5) El output de un análisis puede llevar a un falso sentido de certidumbre (sobreconfianza en los resultados).

Definición de la Incertidumbre: Naturaleza y Fuentes

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

El propósito central en la toma de decisiones, y en la formulación y análisis de políticas es identificar los factores relevantes y fuentes de desacuerdos en un problema, de tal forma de poder anticipar lo

inesperado. El tratamiento consciente de la incertidumbre nos obliga a pensar más cuidadosamente acerca de estos temas y en las eventualidades y contingencias del problema [Morgan y Henrion 1990]. El tratamiento exitoso de la incertidumbre envuelve algo más que describir las incertidumbres en las variables individuales y la propagación de ellas a través del modelo. A menudo, las dificultades de entender el problema y las limitaciones e incertidumbres en los modelos actuales son más importantes en el análisis. Es más, el desarrollo de modelos para la toma de decisiones, implica la definición de una gran cantidad de variables, las cuáles en general conllevan algún grado de incertidumbre asociada.

Tipos de Variables en el Análisis

Para el mejor conocimiento y análisis de los tipos de variables que pueden ser consideradas en los modelos de análisis de decisiones, en [Morgan y Henrion, 1990] se definen los principales tipos, con sus posibilidades de representación de la incertidumbre. A continuación se presentan tres de las más utilizadas:

Variables empíricas. Representan propiedades medibles en la modelación de los sistemas del mundo real, y su incertidumbre se puede expresar en la forma de una distribución de probabilidad. En la literatura se ha sugerido que estas son las únicas variables en la cuales la incertidumbre puede ser apropiadamente representada en términos probabilísticos. En principio, todas las variables empíricas son inciertas, nunca hay absoluta certeza acerca de la verdad de cualquier proposición empírica o acerca del valor exacto de cualquier cantidad empírica. No importa cuán grande sea la precisión, ningún experimento puede medir una cantidad real con error cero. Sin embargo, es común que la incertidumbre, para propósitos prácticos, sea despreciable en muchas de las variables empíricas y así puedan ser tratadas en forma determinística en el modelo.

Variables definidas. Las constantes físicas fundamentales como la constante gravitacional, la carga de electrón, etc., actualmente son constantes empíricas, por ser medidas y de hecho inherentemente inciertas. Sin embargo, algunas variables son ciertas por definición y son las llamadas "variables definidas", por ejemplo el número de días del mes de enero, o las constantes matemáticas como "pi". Su única importancia dentro de este contexto es su diferenciación de las variables empíricas.

Variables de decisión. Son variables sobre las cuales el tomador de decisiones ejerce control. Si es una variable de decisión, entonces por definición no tiene valor verdadero. Está en manos del tomador de decisiones seleccionar su valor. El proceso de desarrollo y evaluación de un modelo puede ser enfocado mejor si estas decisiones son hechas explícitas.

Fuentes de Incertidumbre en Variables Empíricas

Ha habido muchos intentos para realizar mediciones de diferentes tipos de incertidumbre. La mayoría de éstos se han concentrado en la incertidumbre de las variables empíricas, las cuales constituyen, generalmente, la mayor parte de las variables de los modelos [Morgan y Henrion 1990]. Las incertidumbres en dichas variables pueden provenir de distintos tipos de fuentes, por lo que el método apropiado para caracterizarla y tratar de reducirla, generalmente depende del tipo particular

de fuente. De esta forma, según los diferentes tipos de fuentes de las que proviene, la incertidumbre en las variables empíricas se puede clasificar de la siguiente forma:

- 1) Variación Estadística. Las imprecisiones en los instrumentos de medición y la técnica de observación, inevitablemente llevarán a variaciones de una observación a otra. La incertidumbre resultante depende del tamaño de las variaciones entre las observaciones y el número de observaciones tomadas. La estadística provee una serie de técnicas conocidas para cuantificar esta incertidumbre, como la desviación estándar, intervalos de confianza, y otras.
- 2) Juicio Subjetivo. Hay una tendencia consistente a desestimar el error sistemático. Esta tendencia ha sido encontrada en forma universal en casi todas las mediciones de cantidades físicas que han sido hechas. Quizás esto no debería sorprender, dada la dificultad en hacer estimaciones subjetivas acerca de los errores que son esencialmente desconocidos en el tiempo. Cuando cuantificamos incertidumbres, es más fácil subestimar la existencia o efecto de las fuentes de error poco conocidas, que sobrestimarlas.
- 3) Variabilidad. Muchas variables dentro de una modelación no son constantes en el tiempo y el espacio. En general ellas no corresponden a variables particulares, sino que a poblaciones de variables. Sin embargo, estas poblaciones pueden ser razonablemente bien especificadas y podrían ser bien descritas por distribuciones de frecuencias. Las distribuciones de frecuencia a veces son llamadas distribuciones de probabilidad y tienen sus mismas propiedades formales. La incertidumbre para una distribución de frecuencia puede ser representada por la distribución de probabilidad y sus principales parámetros, como su media, desviación estándar, mediana, u otros percentiles. En estas condiciones, no es difícil manejar la incertidumbre de las distribuciones de frecuencia representadas probabilísticamente, pero tratar la incertidumbre sobre las distribuciones de probabilidad que podrían representar las variables es más problemático y complica el análisis ya que se requiere una estimación estadística más compleja y rigurosa.
- 4) Aleatoriedad Inherente. La aleatoriedad inherente es distinguida de otros tipos de incertidumbre, por ser en principio irreductible. Se dice que una cantidad es aleatoria si no se conoce un diseño o modelo que incorpore sus variaciones. En esta visión, la aleatoriedad, como la probabilidad, son funciones del conocimiento disponible del evaluador. Una cantidad puede legítimamente ser aleatoria para una persona, pero determinística para otra que conoce su proceso de generación. De esta forma, los números pueden ser completamente determinados si se conoce el algoritmo. Si no, ellos pueden ser tan aleatorios como nos parezcan.
- 5) Desacuerdo. Si los datos son difíciles de obtener es complicado decidir rápidamente cuáles son los valores relevantes del proceso. A pesar de esto, las decisiones de políticas a veces deben ser tomadas antes que los desacuerdos se resuelvan. Así, en la práctica, tales desacuerdos entre expertos científicos son a menudo una fuente importante de incertidumbre en el análisis de políticas.
- 6) Aproximación. La incertidumbre de la aproximación aparece porque el modelo que se utiliza es solo una versión simplificada del sistema del mundo real que está siendo modelado. Las aproximaciones son también introducidas por el uso de distribuciones de probabilidad discreta para representar distribuciones continuas, o el número finito de iteraciones usadas en la simulación de Monte Carlo u otros procesos de muestreo aleatorio. Cada aproximación representa un compromiso entre la precisión de la representación y el costo computacional del modelo.

Incertidumbre acerca de la forma de los modelos

Hasta ahora se ha considerado la incertidumbre sobre las variables o parámetros de un modelo, pero no sobre la forma o estructura del modelo mismo. La incertidumbre acerca de la forma de los modelos es generalmente más difícil de pensar que la incertidumbre del valor de una cantidad pero los analistas experimentados a menudo argumentan que la incertidumbre acerca de la estructura es más importante y tiene un efecto sustancialmente mayor sobre los resultados de los análisis. Sin embargo, han sido relativamente pocas las investigaciones de situaciones en las cuales hay incertidumbre o desacuerdo sobre qué forma del modelo usar [Morgan y Henrion 1990].

En todo caso, todos los modelos son definitivamente falsos. Tal vez es posible decir que un modelo es mejor que otro, en el sentido que produce predicciones más seguras, no que es más probable; sin embargo, es inapropiado tratar de asignar probabilidades a los modelos.

La incertidumbre sobre la forma del modelo, frecuentemente refleja desacuerdos entre los expertos sobre el fundamento científico o el mecanismo técnico. Cuando lleva a diferencias significativas, como ocurre a menudo, puede ser más apropiado examinarlo paramétricamente, más que intentar una distribución de probabilidad sobre las formas alternativas o el peso de las opiniones de distintos expertos, como se ha argumentado con respecto a los desacuerdos sobre variables empíricas [Morgan y Henrion 1990].

La incorporación de incertidumbre y su impacto en la toma de decisiones

La incertidumbre puede definirse como la falta de conocimiento preciso o desconocimiento de las causas que determinan el comportamiento de un sistema real. También, como la falta de conocimiento del valor verdadero de una cantidad desconocida (Morgan y Henrion, 1990). Esto implica que no se puede describir con certeza el comportamiento del sistema y debe realizarse entonces un análisis de riesgo, tomando decisiones en un contexto de incertidumbre.

En este contexto, surge la pregunta de por qué interesa la incertidumbre a un evaluador de riesgo. Aún cuando existan datos, se requerirán supuestos o inferencias porque pueden no estar disponibles para todos los aspectos del análisis. Más aún, los datos disponibles pueden ser de calidad dudosa o poco confiable. Adicionalmente, Morgan y Henrion (1990) señalaron otras razones:

- En el Análisis de Riesgo debe combinarse información de distintas fuentes y distinta calidad.
- Debe decidirse acerca de dedicar recursos – y cómo hacerlo- para adquirir información adicional.
- Puede haber estimaciones sesgadas o poco precisas.
- Pueden identificarse factores de importancia y/o posibles fuentes de desacuerdo en la toma de decisiones.

En resumen, basado en el caso del análisis de riesgo, la incorporación de incertidumbre en la toma de decisiones enriquece enormemente el análisis, entregando a los interesados información y análisis mejorados respecto de las evaluaciones o modelaciones desarrolladas determinísticamente y lineamientos acerca de dónde invertir mejor los recursos para mejorar la calidad de la información.

A.2. LA MODELACIÓN DE PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE

En la realidad nos encontramos con sistemas muy complejos. Los sistemas reales suelen ser de naturaleza estocástica y difícil de conocer y/o controlar mediante herramientas analíticas tradicionales. Los métodos analíticos en general requieren de numerosas simplificaciones que permiten capturar sólo algunos de los elementos de un sistema. La simulación permite manejar sistemas complejos de manera más realista. En esta sección seguimos a Helton y Davis²⁶.

El análisis de incertidumbre puede entenderse como el estudio de funciones del tipo:

$$y = f(x)$$

Donde la función f representa al modelo bajo estudio, el vector $x = (x_1, \dots, x_n)$ de variables de entrada ("inputs"), y el vector de predicciones $y = (y_1, \dots, y_m)$. El propósito del análisis de incertidumbre es determinar la incertidumbre en los elementos de y que resultan de la incertidumbre en los elementos x . El análisis de sensibilidad resulta ser un acercamiento metodológico más simple en que se examina como cambios en algunas de las componentes del vector x impactan los elementos del vector y .

Para llevar a cabo el análisis de incertidumbre es necesario caracterizar la incertidumbre de los elementos de x . En general, la incertidumbre de estas variables se caracteriza mediante distintas funciones de distribución (o densidad):

$$D_1, D_2, \dots, D_n$$

Donde D_k denota la distribución asociada al elemento k -ésimo del vector x . De esta forma, lo que se conoce es la distribución conjunta de x_1, \dots, x_n y lo que interesa es conocer la distribución del estadístico $y = f(x)$. En lo que sigue y por simplicidad se asumirá que $m=1$.

La determinación del estadístico de y se hace mediante la estimación de la función de distribución, la distribución complementaria o la función densidad de probabilidad.

La distribución complementaria se define como:

$$P(y > Y) = \int \delta_Y [f(x)] d(x) dV$$

Donde d representa la función densidad de probabilidad correspondiente a las distribuciones D_1, D_2, \dots, D_n y dV representa el diferencial (que se denota de esta forma por tratarse en general de un volumen multidimensional, de dimensión n), y

²⁶ J.C. Helton, F.J. Davis "Latin hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems". Reliability Engineering and System Safety 81 (2003) 23–69.

$$\delta_Y[f(x)] = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x) > Y \\ 0 & \text{si } f(x) \leq Y \end{cases}$$

Análogamente, la función de distribución se define como:

$$P(y \leq Y) = 1 - P(y > Y) = 1 - \int \delta_Y[f(x)]d(x)dV$$

Luego, en términos formales, la simulación busca una aproximación para el valor de esta última integral.

Una manera formal de interpretar el análisis de sensibilidad es a través del análisis de la varianza. La varianza viene dada por:

$$V(y) = \int [E(y) - f(x)]^2 d(x)dV$$

Donde $E(y)$ denota al valor esperado de y , $E(y) = \int f(x) d(x)dV$.

Así el análisis de sensibilidad puede interpretarse como la descomposición de la varianza $V(y)$ en los componentes de los elementos individuales del vector x . El tamaño de cada componente entregará una medida de la importancia de cada variable.

La simulación de Montecarlo es una de las alternativas más usuales para llevar a la práctica la estimación de la propagación de incertidumbre de un sistema²⁷. El análisis de Montecarlo es un procedimiento de muestreo probabilístico utilizado para determinar la relación entre las variables de entrada y los resultados de salida. Esta relación permite aproximar la integral $P(y > Y) = \int \delta_Y[f(x)]d(x)dV$ (análisis de incertidumbre) y también evaluar efectos individuales que alguna de las componentes del vector x tenga sobre la variable de salida y (análisis de sensibilidad).

En una simulación, se genera una muestra de tamaño S consistente con las distribuciones de entrada D_1, D_2, \dots, D_n y la distribución conjunta. La muestra queda representada por:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}], i = 1, \dots, S$$

Para realizar el muestreo existen distintas alternativas y las principales serán presentadas en la próxima sección. Sea cual sea la forma de elaborar el muestreo, el procedimiento considera pesos $w_i, i = 1, \dots, S$ tales que el elemento x_i puede utilizarse conjuntamente con w_i para obtener las aproximaciones que se desean²⁸.

Una vez conocida la muestra, la evaluación de la función permite establecer una relación entre las variables de entrada y de salida:

²⁷ Otras alternativas incluyen análisis diferencial (basado en derivadas parciales) y análisis de Fourier entre otras.

²⁸ En el caso más simple de muestreo aleatorio, el peso es simplemente $1/S$.

$[x_i, y_i], i = 1, \dots, S.$

Donde $y_i = f(x_i).$

De esta forma, la integral clave puede aproximarse como sigue en virtud de la Ley de Los Grandes Números (Débil)²⁹:

$$P(y > Y) = \int \delta_Y [f(x)] d(x) dV \cong \hat{P}(y > Y) = \sum_{i=1}^S \delta_Y (y_i) w_i$$

Esta expresión entrega la representación más completa de la incertidumbre en y derivada de las distribuciones de las variables de entrada x.

Análogamente, las expresiones de los estimadores de la esperanza y varianza vienen dados por:

$$E(y) \cong \hat{E}(y) = \sum_{i=1}^S y_i w_i$$

$$V(y) \cong \hat{V}(y) = \sum_{i=1}^S [\hat{E}(y) - y_i]^2 \cdot w_i$$

Existen alternativas más formales para realizar análisis de sensibilidad respecto del impacto de los elementos de x en y a través de la expresión $[x_i, y_i], i = 1, \dots, S.$ Una posibilidad es utilizar métodos de regresión que relacione y con los $x_k.$ Estas relaciones son de la forma:

$$y = b_0 + \sum_{k=1}^n b_k x_k$$

²⁹ En términos muy simples, la Ley de los Grandes Números señala que en la medida que aumenta S la probabilidad estimada experimentalmente se acerca cada vez más a la probabilidad teórica. Es decir, mientras mayor sea la muestra mejor queda se caracteriza la población.

A.3. TÉCNICAS DE MUESTREO

En la realización de ejercicios de simulación existen distintas técnicas de muestreo disponibles. Las alternativas más comunes corresponden a las de principales Muestreo aleatorio simple (a veces también llamado muestreo de Montecarlo) y muestreo de “Latin Hypercube”.

El muestreo aleatorio simple es el método más usual, intuitivo y apegado a las reglas de la estadística (Leyes de los grandes números). Se generan números aleatorios del vector de variables de entrada x . En general, el muestreo aleatorio simple es la técnica convencional que usa números pseudo-aleatorios para muestrear valores desde una distribución de probabilidad. Debido a esto, las muestras tendrán una posibilidad mayor de provenir desde los valores que tienen las probabilidades más altas. Es más, si las colas de las distribuciones son importantes, se produce una limitación en la concentración de valores muestreados cerca del centro de la distribución. Esto hace que cuando S es pequeño, haya pocos valores en las colas y alta concentración en aquellos rangos con mayor probabilidad.

Un enfoque alternativo es muestreo Latin Hypercube LH³⁰, que es una técnica avanzada de muestreo aleatorio dentro de los intervalos de la distribución de frecuencias acumuladas, que permite minimizar el número de muestras para representar la distribución completa. Latin Hypercube no tiene concentración de las muestras cerca del centro y es muy útil cuando las colas de la distribución son importantes [Gratt, 1996]. Este método suele recomendarse por los desarrolladores de software y agencias internacionales por aumentar significativamente la eficiencia computacional.³¹

El muestreo LH usa un enfoque de muestreo estratificado que permite mejorar la cobertura que se da al espacio muestral. Considerando el gráfico de una función de distribución $D_j(x_j)$, la estratificación se consigue dividiendo el eje vertical en S intervalos del mismo largo (equiprobables) y donde S también corresponde al número de corridas de la simulación. A través de la función inversa de la distribución D_j^{-1} , estos intervalos dividen el eje horizontal en S intervalos no superpuestos, equiprobables y no necesariamente del mismo largo.

El paso siguiente considera la selección de un valor en cada uno de los S intervalos del eje vertical. Cuando estos valores se siguen a través de la inversa D_j^{-1} , se obtiene un único valor de x en cada uno de los S intervalos del eje horizontal. Si X es una matriz de $S \times n$ (donde S era el número de corridas y n la dimensión del vector x) la columna j -ésima contiene la muestra LH para la variable aleatoria X_j . Finalmente, los valores de cada columna de la matriz se ordenan en un proceso aleatorio. Este proceso de mezcla de los valores permite emular el resultado de un muestreo aleatorio simple.

Una forma en que se comparan las alternativas de muestreo es a través de estimaciones de varianza. Para los distintos tipos de muestreo el estimador del valor esperado es el mismo:

³⁰ Ver anexo donde se explica con mayor detalle la forma de muestreo Latin Hypercube.

³¹ Por ejemplo, y en distintos contextos el muestreo LH es recomendado por Price Waterhouse Coopers, la EPA, y es una alternativa disponible en la mayoría de los software comerciales que realizan simulación.

$$E(y) \cong \hat{E}(y) = \sum_{i=1}^S y_i w_i = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S f(x_i) = \bar{y}$$

Para el muestreo aleatorio simple la varianza:

$$Var(\bar{y}) = \frac{1}{S} Var(y)$$

Mientras que para el muestreo LH la varianza se expresa como para el caso n=2:

$$Var(\bar{y}) = \frac{1}{S} Var(y) + \frac{S-1}{S} cov(x_1, x_2)$$

Luego, la varianza obtenida en muestreo LH es menor sólo cuando el término de covarianza es no positivo. Esto se cumple para funciones f monótonas.

A.4. TEORÍA DE MUESTREO LATIN HYPERCUBE (LATIN HYPERCUBE SAMPLING LHS)

Esta sección se basa en “A User’s Guide to LHS: Sandia’s Latin Hypercube Sampling Software” Gregory D. Wyss and Kelly H. Jorgensen. Febrero 2008. Risk Assessment and Systems Modeling Department Sandia National Laboratories

LHS se desarrolló para realizar evaluación de incertidumbre y análisis de sensibilidad en el contexto siguiente. Considerando una función Y que es función de otras variables X_1, X_2, \dots, X_k interesa conocer cómo varía Y cuando cambian los X 's de acuerdo a una distribución de probabilidad conjunta.

Un enfoque convencional para realizar este tipo de análisis es el de simulaciones de Montecarlo. Al obtener una muestra de la densidad conjunta asumida para los X 's y evaluando cada Y para cada muestra, se puede estimar la distribución de Y junto con otras características como media y varianza. La salida de un programa para n iteraciones de Montecarlo es un conjunto de n vectores de variables (donde cada vector es k -dimensional). Cada vector puede evaluarse por la función para generar n valores de Y . Este enfoque resulta en estimaciones razonables de la distribución de Y si n es lo suficientemente grande. Luego, este tipo de implementación requiere costos computacionales importantes.

Una alternativa más económica y que permite obtener estimaciones más precisas es un esquema Montecarlo restringido. El método LHS desarrollado por McKay, Conover, y Beckman (1979) es uno de estos esquemas y sirve para generar muestras de los X 's. LHS realiza el muestreo seleccionando n valores diferentes para cada una de las variables X_1, X_2, \dots, X_k de la manera siguiente. El rango de cada variable se divide en n intervalos no superpuestos de igual probabilidad. Un valor dentro de cada intervalo es seleccionado al azar de acuerdo a densidad de probabilidad del intervalo. Los n valores así obtenidos para X_1 son pareados aleatoriamente con los n valores de X_2 . Estos n pares son combinados aleatoriamente con los n valores de X_3 para formar n tripletas. Repitiendo este procedimiento se llegan a formar n k -tuplas. Esta es la muestra LHS. Resulta conveniente considerar esta muestra como una matriz ($n \times k$) donde la fila i contiene valores específicos de las k variables para ser utilizadas en la corrida i -ésima de la simulación.

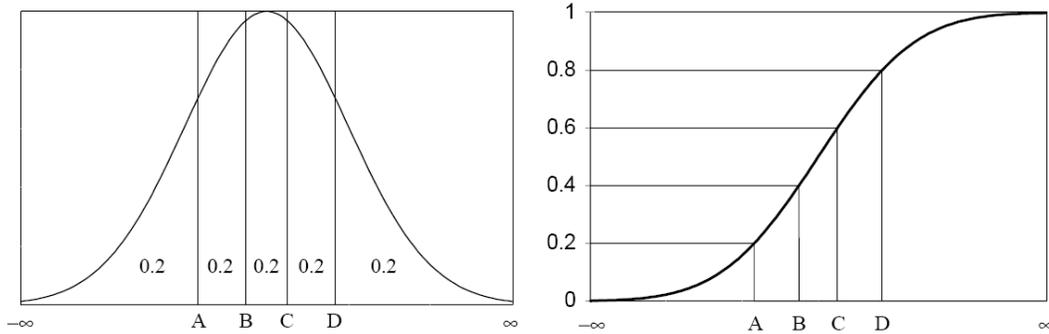
Para entender mejor el funcionamiento de este método a continuación se describe un ejemplo sencillo para una muestra de tamaño $n=5$ con dos variables de entrada. Se asume que la primera variable X_1 es normal con media μ y varianza σ^2 . Los puntos que determinan la partición se determinan fácilmente basándose en los parámetros μ y σ^2 .

La figura siguiente muestra los intervalos tanto para la densidad de probabilidad como para la función distribución. Los intervalos satisfacen:

$$P(-\infty \leq X_1 \leq A) = P(A \leq X_1 \leq B) = P(B \leq X_1 \leq C) = P(C \leq X_1 \leq D) = P(D \leq X_1 \leq \infty) = 0.2$$

Luego cada uno de los cinco intervalos corresponde a una probabilidad de 20%.

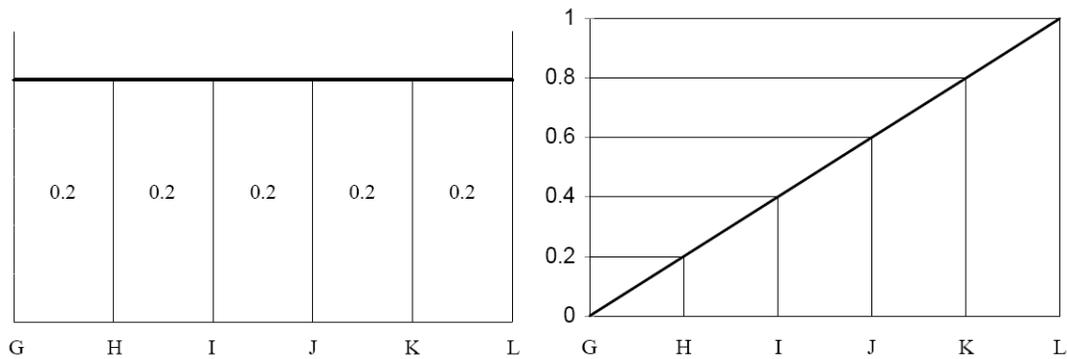
Figura 35 Intervalos usados en LHS de Tamaño n=5 para Variable Normal



Fuente: Wyss y Jorgensen (2008)

Para la segunda variable X_2 se asume que ésta tiene una distribución uniforme en el intervalo comprendido entre G y L. La figura siguiente muestra los intervalos para la densidad de probabilidad y la función distribución

Figura 36 Intervalos usados en LHS de Tamaño n=5 para Variable Uniforme



Fuente: Wyss y Jorgensen (2008)

El paso siguiente requiere obtener valores específicos de X_1 y X_2 en cada uno de los cinco intervalos respectivos. Esta selección debe realizarse aleatoriamente con respecto a la densidad de cada intervalo. Es decir, la selección debe reflejar la altura de la densidad a través del intervalo. Por ejemplo, en el intervalo $(-\infty, A)$ para X_1 , valores cercanos a A tendrán mayor probabilidad de selección que aquellos valores en la cola de la distribución que se extiende a $-\infty$.

A continuación, los valores seleccionados de X_1 y X_2 son pareados aleatoriamente para formar los cinco vectores de dos dimensiones requeridos. En el concepto original de LHS, el pareo se realiza mediante la asociación de una permutación aleatoria de los primeros n enteros de cada variable de entrada. Para ilustrar este procedimiento, considérense dos permutaciones de los enteros (1,2,3,4,5) de la manera siguiente:

-Conjunto de Permutación 1: (3,1,5,2,4)

-Conjunto de Permutación 2: (2,4,1,3,5)

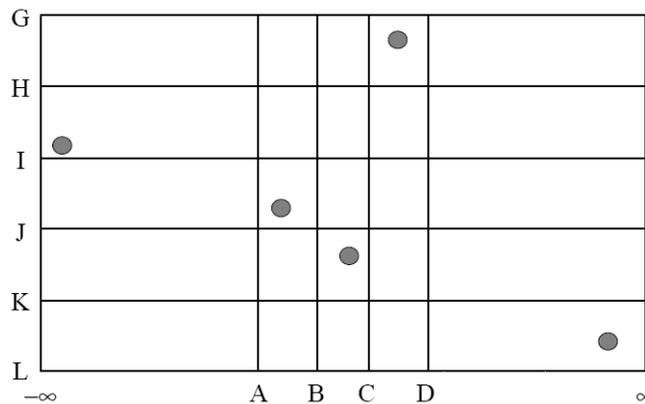
Usando la posición respectiva dentro de cada uno de los conjuntos de permutación como los números del intervalo para X_1 (Conjunto 1) y X_2 (Conjunto 2), se puede formar el siguiente conjunto de pares de intervalos:

Número de Iteración	Intervalo Utilizado para X_1	Intervalo Utilizado para X_2
1	3	2
2	1	4
3	5	1
4	2	3
5	4	5

Por lo tanto, y a modo de ejemplo, en la primera iteración, el vector de entrada se forma seleccionando el valor específico de X_1 del tercer intervalo (de B a C) y pareado con el valor específico seleccionado de X_2 seleccionado del segundo intervalo 2 (de H a I).

Una vez que los valores de cada variable para formar los cinco vectores de entrada, puede realizarse una representación bidimensional de la muestra de LHS como en la figura siguiente. En general, un conjunto de n puntos de muestra en un espacio euclídeo k -dimensional contiene un punto en cada uno de los intervalos para las k variables.

Figura 37 Representación Bidimensional de Posible Muestra de tamaño 5 Utilizando X_1 y X_2



Fuente: Wyss y Jorgensen (2008)

Supongamos que se desea una muestra LHS de tamaño $n=5$ de una normal con $\mu=5$ y $\sigma^2=2.618$. Tras definir los intervalos de igual probabilidad a partir de esta información, se necesita seleccionar aleatoriamente dentro de cada intervalo una observación pero según la distribución del intervalo. Esto se realizando un muestreo uniforme de los cuantiles de la distribución y luego invirtiendo la distribución para obtener los valores de distribución que restos quintiles representan.

Para obtener valores específicos, $n=5$ números se seleccionan aleatoriamente de la distribución uniforme estándar ($U(0,1)$). Sean estos valores denotados por U_m , donde $m=1,2,3,4,5$. Estos valores son utilizados para seleccionar valores aleatoriamente dentro de cada uno de los $n=5$ intervalos. Para lograr esto, cada uno de los valores aleatorios U_m es escalado para obtener la probabilidad acumulativa correspondiente, P_m , para que cada P_m caiga en el intervalo i -ésimo. Luego para este intervalo con $n=5$,

$$P_m = \frac{1}{5}U_m + \frac{m-1}{5}$$

A.5. ELECCIÓN DE DISTRIBUCIONES DE VARIABLES DE ENTRADA

En el desarrollo de análisis de incertidumbre es fundamental caracterizar la incertidumbre asociada a las variables de entrada. Las funciones de distribución de probabilidad a menudo surgen desde las propiedades fundamentales de las cantidades que se intenta representar. Por ejemplo, las cantidades formadas a partir de la suma de cantidades inciertas tienden a ser normalmente distribuidas; las cantidades generadas a partir de la multiplicación de cantidades inciertas tienden a ser lognormales; y los eventos que ocurren aleatoriamente en el tiempo conducen a distribuciones poisson y exponenciales. Sin embargo a menudo, las distribuciones son seleccionadas sobre una base empírica, las que proveen una razonable representación de los datos observados. En otros casos, la definición de la incertidumbre de las variables de entrada se ha apoyado en la información proporcionada por expertos, por ser en general más rápida de obtener y a un menor costo.

A menudo existen diferencias de opinión sobre algunas cantidades empíricas inciertas proporcionada por distintos expertos informados, es este caso es común utilizar el enfoque de combinar las opiniones usando pesos relativos. Se puede utilizar una gran variedad de métodos para asignar estos pesos relativos. Ellos pueden ser derivados de ratings hechos por los propios expertos sobre sus opiniones o sobre las del resto de los expertos, o bien pueden ser derivados de la incertidumbre expresada en las mismas distribuciones. También pueden ser asignados directamente por el analista sobre la base de la información acerca del conocimiento relativo, confiabilidad y calibración de los expertos.

Un tomador de decisiones o analista puede considerar la opinión de cada experto como dato, suplementado por cualquier evidencia o juicio acerca de la calidad de los juicios dados por los expertos. Estos datos y evidencias pueden ser usados por el analista para actualizar su propia opinión y llegar a una distribución de probabilidad simple, operando directamente ya sea sobre los pesos relativos, o sobre los resultados después de aplicarlos en un modelo. Así, la distribución final representa el mejor juicio de los analistas basados en los expertos.

Una gran variedad de sofisticadas evaluaciones bayesiana y combinaciones de técnicas han sido usadas para llevar a cabo el análisis de la información proporcionada por expertos. En la práctica, el enfoque bayesiano tiende a ser más difícil de aplicar, ya que requiere juicios completos de la dependencia entre los expertos. [Morgan Y Henrion, 1990].

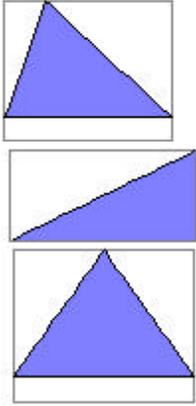
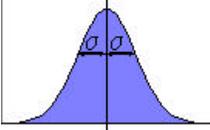
En la práctica, la opinión de experto es muy útil dada la gran simplicidad. Así, se realizan algunas consideraciones en la asignación de distribuciones de probabilidad sobre aquellas variables que se tiene poca información. Por ejemplo, si no se tiene una serie de datos históricos o que permitan ajustar alguna distribución de probabilidad con un cierto nivel de confianza, se pueden utilizar simplificaciones como las siguientes [Salinas 1994]:

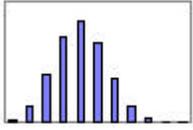
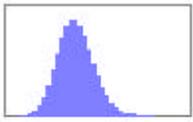
- Si nada se sabe acerca de la varianza o factor de estudio, excepto su rango, puede usarse una distribución de probabilidad uniforme.
- Si se conoce solo el rango y la moda de la variable o factor de estudio, se usa una distribución de probabilidad triangular.

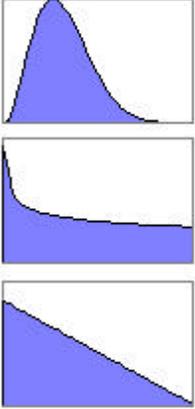
- Si los valores de una variable o una fuente de datos de consenso, parecieran tener un rango no restringido de valores posibles y son simétricamente distribuidos alrededor de la moda, se usa una distribución de probabilidad normal.
- Si la variable o factor en estudio asume solo valores positivos y los datos sugieren que la distribución de probabilidades podría estar sesgada hacia el extremo menor del rango, se usa una distribución de probabilidad lognormal.
- También se realizan algunas consideraciones con respecto a los valores extremos en las distribuciones de probabilidad de las variables, los que comúnmente pueden generar valores irreales en la evaluación, por lo que se truncan los valores de entrada o variables de entrada del modelo. Por ejemplo, si se quiere minimizar el problema en funciones asintóticas.

El cuadro siguiente muestra funciones de distribución usuales y condiciones en que se recomienda su uso.

Cuadro 27 Resumen de Funciones de Distribución y su Uso en Análisis de Incertidumbre

Nombre (Parámetros)	Ejemplos de distribución	Uso	Usos adecuados	Ejemplos
Triangular (Mínimo, más probable, Máximo)		<p>Es la distribución más comúnmente usada. No tiene justificación teórica. Es una distribución simple y fácil de usar.</p> <p>Notar que sobreestima el tamaño de las colas en los valores cercanos a la media.</p>	<p>Donde la distribución no es conocida, y se piensa que no se adecua para una distribución normal ya sea porque está limitada (colas finitas) o no es simétrica.</p> <p>Situaciones en las que una comprensión sencilla e intuitiva es de suma importancia y la flexibilidad es una gran ventaja.</p>	<p>Los costos operativos de mantenimiento de un proyecto se han estimado como un mínimo de M\$40, un valor más probable de M\$60 máximo de M\$100. El costo real podría ser modelado como una distribución triangular. Tener en cuenta que la media o valor esperado de una distribución triangular no es el valor más probable, pero está dado por:</p> $Media = \frac{Mínimo + Mas Probable + Máximo}{3}$
Normal/ Gaussiana (Media, desviación estándar)		<p>Es una distribución frecuentemente usada. Esto se debe en parte al resultado del teorema central del límite, que establece que la media de un conjunto de variables independientes se aproxima a una distribución normal. Muchas distribuciones tienden a la normalidad en sus límites, como por ejemplo Poisson y Binomial</p>	<p>Distribución de errores.</p> <p>Muchas variables naturales caen en una distribución normal, como la estatura de las personas.</p> <p>Una situación en la que la distribución no se conoce, pero se sabe que es simétrica en torno a un valor medio y que existe más probabilidad de estar cerca del medio que de los extremos.</p>	<p>La inflación de los precios al por menor se ha asumido de un 3% anual. Sin embargo existe la posibilidad de que podría estar por encima o debajo de esta tasa. La media es 3%, y la desviación estándar debe ser estimada considerando que la probabilidad de un valor se encuentra dentro:</p> <p>+/- 1 □□ de la med</p> <p>+/- 2 □□ de la med</p> <p>+/- 3 □□ de la m</p>
Uniforme (Máximo, Mínimo)		<p>Se utilizada si la variable está acotada por un máximo y un mínimo conocidos, y todos los valores en el medio son equiprobables.</p>	<p>Al igual otras distribuciones no paramétricas, esta tiene la ventaja de ser intuitivamente obvia, y resalta el riesgo donde hay poca información sobre la distribución.</p>	<p>La posición de una fuga a lo largo de una tubería, o el precio en cualquier punto dado del tiempo de un mercado de productos básicos de alta sensibilidad como la gasolina.</p>

Nombre (Parámetros)	Ejemplos de distribución	Uso	Usos adecuados	Ejemplos
Binomial (Nº de eventos, probabilidad de cada evento)		En cada ensayo hay sólo dos resultados (ej: si/no , o 1/0). Los eventos son independientes: lo que ocurre en un evento no afecta los eventos posteriores. La probabilidad es la misma de un evento a otro.	Esto se debe utilizar si se requiere el número de eventos que ocurrirán dado un cierto número de ensayos y una probabilidad conocida de ocurrencia.	Se quiere describir el número total de artículos defectuosos en una muestra de 100 productos manufacturados, dado que la probabilidad de que salga un artículo defectuoso sea un 7%. El número de artículos defectuosos serán impartidos por una distribución binomial con $n=100$ y $p=0.07$
Poisson (Tasa de ocurrencia)		La tasa de ocurrencia se mantiene constante. El número de casos no está limitado. Las ocurrencias son independientes.	Esta distribución discreta describe el número de eventos que se producen en una determinada unidad de tiempo, dado que la tasa de ocurrencia es conocida.	Si hay un sistema de medición que permite la reducción de pago cada vez que se produce un error, y se supone que la tasa de incidencia será de 20 veces al año: el número de eventos que se produzcan en un determinado trimestre se describe mediante una distribución de Poisson con una tasa de $20/4=5$ veces/trimestre
Exponencial (Tasa de ocurrencia)		Describe la cantidad de tiempo entre los sucesos. La tasa de ocurrencia es independiente de los sucesos anteriores.	Sólo se utiliza para describir el tiempo entre (o hasta que suceda) eventos.	Si las pruebas destructivas muestran que una bombilla tiene una duración en promedio de 5200 horas, el tiempo que una bombilla de luz tendrá de luz será descrita por una distribución exponencial si suponemos que la tasa de fallo es constante (es decir, las posibilidades de que fallen son las mismas a lo largo de su vida útil)
Log normal (Media, desviación estándar)		Esta distribución se utiliza frecuentemente. El teorema central del límite establece que si una cantidad es el producto de dos o más variables elegidas de forma independiente, la distribución tenderá hacia una log normal.	Variables de ocurrencia natural que en sí mismas son el producto de un número de variables naturales ocurriendo. Cualquier variable que se extiende desde cero hasta +infinito y es positivamente sesgada. Útiles para la representación de	El volumen de gas en un depósito de gas sigue a menudo una distribución log normal, siendo un producto de su relación de volumen, presión, el ratio gas/líquido, etc.

Nombre (Parámetros)	Ejemplos de distribución	Uso	Usos adecuados	Ejemplos
			cantidades que varían en varios órdenes de magnitud.	
<p data-bbox="205 380 260 406">Beta</p>  <p data-bbox="111 613 338 727">(Nº de eventos, n, Nº de eventos positivos, r)</p> <p data-bbox="111 833 212 859">1 = r + 1</p> <p data-bbox="111 868 249 894">2 = n - r + 1</p>		<p data-bbox="594 380 957 548">Se utiliza para determinar la probabilidad de un evento dado un número de ensayos (n) hecho con una serie de éxitos registrados (r).</p> <p data-bbox="594 558 957 727">Esta distribución se utiliza principalmente para extrapolar los datos obtenidos de una muestra a toda la población.</p>	<p data-bbox="970 380 1392 656">Si se tiene solamente un conjunto limitado de datos y debe generar una distribución de probabilidad de ellos. Notar que esto da una distribución de probabilidad de un evento o de series de eventos, en lugar de la cantidad de eventos que se produzcan.</p>	<p data-bbox="1404 380 1986 584">Si en 100 (n) disparos de un arma de fuego, se fallan 16 (r), ¿cuál es la probabilidad de fallar? Use Beta(17,85). Esto también funciona para la estimación de los casos en que no se han producido fallas (ie, r=0), siempre que haya alguna posibilidad de fracaso.</p>

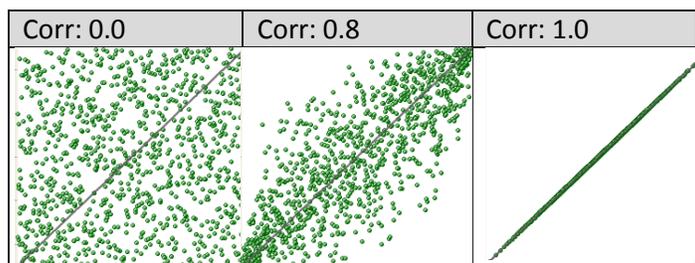
Fuente: Price Waterhouse Coopers (1999) y [Morgan y Henrion

A.6. LA CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Un error común en los análisis de propagación de incertidumbre es ignorar la correlación entre variables de entrada. Si dos variables están correlacionadas entonces el estado de una nos da información de la posible ocurrencia de otra. El no considerar la autocorrelación puede llevar a una subestimación del nivel general de incertidumbre, y también puede dar lugar a situaciones que no podrían ocurrir en la práctica. Por ejemplo, al considerar como variables independientes la tasa de interés base y la tasa de interés de un crédito hipotecario se podría producir un escenario sin sentido, donde la tasa base sea más alta que la tasa de interés hipotecaria.

La correlación es uno de los aspectos más difíciles de la cuantificación del riesgo y existen muchas definiciones para ella. Las definiciones más comunes de correlación son las de Pearson y de rango de Spearman. El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida del grado de linealidad entre dos variables, o la cantidad de dispersión si una variable se representó frente a otro. En otras palabras, un coeficiente de correlación de r igual a 1 significa no sólo que las dos variables se mueven juntas, sino que se mueven juntas de forma lineal. Se cuantifica a través del coeficiente de correlación r , que puede variar continuamente entre -1 y $+1$, dependiendo del nivel de correlación. Si r es 1 significa que las variables están correlacionadas positivamente de forma perfecta, es decir que se mueven juntas. Si r es -1 significa que las variables están correlacionadas negativamente de forma perfecta, es decir que se mueven siempre en direcciones opuestas. Si r es 0 significa que las variables son completamente independientes. La figura siguiente muestra gráficamente el concepto de correlación lineal.

Figura 38: Ejemplos de correlación por rango entre variables.



Fuente: Elaboración propia.

La desventaja del coeficiente de correlación de Pearson es que si la relación no es lineal, no funciona. Este problema es abordado mediante el uso de correlación por rangos de Spearman. En la correlación por rangos ambas variables se clasifican (Ordenan), y es el coeficiente de correlación de Pearson de las dos clasificaciones el que se compara. La correlación por rangos de orden es utilizada por la mayoría de los software add-in de simulación de Monte Carlo (por ejemplo, Crystall Ball y @Risk).

Hay una distinción importante entre la correlación y dependencia. Un ejemplo de dependencia es cuando un evento sólo puede ocurrir si otro sucede. Esto no debería ser modelado como un 100% de correlación positiva, ya que esto produce el supuesto adicional de que si el primero ocurre, el

segundo definitivamente va a ocurrir. En particular la dependencia debe ser modelada como una decisión del tipo "IF - THEN" a través de fórmulas o escenarios [PWC 1999].

A.7. CURVAS DE COSTO DE ABATIMIENTO DERIVADAS DE MODELOS

El **enfoque basado en modelos** busca calcular el costo y el potencial de mitigación de las emisiones a través de modelación. Una serie de modelos de energía han sido utilizados de esta manera con una serie de técnicas. La forma más común es distinguir entre modelos económicos top-down, y modelos orientados en ingeniería del tipo bottom-up. En ambos casos, las curvas de reducción se generan resumiendo el precio del CO2 resultante en “corridas” con diferentes límites estrictos de emisión, o con las emisiones resultantes para distintos precios de CO2. Este enfoque de emisiones absolutas significa que la presentación de una curva de mitigación basada en modelos generalmente no contiene ningún detalle tecnológico.

Los modelos de sistemas de energía bottom-up son en la mayoría de los casos modelos de equilibrio parcial representando sólo el sector de energía en contraste con los modelos de top-down, que cubren las respuestas económicas endógenas de la economía en su conjunto y típicamente son modelos de equilibrio general. Los modelos bottom-up son modelos de simulación u optimización que calculan un equilibrio parcial ya sea a través de la minimización de los costos del sistema o mediante la maximización de los excedentes del consumidores y el productor. En comparación a los modelos top-down, los modelos bottom-up contienen más detalles de las tecnologías a lo largo de la transición de energía primaria a energía útil. Los modelos top-down se basan en las elasticidades de sustitución, en su mayoría estimadas en base a tasas históricas y asumiendo que son válidas a futuro [Kesicki F. 2010 (b)].

Dado que ambos tipos de modelos de energía asumen agentes racionales con comportamiento costo-eficiente, no es posible representar distorsiones de mercado costo-independientes. El resultado es que estos modelos no muestran costos negativos de abatimiento. Además el enfoque basado en modelos no permite representar detalles sobre la tecnología como las posibilidades de sustitución, sus diferentes costos, y sus características técnicas.

A.8. COMENTARIOS ACERCA DEL ANÁLISIS COSTO BENEFICIO.

La correcta realización de un análisis costo beneficio tiene como premisa definir el propósito de la evaluación y definición del alcance del sistema. Por ejemplo, los costos y beneficios pueden considerarse desde la perspectiva de sus posibles inversionistas, o desde la perspectiva de una economía nacional de estado. ¿Qué sucede con los impactos sobre otros miembros de la sociedad, u otros países? Es aquí donde se deben considerar las diferencias entre un análisis costo-beneficio social, y un análisis costo-efectivo financiero y económico.

Al análisis de los costos y beneficios incrementales esperados de un proyecto se le denomina análisis financiero de costo-beneficio, cuando sólo se considera la perspectiva de los inversionistas del proyecto. Este tipo de análisis considera los precios esperados de mercado (o, precios financieros) como punto de partida, independientemente si estos precios incluyen subsidios indirectos o impuestos. La razón es que el general los retornos (financieros) de un proyecto para los inversionistas, depende de la evolución de los precios de mercado de los recursos (insumos) que se utilizan. La rentabilidad media ponderada de las inversiones que los potenciales financiadores esperan, como mínimo, antes de acceder a la financiación del proyecto, determina la tasa de descuento financiera con la cual los costos y beneficios incrementales se convierten a valores actuales [Jansen J.C. 2006].

Al análisis de los costos y beneficios incrementales esperados de un proyecto se le denomina análisis económico de costo-beneficio, cuando se considera el impacto para toda la economía nacional. Para medir el impacto de un proyecto sobre la economía nacional, los precios de mercado deben ser ajustados considerando los impactos de la intervención pública. Los subsidios indirectos recibidos del sector público deben ser agregados a los precios de mercado, y los impuestos indirectos eliminados. De esta forma se obtienen los precios de eficiencia o precios de economía, que reflejan el costo para la economía nacional de la utilización de los recursos. En principio, el análisis económico debe corregir las externalidades, positivas o negativas sobre el bienestar de individuos que no sean los inversionistas del proyecto.

En la práctica, los efectos externos positivos o negativos no son fácilmente cuantificables, por lo que no son típicamente incluidos en el análisis económico de costo-beneficio. La tasa de descuento económica, es decir, la tasa de descuento aplicada en el desarrollo de un análisis económico de costo-beneficio de un proyecto, es a menudo considerada como la tasa de interés esperada libre de riesgo (la tasa efectiva de interés de los bonos de gobierno de largo plazo) más una prima por riesgo que refleja el riesgo previsto en relación con la tasa de crecimiento macroeconómico futuro. A pesar de que el riesgo asociado a los costos y beneficios de un proyecto no esté perfectamente correlacionado con el riesgo del crecimiento macroeconómico, en la práctica se utiliza una tasa "oficial" de descuento aplicada a una amplia variedad de propuestas de inversión pública. Para evitar el desplazamiento del capital privado por capital público, al fijar la tasa de descuento económica, la tendencia debe estar dada por el costo promedio del capital en el sector privado. Por el contrario, en el análisis económico de costo-beneficio convencional, la

preocupación por el patrimonio intergeneracional tiende a jugar un papel menor en la fijación de las tasas de descuento comúnmente aplicadas [Jansen J.C. 2006].

Al análisis de los costos y beneficios incrementales esperados de un proyecto se le denomina análisis social de costo-beneficio, cuando se considera el impacto sobre el más amplio conjunto de la sociedad. De este modo, los límites del sistema de análisis, deben estar claramente definidos.

El análisis social de costo-beneficio de un proyecto se basa en el análisis financiero de costo-beneficio o análisis de costo beneficio privado. En este análisis, sin embargo, se utilizan los precios de mercado, mientras que los impactos que no tienen una relación financiera con el inversionista no son considerados. Por lo tanto, el análisis social requiere de los siguientes ajustes:

- Los precios de mercado deben ser corregidos por las intervenciones gubernamentales: los subsidios indirectos deben incorporados al precio, y los impuestos indirectos eliminados.
- Las externalidades deben ser identificados y su valor social evaluado en la mayor medida posible
- Debe aplicarse una tasa de descuento social. Es decir, una tasa de descuento apropiada para el análisis social costo-beneficio de un proyecto, en lugar de una tasa de descuento financiero que sólo es relevante para los financistas.

Cabe destacar que tanto el análisis financiero como el económico aportan información muy relevante al proceso de toma de decisiones de política pública. Si bien el análisis social permite priorizar distintas medidas de un conjunto de opciones desde la perspectiva social, el análisis financiero puede dar luces respecto de los apoyos que potencialmente podrían requerir inversionistas privados para llevar a cabo tales acciones.

Existe un amplio rango de externalidades que se recomienda incluir al menos cualitativamente en un análisis de costo beneficio social. Entre estas destacan [BID 2010]:

- Impactos macroeconómicos y de ingreso de las medidas. Suele requerirse modelos adicionales que capturen efectos inter-industria y los distintos mecanismos de retroalimentación. Una alternativa usual es el uso de modelos de equilibrio general computable.
- Estimulo sobre el desarrollo de nuevas tecnologías. Políticas de reducción de GHG más restrictivas pueden estimular el desarrollo tecnológico e innovación que reducen la demanda por combustible fósil. De esta forma, puede guiar al mejoramiento de la competitividad de un país. En general, de manera exógena se suele modificar el conocimiento técnico generalmente basado en opinión experta.
- Impactos sobre el empleo. En general, lo deseable es estimar como una medida (o conjunto de ellas) impacta en el empleo directo, indirecto (en la cadena de suministro) y secundario (en el resto de las industrias). Para realizar este tipo de análisis se suele utilizar modelos de insumo-producto y de equilibrio general computable.
- Impactos en Contaminación Local. Las políticas y medidas de reducción de GHG pueden tener beneficios significativos sobre la calidad del aire. Para hacer una valoración social de los co-beneficios de la reducción de la contaminación del aire existen dos aproximaciones principales. La primera alternativa es la evaluación del costo por daño del aire contaminado (por ejemplo en la salud o mediante alguna estimación de disposición a pagar por reducción

de una unidad de contaminante). La segunda opción es utilizar un enfoque de costo de abatimiento evitado por lograr cumplir los estándares locales.

- Impactos en Seguridad de Suministro Energético. Las políticas y medidas de reducción de GHG suelen tener beneficios significativos en términos de mejoras en la seguridad de suministro de energía a largo plazo. En este contexto, se entiende por seguridad en el suministro de energía a “la disponibilidad de energía a toda hora en varias formas, en cantidades suficientes y a precios asequibles”. Estimar monetariamente esta externalidad suele ser difícil. Sin embargo, en muchos países es posible estimar la reducción de los costos de falla esperados de los sistemas eléctricos mediante modelos eléctricos complejos.
- Costos de Programas Públicos. Estos costos incluyen todos aquellos flujos estatales destinados a la implementación y monitoreo de los programas de cambio climático.
- Otros beneficios y costos que son más difíciles de cuantificar: Reducción de la congestión urbana, mejora en suministro de agua, disminución de la erosión de suelos, etc.

A.9. SELECCIÓN DE LA TASA DE DESCUENTO

Es común asignar un valor absoluto mayor (positivo o negativo) a una unidad dada de beneficio que se percibe hoy comparado a una que se percibe en el futuro. Por lo tanto, beneficios futuros y los costos asociados a una opción de mitigación de gases de efecto invernadero tienen que ser descontados a alguna tasa de descuento para llegar a su valor presente. Si se lleva a cabo un análisis de costo-beneficio en términos reales, los valores futuros se expresan en dólares (u otra moneda) con el poder adquisitivo de un momento determinado, por ejemplo, dólares del año 2007. En ese caso, tiene que ser aplicada una tasa de descuento real, es decir, la tasa de descuento, teniendo en cuenta la inflación proyectada general de precios. En adelante, se discutirá sobre la base de tasas reales.

La elección de la tasa de descuento puede afectar fuertemente al atractivo relativo de una opción tecnológica. Compárese, por ejemplo, una opción de generación intensiva en gastos de operación, como una turbina de ciclo combinado a gas, versus una opción de generación intensiva en capital como turbinas eólicas. Asumiendo que utilizamos sólo una tasa de descuento común, la elección de una tasa "alta", en un rango de 10%-12%, afectará positivamente a la tecnología intensa en gastos de operación, mientras que la elección opuesta, de una tasa "baja", en el rango de 4-6%, favorecerá a proyectos intensivos en capital inicial.

La elección de una tasa "alta" generalmente favorecerá a las tecnologías basadas en combustibles fósiles, descontado con bastante intensidad los futuros gastos de combustibles fósiles, mientras que lo contrario potenciará el resultado de opciones renovables. Esto es válido incluso cuando se intenta dar cuenta de las externalidades ambientales del uso de combustibles fósiles, incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales (SOx, NOx, material particulado, etc.)

Es una práctica habitual de las organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Banco Mundial utilizar una tasa de descuento para convertir todos los valores futuros en valores actuales, independientemente de la naturaleza de la tecnología, el tipo de costo o categoría de beneficios. Por lo general, se escoge una tasa alta del orden de 8-10%, en comparación con las tasas habituales de interés libre de riesgo, que en los países de la OCDE han sido del orden de 1-3% (descontando la inflación) en los últimos años. Esta práctica suele ser justificada haciendo referencia al mayor o menor "costo de oportunidad del capital" en el mercado.

En otras palabras, un país debe comenzar a invertir sus recursos de capital disponibles en los proyectos con la mayor tasa de retorno, a continuación, en los que tienen el siguiente mayor rendimiento, etc. Este proceso debe continuar hasta que todos los recursos del capital nacional se gasten. El retorno de la última unidad de inversión debiera coincidir con el OCC. Una la tasa de descuento social expresa entre otras cosas, una prima social asociada a una unidad marginal de consumo sobre una unidad marginal de consumo futuro en el contexto de las oportunidades de inversión productiva y el funcionamiento de los mercados financieros locales. Independiente de

esta consideración, en la práctica, los valores de OCC y la tasa de descuento social son difíciles de establecer de una manera sólida, incluso desde una perspectiva teórica esta práctica es propensa a controversia [JANSEN J.C. 2006].

Algunos trabajos sobre la tasa de descuento de largo plazo han dejado claro además que una tasa de descuento constante sólo tiene una justificación limitada, y que es posible hacer recomendaciones para una mejor práctica. La literatura reciente sostiene que las tasas de descuento varían con el tiempo y que, en general, disminuyen a medida que aumenta el horizonte de evaluación.

Uno de los trabajos más relevantes en que se trata el tema del descuento es el de Arrow (1996). Según Arrow, la tasa de descuento se estima como $d = \rho + \theta g$ donde d es la tasa de descuento del consumo, ρ es la tasa de preferencia temporal pura, θ la elasticidad de la utilidad marginal del consumo (en módulo), y g es la tasa de crecimiento del consumo. El primer término indica que se valora más el consumo presente que futuro. El término θg muestra que el consumidor del futuro estará mejor que el actual por lo que hay que desplazar consumo al presente.

En el contexto de Arrow, el Informe Stern recomienda una tasa de descuento baja³². Esto se explica porque al considerar tasas altas se valora menos a las futuras generaciones. Utilizando una tasa de descuento de 1.4% el informe Stern señala que debe gastarse el 1% del producto mundial en esfuerzos para frenar el cambio climático.

Según Nordhaus, la manera correcta de valorar beneficios futuros es considerar la manera en que las personas efectivamente valoran el futuro basándose en el costo de oportunidad del capital. Nordhaus usa una tasa de 5.5% lo que entrega resultados bastante más conservadores respecto de los esfuerzos que deben realizarse. En efecto, señala que sólo debe gastarse 0.1% del producto mundial.

El descuento hiperbólico considera que la tasa de descuento es alta en el futuro cercano y baja en lapsos temporales mayores. Una tasa hiperbólica permite cambiar la función de valor a una hipérbola. Esto permite aumentar el valor de los flujos futuros respecto de las técnicas usuales.

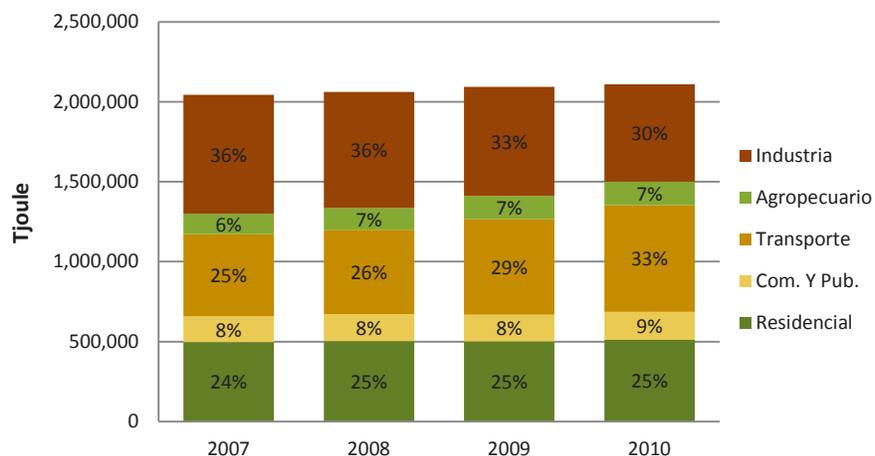
³² Citando valores empíricos toman $\theta = 1$, $g = 1.3$ y $\rho = 0.1$ lo que entrega una tasa de 1.4%.

A.10. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE PAÍSES DE LA REGIÓN.

A.10.1. ARGENTINA

El balance nacional de energía argentino posee un nivel de desagregación menor, pudiendo distinguir sólo los consumos energéticos de los sectores comercial y público, residencial, transporte, industrial y agropecuario. La siguiente figura muestra el consumo energético en los sectores mencionados, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2010.

Figura 39: Consumo energético sectorial de Argentina 2007-2010 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Argentina 2007-2010

La República de Argentina cuenta como última versión de la 2ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático publicada durante el año 2007. En el presente se trabaja para la 3ª Comunicación.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2000. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 28: Emisiones de CO₂e, Argentina 2000.

Sector	MMtCO ₂ e	%
Generación	36,08	30,1%
Manufactura	15,30	12,8%
Transporte	40,24	33,6%
Residencial	17,25	14,4%
Comercial	3,17	2,6%
Agropecuario	7,59	6,3%
Otros	0,29	0,2%
Combustión total	119,89	100%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Argentina 2007.

De la tabla se observa que una parte importante de las emisiones son generadas en el proceso de transformación, estas emisiones, si bien se generan en la generación eléctrica son producidas en el afán de satisfacer la demanda por energía eléctrica, la cual es principalmente impulsada por el sector manufacturero seguido del sector residencial.

A continuación se presentan algunas medidas de mitigación señaladas en la 2ª comunicación argentina como potenciales o en ejecución:

Cuadro 29: Medidas de mitigación propuestas en la 2ª comunicación nacional argentina.

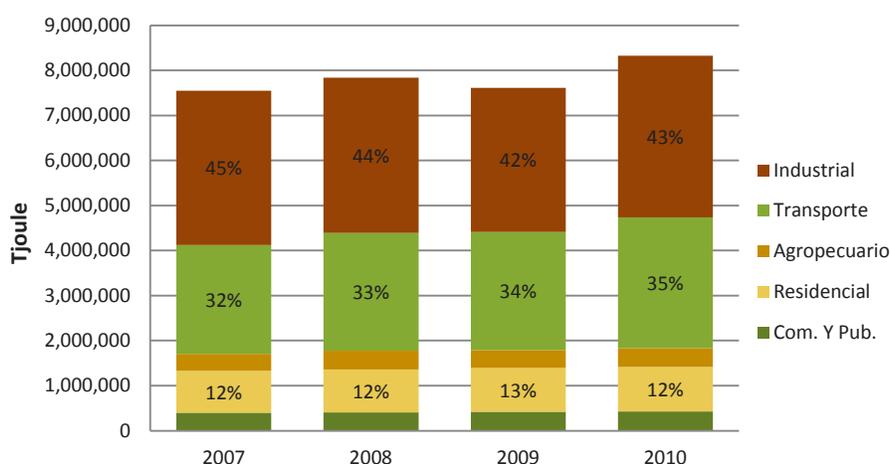
Medida	Sector
Alumbrado público eficiente	Público
Programa de Uso Eficiente de la Energía (PURE)	CPR
Acondicionamiento térmico CPR	CPR
Reemplazo de lámparas incandescentes	CPR
Sustitución de heladeras	CPR
Sistemas de cogeneración	Industria
Cambio de combustible	Transporte
Buenas prácticas de manejo	Transporte
Control de la velocidad	Transporte
Cambio modal de camión a ferrocarril	Transporte

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Argentina 2007.

A.10.2. BRASIL

El balance nacional de energía de Brasil posee un nivel de desagregación mayor para el sector de industria, pudiendo distinguir los consumos energéticos de los subsectores. La siguiente figura muestra el consumo energético en de la demanda final de energía, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2010.

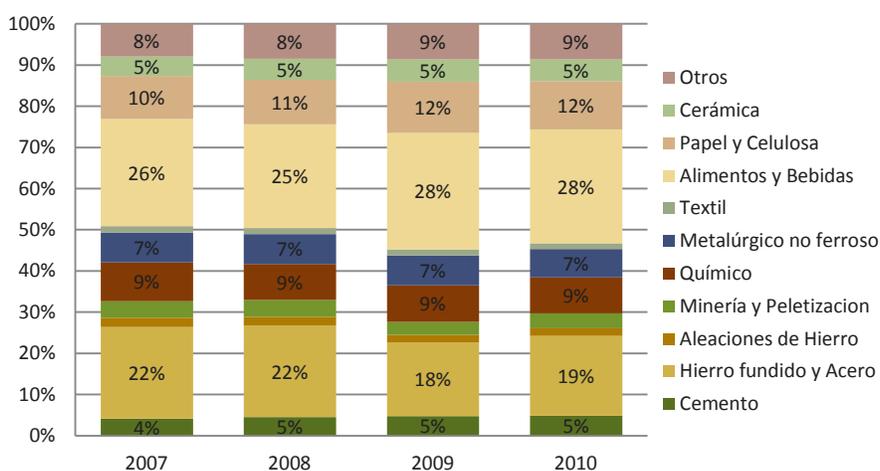
Figura 40: Consumo energético sectorial de Brasil 2007-2010 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Brasil 2007-2010

La siguiente figura permite ver la desagregación del consumo energético en el sector industrial.

Figura 41: Consumo energético subsectores industriales de Brasil 2007-2010



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Brasil 2007-2010

De los subsectores industriales destacan el sector de alimentos y bebidas con un 28% del consumo energético de la industria durante los años 2009-10, posteriormente los sectores más importantes son Hierro fundido y Acero (19%), Papel y Celulosa (12%), y el sector químico (9%).

Brasil cuenta como última versión de la 2ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, publicada el año 2010 por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2005. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 30: Emisiones de CO2e, Brasil 2005.

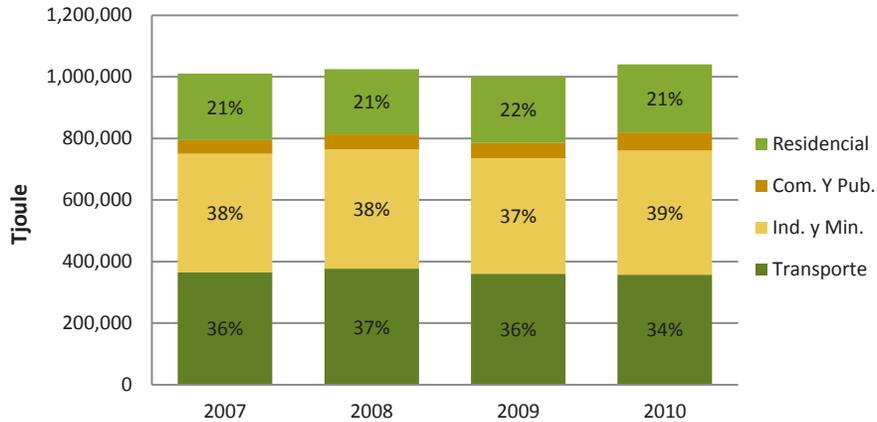
Año 2005	MtCO2	%
Subsector energía	48.601	16%
Industria	75.620	25%
Industria siderúrgica	16.467	5%
Industria Química	15.446	5%
Otras	43.707	15%
Transporte	133.431	44%
Aéreo	5.374	2%
Caminero	122.765	41%
Otros	5.291	2%
Residencial	15.484	5%
Agricultura	14.809	5%
Otros	11.996	4%
Total	299.941	100%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Brasil 2010.

A.10.3. CHILE

El balance nacional de energía de Chile posee un nivel de desagregación mayor para el sector de industria, pudiendo distinguir los consumos energéticos de los subsectores. La siguiente figura muestra el consumo energético en de la demanda final de energía, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2010.

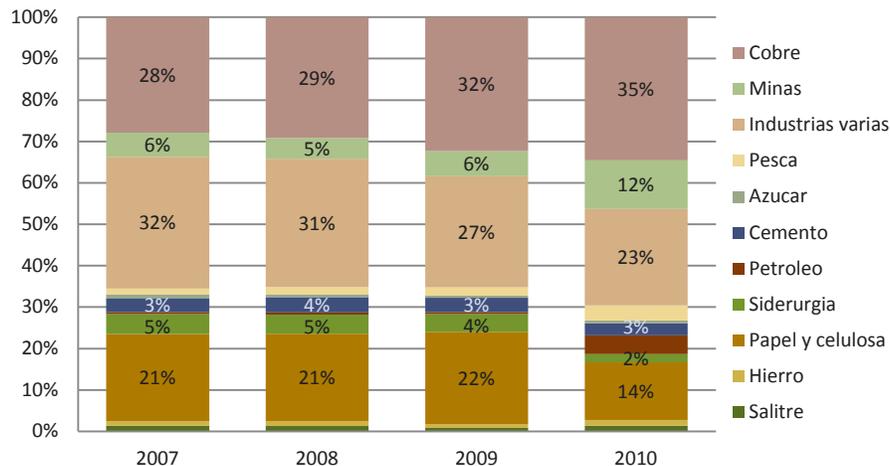
Figura 42: Consumo energético sectorial de Chile 2007-2010 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Chile 2007-2010

La siguiente figura permite ver la desagregación del consumo energético en el sector industrial. De él se destaca en primer lugar el consumo energético por minería que varió desde 34% el año 2007 a 47% el año 2010, potenciado principalmente por un aumento en la intensidad energética del sector cobre. En segundo lugar destaca la industria de papel y celulosa que varió desde 21% promedio en los años 2007-09 hasta 14% el año 2010.

Figura 43: Consumo energético subsectores industriales de Chile 2007-2010



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Chile 2007-2010

Chile cuenta como última versión la 2ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, publicada el año 2011 por el Ministerio de Medio Ambiente.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2006. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 31: Emisiones de CO2e, Chile 2006.

2006	MtCO2e	%
Industria de la energía	20.751	36%
Industria manufacturera, construcción y minas	13.170	23%
Transporte	17.062	30%
Público, residencial y comercial	4.058	7%
Pesca	316	1%
Emisiones fugitivas	1.435	2%
Leña y biogás	1.013	2%
Total	57.806	100%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Chile 2011.

A continuación se presentan las medidas de mitigación señaladas en la 2ª comunicación chilena como potenciales o en ejecución:

Cuadro 32: Medidas de mitigación propuestas en la 2ª comunicación nacional chilena.

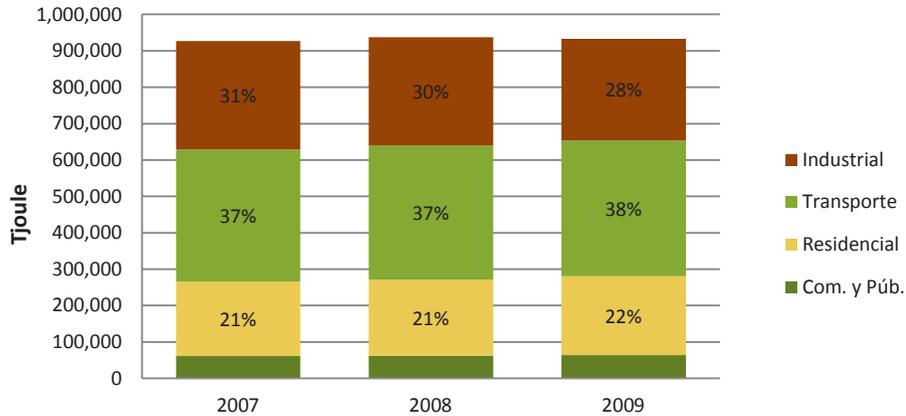
Medida	Sector
Etiquetado de eficiencia energética	CPR
Reglamentación térmica para la vivienda	CPR
Estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS)	CPR
Adelanto recambio motores eficientes	Industria
Cogeneración	Industria
Duchas eficientes	Residencial
Iluminación residencial eficiente	Residencial
Reducción pérdidas stand-by	Residencial
Refrigeración residencial eficiente	Residencial
Aislación viviendas	Residencial
Colectores solares	Residencial
Refrigeración comercial eficiente	Comercial
Uso de biocombustibles	Transporte
Conducción eficiente (Ecodriving)	Transporte
Cambio modal por la construcción de nuevos km de Metro	Transporte
Mejoras Aerodinámicas	Transporte
Renovación parque de camiones	Transporte
Renovación parque de vehículos livianos	Transporte
Vehículos híbridos para renovación del parque	Transporte
Eficiencia energética en el cobre	Cobre

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Chile 2011.

A.10.4. COLOMBIA

El balance nacional de energía de Colombia posee un buen nivel de desagregación para el sector de industria, pudiendo distinguir los consumos energéticos de los subsectores. La siguiente figura muestra el consumo energético en de la demanda final de energía, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2009 de acuerdo a la información disponible en los balances energéticos nacionales.

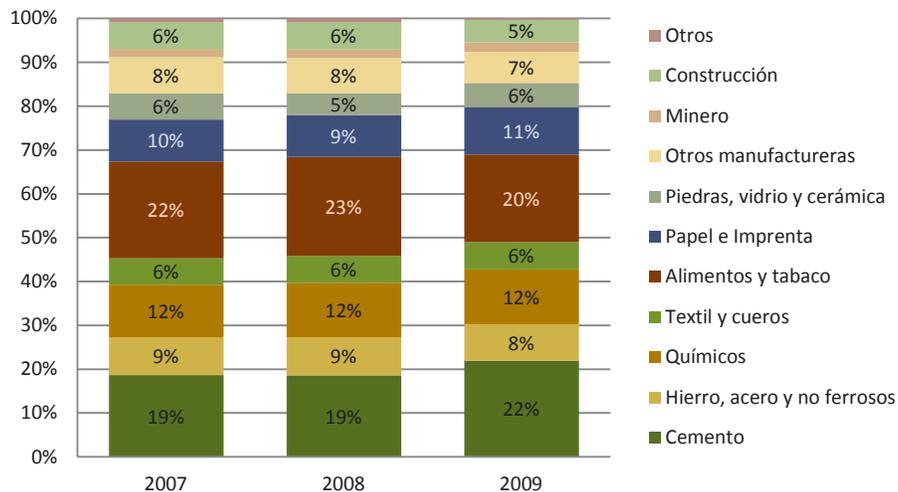
Figura 44: Consumo energético sectorial de Colombia 2007-2009 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Colombia 2007-2009

La siguiente figura permite ver la desagregación del consumo energético en el sector industrial.

Figura 45: Consumo energético subsector industrial de Colombia 2007-2009



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Colombia 2007-2010

Homológamente al caso brasileño, el sector de alimentos y tabacos es el más energo-intensivo, en conjunto con el sector cemento, luego los siguen el sector químico y de papel e imprenta, también destaca la demanda energética del sector Hierro y Acero.

Colombia cuenta como última versión a la 2ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, publicada el año 2010 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2004. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 33: Emisiones de CO2e, Colombia 2004.

Sector	MtonCO2e	%
Generación Eléctrica	16.845	23
Industrias Manufactureras y Construcción	13.940	19
Transporte	19.987	27
CPR, Agropecuario y otros	6.494	9
Emisiones fugitivas	7.523	10
Minería de carbón	3.279	5
Petróleo y gas natural	4.243	6
Quema de biomasa	715	1
Total	73.031	100

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Colombia 2010.

A continuación se presentan algunas medidas de mitigación señaladas en la 2ª comunicación colombiana:

Cuadro 34: Medidas de mitigación propuestas en la 2ª comunicación nacional colombiana

Medida	Sector
Iluminación eficiente residencial y comercial	CPR
Reemplazo de calderas de carbón por gas natural	CPR
Calderas más eficientes	CPR
Refrigeración residencial eficiente	Residencial
Colectores solares	Residencial
Reestructuración de oferta de buses públicos urbanos	Transporte
Vehículos livianos eléctricos	Transporte
Vehículos de transporte público masivo eléctricos	Transporte
Uso de biocombustibles	Transporte
Aumento del nivel de ocupación vehículos particulares	Transporte
Motores eléctricos más eficientes	Transversal

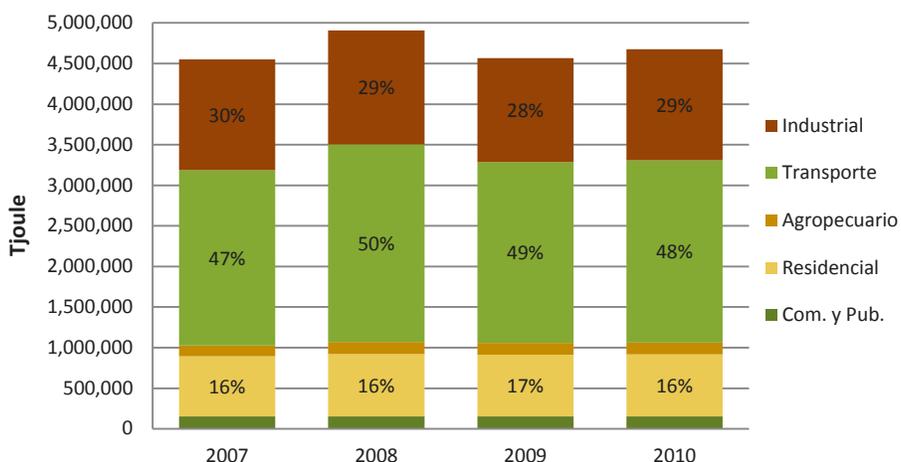
Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Colombia 2010.

A.10.5. México

El balance nacional de energía de México posee un nivel de desagregación mayor para el sector de industria, pudiendo distinguir los consumos energéticos de los subsectores. La siguiente figura

muestra el consumo energético en de la demanda final de energía, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2010 de acuerdo a la información disponible en los balances energéticos nacionales.

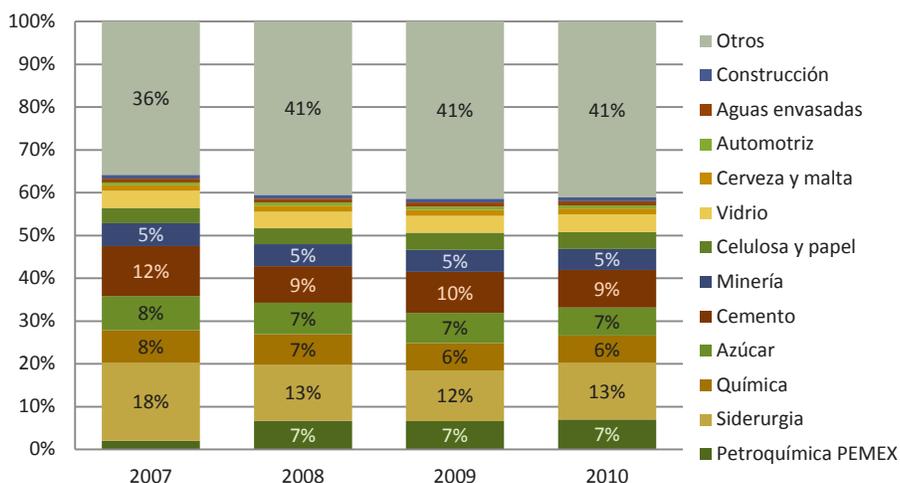
Figura 46: Consumo energético sectorial de México 2007-2010 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de México 2007-2010

La siguiente figura permite ver la desagregación del consumo energético en el sector industrial.

Figura 47: Consumo energético subsectores industriales de México 2007-2010



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de México 2007-2010

México muestra una industria altamente diversificada, en ella se observa que los sectores de mayor demanda energética son el sector siderúrgico, y cemento con participaciones de 13% y 10% en promedio respectivamente en los años evaluados.

México cuenta como última versión a la 4ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, publicada el año 2009 por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2006. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 35: Emisiones de CO2e, México 2006.

Sector	MtonCO2e	%
Industria generadora de energía	149.137	31
Manufactura e industria de construcción	56.832	12
Transporte	144.690	30
Otros sectores	32.042	7
Emisiones fugitivas	47.395	10
Combustibles sólidos	2.410	1
Petróleo y gas natural	44.984	9
Total	477.490	100

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la cuarta comunicación nacional de México 2009.

A continuación se presentan algunas medidas de mitigación señaladas en la 4ª comunicación mexicana:

Cuadro 36: Medidas de mitigación propuestas en la 4ª comunicación nacional mexicana.

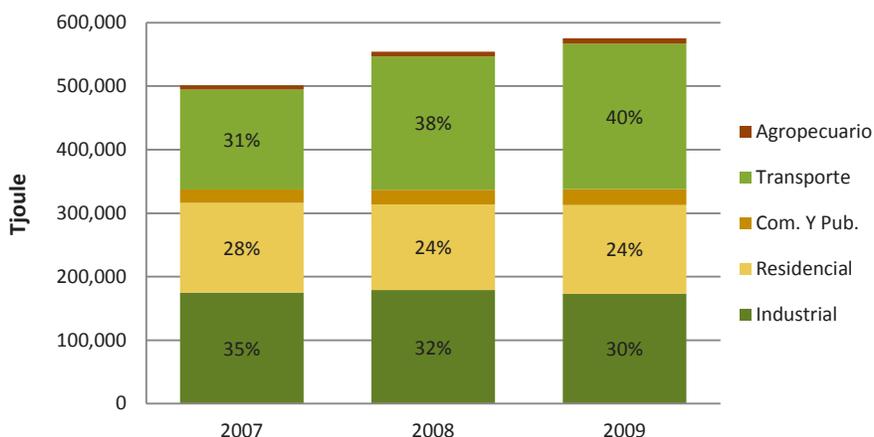
Medida	Sector
Iluminación eficiente residencial y comercial	CPR
Acondicionamiento ambiental	CPR
Refrigeración residencial eficiente	CPR
Colectores Solares	Residencial
Chatarrización	Transporte
Motores eléctricos más eficientes	Industrial

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de México 2009.

A.10.6. PERÚ

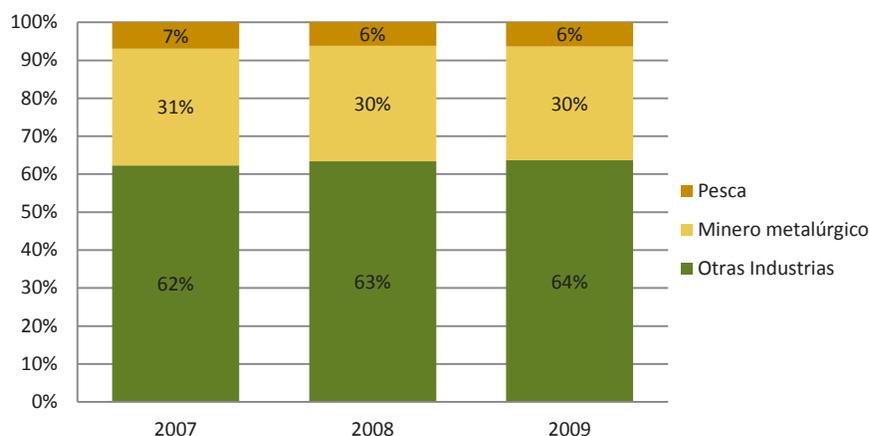
El balance nacional de energía de Perú posee un nivel de desagregación menor para el sector de industria, pudiendo distinguir sólo los consumos energéticos de la Minería no metalúrgica, la pesca, y el resto del sector en conjunto. La siguiente figura muestra el consumo energético en de la demanda final de energía, y su distribución porcentual en el periodo 2007-2009 de acuerdo a la información disponible en los balances energéticos nacionales.

Figura 48: Consumo energético sectorial de Perú 2007-2009 (TJoule)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Perú 2007-2009

Figura 49: Consumo energético subsectores industriales de Perú 2007-2009



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los balances nacionales de energía de Perú 2007-2009

El balance peruano no permite una desagregación detallada del sector industrial, sin embargo se puede apreciar la importancia del sector minero metalúrgico, con un 30% de la demanda energética de la industria.

Perú cuenta como última versión a la 4ª Comunicación Nacional al Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, publicada el año 2010 por Ministerio del Ambiente.

En la segunda comunicación se cuenta con el inventario de emisiones del año 2000. A continuación se presentan las emisiones por combustión.

Cuadro 37: Emisiones de CO2e, Perú 2000.

Sector	MtonCO2e	%
Industrias de energía	3.083	12
Industrias de Manufactura y Construcción	3.260	13
Transporte	9.938	39
CPR y Agricultura	5.224	21
Pesca	2.127	8
Minería	1.357	5
Combustibles Sólidos	4	0
Petróleo y Gas Natural	407	2
Total	25.400	100

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Perú 2010.

A continuación se presentan algunas medidas de mitigación señaladas en la 2ª comunicación peruana:

Cuadro 38: Medidas de mitigación propuestas en la 2ª comunicación nacional peruana.

Medida	Sector
Iluminación eficiente residencial y comercial	CPR
Acondicionamiento ambiental	CPR
Cocinas rurales eficientes	Residencial
Colectores Solares	Residencial
Chatarrización	Transporte
Biocombustibles	Transporte
Ecodriving	Transporte
Vehículos híbridos	Transporte
Calderas eficientes	Industrial
Motores eléctricos	Transversal

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la segunda comunicación nacional de Perú 2010.

A.11. ACCIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL Y MINERO Y TRANSPORTE

En los siguientes cuadros se detallan las distintas acciones y programas estudiados por sector y subsector.

Cuadro 39: Acciones de Eficiencia Energética en el Sector Industrial y Minero

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
Industrias y minas varias	Recambio de motores para uso industrial y minero (*)	<p>a) Proyectos nuevos. Instalación de motores eficientes en nuevas industrias y faenas mineras, o ampliaciones de las instalaciones existentes.</p> <p>b) Sustitución de motores obsoletos.</p> <p>c) Utilización de Variadores de frecuencia VSD en procesos de flujo variable.</p> <p>Supuesto:</p> <p>Penetración de 10% a 60% hasta el año 2016 en forma lineal</p>	Las tres medidas generan un ahorro de 208,7 GWh/año. Esto corresponde al 0,325% del total del consumo para el año 2016 (PRIEN 2008)	"Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile" (PRIEN 2006) y "Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Industrias y minas varias	Etiquetado de Eficiencia Energética en Motores y VSD's	Incorporar equipos y sistemas industriales de uso generalizado al Programa Nacional de Etiquetado de Eficiencia Energética	893 GWh para el primer año de ampliación del etiquetado	Estimación del PRIEN 2007 y Convenio de desempeño PPEE-SEC 2007
Industrias Varias	Uso de dispositivos eléctricos eficientes	El uso de luminarias eficientes y la aplicación de programas como el "EnergyStar" han logrado disminución en el consumo de energía de computadores y equipos oficina.	Es posible alcanzar ahorros del orden de 1% anual del consumo total de energía	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Industrias Varias	Utilización de calor desperdiciado	Incluso en industrias donde se ha alcanzado un alto grado de conservación de energía, todavía existe un alto potencial para la recuperación de calor.	Se estima que se pueden lograr incrementos de eficiencia de 2,5% anuales durante 15 años.	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
				sectores" (PRIEN 2008)
Industrias Varias	Reciclaje de materiales y re-uso	El reciclaje de materiales con un alto contenido energético ha aumentado durante los últimos quince años en la mayoría en países industrializados. Por ejemplo, la tasa de producción de acero bruto, obtenido por el procesamiento de chatarra, es de un 43% a nivel mundial. En los países desarrollados, las tasas de reciclaje de metales no ferrosos son de 30% para el aluminio, 35% para el cobre y 25% para el zinc.	El reciclaje de materiales puede proporcionar incrementos de eficiencia de un 0,9% anual	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Celulosa y Papel	Cogeneración	Sistemas de cogeneración eficientes para la producción de vapor, agua caliente, y electricidad por medio de la quema de licores, cortezas, y otros desechos de la madera.	Los consumos específicos en Chile han decrecido desde 0,6 hasta 0,3 Tep/ton en el período 1990-2004. Internacionalmente se han alcanzado rendimientos del orden de 0,2 Tep/ton. Se estima que las medidas de eficiencia energética implicarán mejoras en los rendimientos alcanzando consumos del orden del 0,2 Tep/ton. En 15 años (al 2021), el potencial de reducción anual alcanzaría al 2,2%.	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
Siderurgia	Aplicación de tecnologías de recuperación de calor	Se pueden obtener más ganancias de eficiencia mediante el precalentamiento de desechos; un mejor uso del carbón y el oxígeno; y el reciclaje del coque en hornos. Se debe considerar que hay 2 maneras de producir acero con distintos requerimientos energéticos: el proceso de reducción-oxidación que recibe mineral de hierro en los altos hornos. El segundo es el proceso eléctrico que es alimentado con chatarra de acero, la que es fundida en hornos eléctricos.	7% de ahorro en consumo energético al 2021 según PRIEN (2008). El consumo específico en Chile está entre 0.4 y 0.5 Tep/ton de acero producido e internacionalmente es de 0.3 Tep/ton (CNE 2004)	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Petroquímica	Rediseños en los procesos y una reducción en los desperdicios químicos		Incrementos en la eficiencia energética del 2,6% anual. (En los países de EU – 15, la intensidad energética ha disminuido en un 40% entre los años 1990 y 2004)	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Cemento	Reducciones en el uso de energía mediante modificaciones al proceso, específicamente a la operación de hornos.	Los nuevos hornos de proceso seco son más eficientes que los del proceso húmedo ya que no se requiere energía adicional para eliminar la humedad. En un proceso seco, los gases de emisiones del horno se usan para precalcinar la materia prima y evitar la presencia de agua. Estos procesos pueden usar un 50% menos de energía que uno convencional (húmedo). La industria nacional ya ha	Los consumos específicos oscilan entre 0,07 y 0,09 Tep/ton. Se puede alcanzar una meta de consumo específico de 0,06 Tep/ton en el período de 15 años, lo que significaría un ahorro acumulado al año 15 del 22%	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
		incorporados estas modificaciones.		
Azucarera	Sistemas de cogeneración y recuperación de calor		El consumo específico puede reducirse de 0,267 Tep/ton a 0,184 Tep/ton (consumo específico registrado en Bélgica para el año 1999). El ahorro acumulado en 15 años alcanzaría el 31% del consumo reportado en 2006.	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Pesca	Mejora de la operación de los motores de impulsión en los barcos, de los ciclos de calor en la fabricación de harina de pescado y de la mejora de bombas y motores menores		El potencial anual de ahorro en un periodo de 15 años es de 0,5%.	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Minería del cobre	Recambio de motores para uso industrial y minero (*)	a) Proyectos nuevos. Instalación de motores eficientes en nuevas industrias y faenas mineras, o ampliaciones de las instalaciones existentes. b) Sustitución de motores obsoletos. c) Utilización de Variadores de frecuencia VSD en procesos de flujo variable. Penetración de 10% a 80% hasta el año 2016 en forma lineal	Las tres medidas generan un ahorro de 622,5 GWh/año con respecto al escenario proyectado para el año 2016 (PRIEN 2008)	"Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile" (PRIEN 2006) y "Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Minería del cobre	Procesos hidrometalúrgicos		Potencial de mejoramiento de un 0,5% anual. El año 10	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
Minería del cobre	Producción de cátodos por medio de pirometalurgia		Potencial de mejoramiento de un 15% anual. El año 10	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Gran Industria y otra minería	Recambio de motores para uso industrial y minero (*)	a) Proyectos nuevos. Instalación de motores eficientes en nuevas industrias y faenas mineras, o ampliaciones de las instalaciones existentes. b) Sustitución de motores obsoletos. c) Utilización de Variadores de frecuencia VSD en procesos de flujo variable. Penetración de 10% a 80% hasta el año 2016 en forma lineal	Las tres medidas generan un ahorro de 649,6 GWh/año con respecto al escenario proyectado para el año 2016 (PRIEN 2008)	"Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile" (PRIEN 2006) y "Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Hierro	Recuperación de calor, uso de equipos eficientes y aumento del uso de material de reciclado		Los potenciales de mejoramiento pueden ser de hasta un 4,1%	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
Salitre	Recuperación de calor		Ahorro de 2,7% al año	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)
	Introducción de equipos energéticamente eficientes		Ahorro de un 0,5% al año	"Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la

Subsector	Acción	Descripción de la acción	Reducción Esperada	Fuente
				eficiencia energética de los distintos sectores" (PRIEN 2008)

(*)Para el análisis económico se distinguen dos tipos de motores: motores estándar y motores eficientes o Premium. • Los motores estándar tienen una eficiencia igual o peor que los definidos por la Norma NEMA 12-10 del año 1998. Esta eficiencia también coincide con la denominación EFF2 del EuropeanLabellingScheme. • Los motores eficientes o NEMA Premium son aquellos que cumplen con la Norma NEMA Premium (NEMA Standards MG 1-2003) y coinciden, muy aproximadamente, con la denominación EFF1 del EuropeanLabellingScheme.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de estudios de eficiencia energética

Cuadro 40: Acciones de Eficiencia Energética en el Sector Transporte

Subsector	Medida	Descripción de la medida	Reducción Esperada	Fuente
Sector transporte caminero	Mejoras en motores, peso de los vehículos, la resistencia al aire y mantenimiento.		Potencial de ahorro de un 12% (una tasa de crecimiento del ahorro de 0,85% anual) al año 2021, lo que equivale a 15.396 GWh/año.	Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores (PRIEN 2008)
Subsector camiones	Cambio de Edad Máxima de Camiones	Se estudian dos casos: Edades máximas de 25 y 20 años.	Reducciones 113.900-152,400(m3/año) para escenarios de 25 y 20 años de edad máxima. Fuente: Presentación MTT (2007).	"Análisis de Eficiencia energética en el Transporte Interurbano de Carga" Presentación Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones 2007
Sector transporte aéreo	Introducir conceptos de nuevos motores		Ahorros energéticos del 20 al 30%	Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores (PRIEN 2008)
Sector transporte marítimo	Eficiencia energética de los motores marítimos		5 a 10% en ahorros de combustibles	Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores (PRIEN 2008)

Fuente: Elaboración propia sobre la base de estudios de eficiencia energética

A.12. POTENCIAL GLOBAL ESTIMADO DE REDUCCIONES DE CO₂ EL AÑO 2030

Table 2 Estimated potential for CO₂ emission reduction in 2030

	Area ^a	2030 production (Mt) ^b		Mitigation potential (%)	Cost range, (\$/tCO ₂ -eq)	Mitigation potential (MtCO ₂ -eq/year)	
		A1	B2			A1	B2
CO ₂ emissions from processes and energy use							
Steel ^{c,d}	Global	1,554	1,578	15–40	<50	430–1,500	420–1,500
	OECD	436	388	15–40	<50	90–300	80–260
	EIT	176	193	25–40	<50	80–240	85–260
	Dev. Nat.	941	997	25–40	<50	260–970	250–940
Primary aluminum ^{e,f}	Global	49	43	15–25	<100	53–82	49–75
	OECD	12	12	15–25	<100	16–25	15–22
	EIT	6	6	15–25	<100	12–19	8–13
	Dev. Nat.	31	25	15–25	<100	25–38	26–40
Cement ^{g,h,i}	Global	5,524	4,418	11–40	<50	720–2,100	480–1,700
	OECD	596	553	11–40	<50	65–180	50–160
	EIT	313	219	11–40	<50	40–120	40–60
	Dev. Nat.	4,615	3,645	11–40	<50	610–1,800	410–1,500
Ethylene ^j	Global	329	218	20	<20	85	58
	OECD	138	147	20	<20	35	40
	EIT	19	11	20	<20	5	3
	Dev. Nat.	171	60	20	<20	45	15
Ammonia ^{k,l}	Global	199	195	25	<20	110	100
	OECD	20	18	25	<20	11	10
	EIT	19	22	25	<20	10	12
	Dev. Nat.	159	155	25	<20	87	80
Petroleum refining ^m	Global	4,838	4,697	10–20	Half <20	150–300	140–280
	OECD	2,220	2,123	10–20	Half <50	70–140	67–130
	EIT	412	415	10–20	Half <50	12–24	12–24
	Dev. Nat.	2,206	2,160	10–20	Half <50	68–140	65–130
Pulp and paper ⁿ	Global	1,226	927	5–40	<20	49–420	37–300
	OECD	657	536	5–40	<20	28–220	22–180
	EIT	62	42	5–40	<20	3–21	2–13
	Dev. Nat.	508	349	5–40	<20	18–180	13–110
Other industries, electricity conservation							
	Global				25% <20	1,100–1,300	410–540
	OECD				25% <50	140–210	65–140
	EIT				50% <100	340–350	71–85
	Dev. Nat.				- ^d	640–700	280–320

Energy Efficiency (2009) 2:109–123

117

Table 2 (continued)

	Area ^a	2030 production (Mt) ^b		Mitigation potential (%)	Cost range, (\$/tCO ₂ -eq)	Mitigation potential (MtCO ₂ -eq/year)	
		A1	B2			A1	B2
Total							
Sum ^{a,p,q}	Global					2,300–7,500	1,500–6,100
	OECD					400–1500	300–1,300
	EIT					500–900	200–600
	Dev. Nat.					1,500–4,600	1,000–3,800

Results are presented for selected energy-intensive industries and for three world regions. Impact of increased recycling is included in the potentials as (material) efficiency improvement. Note that it was impossible to distinguish fuel mix effects from efficiency changes. However, fuel mix effects are generally very small, except for the cement and pulp and paper industries

A.13. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

En esta sección se analiza la disponibilidad de la información asociada a cada variable relevante para la construcción de un modelo de uso final. Para este efecto, en primera instancia, se identifican las instituciones que podrían poseer dicha información y que posteriormente serán entrevistadas. En particular se distinguirá entre información pública, información privada o confidencial e información no existente.

Con el fin de realizar la búsqueda de información se ha identificado un grupo de instituciones públicas y privadas que han participado en la implementación de medidas de EE y aquellas que son potenciales poseedores de información relevante. En el siguiente cuadro se listan las instituciones asociadas a cada sector productivo:

Cuadro 41: Instituciones relevantes en la búsqueda de información

Sector transporte	Industria y minería	Comercial	Público	Residencial
ANAC	CPC	Mesa de Ef. Energética en el Retail	MIDEPLAN	CHILECTRA
TRANSANTIAGO	SOFOFA	Cencosud, D&S, etc.	MOP	TRANSELEC
METRO	Consejo Nacional de Producción Limpia	Fiscaliza Nacional Económica	Ministerios	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones	Mesa Minera de Eficiencia Energética en la Gran Minería	PPEE (auditorías energéticas)	Subsecretaría de Desarrollo Regional	CONAMA
SECTRA	COCHILCO	INE	Intendencias y Gobiernos Regionales	SERNAC
CORFO	Ministerio de Economía		Dirección de Presupuesto	Municipios
INE	Ministerio de Minería		Superintendencia de Electricidad y Combustibles	CORFO
PPEE	CORFO		Chile Compra	CDEC
DGAC y JAC	SEC		Asociación Chilena de Municipalidades	CNE
Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante	CONAMA		Municipios	MIDEPLAN (CASSEN y otras)
	Empresas públicas		CNE	MINVU
	CNE		PPEE	PPEE
	INE (ENIA)		INE	INE
	PPEE			

Fuente: Elaboración propia sobre la base del “Plan Estratégico 2007-2015 del Programa País de Eficiencia Energética de Chile”, PPEE, diciembre 2007.

El análisis de disponibilidad de información se desarrolló en dos etapas. La primera etapa consiste en analizar la información disponible en las páginas web de las instituciones como encuestas,

estudios e información en línea. La segunda etapa consiste en desarrollar entrevistas con algunas de las instituciones antes indicadas con el fin de precisar y detallar la información.

Como resultado de ambas etapas de búsqueda de información, con énfasis en la primera, se presentan los siguientes catastros de información para cada sector, donde se detalla el uso o subproceso seleccionado, sus variables relevantes, la especialidad existente, la temporalidad, fuente de información, el período de existencia de los datos, la ubicación de la información y su estado entre otros.

A.13.1. SECTOR TRANSPORTE

A continuación se presenta el catastro del sector transporte y el correspondiente análisis de su información.

Cuadro 42: Catastro sector Transporte

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación de la información	Acceso	Estado	Comentario
Automóviles livianos y medianos	Parque Automotriz	Regional	Anual	<ul style="list-style-type: none"> • INE • Plantas de Revisión Técnica - Sectra 	<ul style="list-style-type: none"> • 1975 – 2012 • 1998 - 2012 	La información de PRT difiere con la del INE en 1998 y 1999. Desde 2001 la información coincide.	<ul style="list-style-type: none"> • Estadísticas INE 	<ul style="list-style-type: none"> • Pública • Pública (bajo solicitud) 	<ul style="list-style-type: none"> • PDF, papel y BD • BD Acces 	INE y PRT: Información de automóviles particulares, taxis, camionetas y furgones, camiones, buses y otros
Automóviles livianos y medianos	Ventas de vehículos nuevos	Regional	Anual	ANAC	1998-2012 (detallada), 1989-1993 (agregada)		www.anac.cl (información parcial en pdf)	<ul style="list-style-type: none"> • Pública • Restringido 	<ul style="list-style-type: none"> • PDF • BD ANAC 	Detalle disponible en varios estudios
Camiones	Parque Automotriz	Regional	Anual	<ul style="list-style-type: none"> • INE • Plantas de Revisión Técnica - Sectra 	<ul style="list-style-type: none"> • 1975 – 2012 • 1998 - 2012 	La información de PRT difiere con la del INE en 1998 y 1999. Desde 2001 la información coincide.	<ul style="list-style-type: none"> • Estadísticas INE • Sectra 	<ul style="list-style-type: none"> • Pública • Pública (bajo solicitud) 	<ul style="list-style-type: none"> • PDF, papel y BD • BD Acces 	INE y PRT: Información de automóviles particulares, taxis, camionetas y furgones, camiones, buses y otros
Camiones	Ventas de vehículos nuevos	Regional	Anual	ANAC	1998-2012 (detallada), 1989-1993 (agregada)		www.anac.cl (información parcial en pdf)	<ul style="list-style-type: none"> • Pública • Restringido 	<ul style="list-style-type: none"> • PDF • BD ANAC 	Detalle disponible en varios estudios
Buses	Parque Automotriz	Regional	Anual	<ul style="list-style-type: none"> • INE • Plantas de Revisión Técnica - Sectra • Transantiago (buses urbanos) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1975 – 2012 • 1998 – 2012 • ND 	La información de PRT difiere con la del INE en 1998 y 1999. Desde 2001 coinciden.	<ul style="list-style-type: none"> • Estadísticas INE • Sectra • Transantiago y empresas operadoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Pública • Pública (bajo solicitud) • Restringido 	<ul style="list-style-type: none"> • PDF, papel y BD • BD Acces • ND 	INE y PRT: Información de automóviles particulares, taxis, camionetas y furgones, camiones, buses y otros
Transporte	Antigüedad,	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública	BD	Información por

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Periodo Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación de la información	Acceso	Estado	Comentario
pasajeros	vehículos, tráfico, consumos por transporte urbano, interurbano, escolar, etc.							(agregada). Pagada (detalle)		empresa.
Transporte pasajeros	Vehículos de transporte utilizados según capacidad y años de antigüedad	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Transporte pasajeros	Número de servicios o líneas, longitud líneas o rutas, pasajeros transportado, etc.	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Transporte pasajeros	Tarifa media por pasajero-km. y vehículo-km.	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Transporte pasajeros	Consumo de combustible y otros gastos	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Todos los modos vehiculares	Consumos energéticos	Nacional	Anual	CNE	1973 - 2012	--.	BNE CNE	Público	Excel, BD	
Todos los modos vehiculares	Rendimientos por tipo de vehículo	Nacional	--	Fuel Economy	1985 - 2012	--	http://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.htm	Público	BD	Información de rendimientos vehículos nuevos

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Periodo Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación de la información	Acceso	Estado	Comentario
Todos los modos vehiculares	Tráfico	Comuna Santiago y autopistas concesionadas	Diario	Autopistas Concesionadas	Variable desde el inicio del servicio	--	Autopistas Concesionadas	Restringido	ND	No se pudo acceder a estas fuentes
Todos los modos vehiculares	Pasadas de vehículos por plazas de peaje	Mensual	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por plaza de peaje.
Metro	Consumo electricidad	Comuna Santiago	Anual	<ul style="list-style-type: none"> • CNE • Metro S.A. 	1973 - 2012	Ok.	<ul style="list-style-type: none"> • BNE CNE • Memoria Metro Santiago 	Público	PDF, Excel, BD	Consumos bajos. Basta información CNE
Ferrocarril	Consumo electricidad	Regional	Anual	CNE	1973 - 2012	Ok.	<ul style="list-style-type: none"> • BNE CNE • Memoria Metro Santiago 	Público	PDF, Excel, BD	Consumos bajos. Basta información CNE
Ferrocarril	Carga y pasajeros transportados por Km.	Nacional	Mensual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Camiones	Carga y pasajeros transportados por Km.	Nacional	Mensual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Ferrocarril	Existencia y potencia del equipo tractor	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Ferrocarril	Existencia y capacidad de equipo de pasajeros	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.
Ferrocarril	Material y combustible utilizados en tracción	Nacional	Anual	INE	ND	--	Estadísticas INE	Pública (agregada). Pagada (detalle)	BD	Información por empresa.

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Periodo Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación de la información	Acceso	Estado	Comentario
Transporte marítimo	Consumos energéticos viajes nacionales e internacionales	Nacional	Anual	CNE	1973 - 2012	--.	BNE CNE	Público	Excel, BD	
Transporte marítimo	Carga transportada y horas de ocupación de naves	Regional	Mensual	Subtrans	2002 - 2012	--	http://www.subtrans.cl / subtrans/maritimo/ estadisticas.php	Público	PDF, Excel,	Movimiento de carga en puertos estatales
Transporte aéreo	Consumos energéticos vuelos nacionales e internacionales	Nacional	Anual	<ul style="list-style-type: none"> • CNE • Empresas aeronáuticas • Sistema Estadístico de Tráfico Aéreo (DGAC) 	1973 - 2012	--.	<ul style="list-style-type: none"> • BNE CNE • www.dgac.cl 	Público	<ul style="list-style-type: none"> • Excel, BD • PDF 	Estadísticas de aterrizajes y despegues por aeropuerto

Fuente: Elaboración propia

A.13.2. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA INFORMACIÓN

La metodología para la proyección de los consumos energéticos del sector transporte se basa en el uso de información del stock de vehículos motorizados existentes en Chile. De esta forma, la información se obtiene principalmente de las estadísticas del INE, que posee datos sobre parque y otras variables relevantes a partir de 1975.

Ello incluye información de automóviles particulares, taxis, camionetas y furgones, camiones, buses y otros. Además se encuentra información acerca del tráfico y las pasadas de vehículos por plazas de peaje.

Las ventas de vehículos nuevos se obtienen de la información entregada por ANAC, la cual está en detalle para los años 1998-2012, y en forma agregada para los años 1989-1993.

Adicionalmente, se cuenta con información de las plantas de revisión técnica para la RM para el período 1998-2011. La información de las PRT difiere fuertemente con la del INE en 1998 y 1999, pero ya en el año 2011 la información de ambas fuentes comienza a coincidir.

La metodología estima las ventas de vehículos en un período, como la diferencia entre el stock que existe y el stock del año anterior, más una tasa de mortalidad u obsolescencia. Este dato no se conoce y se debe estimar usando la información de parque y de ventas a nivel nacional para los años 1989-2012.

La estimación estadística de esta tasa (usando los datos de ventas y parque) es sólo válida en promedio. Esto debido a que las ventas no guardan relación con los diferenciales calculados del stock. Esto se debe a problemas temporales y por lo tanto, existe un error de medición al estimar las ventas, como la diferencia de stock menos la obsolescencia.

Otra información que se obtiene a partir de supuestos, es aquella relacionada a las normas de emisión. A partir de la información de las PRT, se obtiene la proporción de vehículos sin convertidor catalítico. Adicionalmente, se dispone de un calendario de normas (estándar de emisión) que se obtiene a partir de estudios de SECTRA y ANAC, el que permite proyectar el consumo de combustibles y las emisiones de los vehículos que entrarán al país en el futuro. Para ellos se usan los factores de emisión de COPERT IV.

También es necesario determinar los factores de deterioro de los vehículos, lo que permite determinar los consumos de combustible para diferentes edades de los móviles. Para ello se dispone de los factores de deterioro Modelo IVE, US-EPA, y en Chile del estudio "Experimental analysis of emission deterioration factors for light duty catalytic vehicles. Case study: Santiago, Chile", realizado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

En el caso de los vehículos catalíticos que se comercializan en la Región Metropolitana, estos deben aprobar el proceso de Homologación y Certificación Vehicular realizado por el Centro de

Control y Certificación Vehicular (3CV)³³. Para llevar a cabo este proceso el Centro de Control y Certificación Vehicular utiliza los factores de deterioro que el fabricante declara para la determinada marca y modelo.

En el caso de camiones se utilizan los factores de deterioro recomendados por International Vehicle Emissions Model (IVE)³⁴.

Otra variable importante que se requiere definir es el nivel de actividad de los distintos modos de transporte. En el caso del total de kilómetros recorridos por los vehículos particulares en Santiago, este igual a los viajes en auto realizados durante un año multiplicado por la distancia promedio de los viajes. El número de viajes anuales se puede obtener de las encuestas origen destino (la última realizada el año 2011). La cantidad de viajes de automóviles no es igual al número de viajes en automóvil, ya que en muchos viajes el chofer va acompañado de otra persona. Un buen valor observado de tasas de ocupación de automóvil para la ciudad de Santiago es de 1,4 personas por vehículo.

Por lo tanto, el número de viajes diarios de automóviles es el número total de viajes en la ciudad multiplicado por la partición modal del automóvil y dividido por la tasa de ocupación promedio de los vehículos livianos:

$$NA = \frac{Viajes \cdot P_{Auto} \cdot Km \cdot F_{d-a}}{Parque}$$

Donde:

NA : Son los kilómetros recorridos anualmente por cada vehículo.

Viajes : Es el número de viajes diarios motorizados en Santiago (incluye viajes en transporte público)

Pauto : Es la partición modal del modo auto chofer.

Km : Son los kilómetros promedio de cada viaje.

Fd-a : Factor para pasar de viajes diarios a viajes anuales.

Parque : Es el parque de automóviles en la ciudad.

El número de viajes totales diarios se puede suponer que no depende del parque y puede ser obtenido de alguna corrida del modelo de transporte ESTRAUS para los años 2005 y 2010. Los kilómetros promedio de los viajes en automóvil también se obtienen de un modelo de transporte ya que esto permite incorporar los cambios de población y localización estimada, lo que produce un incremento en la distancia promedio recorrida en cada viaje.

³³ D.S. N°54/97 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

³⁴ IVE User Manual 2.1 - Attachment A, <http://www.issrc.org>

En el caso de los vehículos comerciales, estos poseen un uso distinto ya que están en ruta la mayor parte del tiempo. Para ello se dispone de otros estudios como “Análisis de evaluaciones y re-evaluaciones ex-post, VI etapa” (1997) y estudios de CNE³⁵ y SEREMITT³⁶.

Por su parte, en el modo camiones, se dispone del estudio “Determinación de Factores de Emisión Para Vehículos Pesados en la Región Metropolitana”, encargado por CONAMA al Departamento de Ingeniería Mecánica de la universidad de Chile.

Por último, para las estimaciones de actividad de Transantiago se utiliza información de las corridas del modelo ESTRAUS³⁷ (SECTRA). Gracias a este modelo es posible evaluar, por ejemplo, las nuevas autopistas urbanas, las que permiten circular a mayor velocidad y descongestionan otras vías cercanas, pero también permite predecir cuanta gente deja de usar el transporte público ahora que el automóvil se hace más atractivo gracias a la disminución de los tiempos de viaje.

Respecto al transporte público en Santiago, la evolución de la flota de buses se obtiene del estudio “Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana” realizado por DICTUC por encargo de CONAMA. El estudio presenta la evolución de parque hasta el año 2015.

La velocidad es uno de los principales factores necesarios para calcular los consumos de combustible y las emisiones de los distintos tipos de categorías vehiculares. Durante la realización de la última encuesta origen destino se midió la velocidad promedio para la ciudad de Santiago, adicionalmente se midieron por separado las velocidades de circulación para los principales ejes de la ciudad y otras grandes ciudades del país.

La velocidad depende principalmente del flujo vehicular existente en cada calle, es más, se considera generalmente que el tiempo de viaje crece en forma exponencial con el flujo de vehículos. Durante los últimos años, especialmente durante la última década, se ha apreciado un importante aumento de la demanda por transporte lo que ha producido importantes aumentos en la congestión, especialmente en la hora punta.

Finalmente, se dispone de otros datos que son útiles en la proyección de consumos de combustibles y otras variables relacionadas. En Chile se dispondrá a futuro de los datos medidos

³⁵ “Estudio de mercado tipo de gasolina utilizada”. Preparado para la Comisión Nacional de Energía por BST ConsultingGroup, Santiago, Mayo 1998.

³⁶ “Estudio de diagnóstico y recomendaciones para el mercado de taxis y taxis colectivos”, 1993; “Análisis y estudio de los servicios de transporte en Chile”, INTRAT SA, Informe de Avance Julio 1998

³⁷ ESTRAUS es un modelo de transporte de cuatro etapas que busca representar el funcionamiento de la ciudad de Santiago. Para este modelo Santiago se considera formado por zonas cada una de las cuales tiene asociado un número de viajes que salen de ella (generación) y viajes que llegan (atracción). ESTRAUS decide, para cada tipo de usuario existente, entre que zonas son los viajes, qué modo de transporte se utiliza y por qué ruta lo hace. La ruta escogida es aquella que permite reducir el tiempo de viaje de cada persona. Los tiempos de viaje son calculados tomando en cuenta la congestión.

de CO₂ y consumo de combustible, además de un sello de eficiencia energética, entregados por el laboratorio 3CV. Además se disponen de datos de consumo internacionales en la base de datos www.fueleconomy.org.

A.13.3. SECTOR INDUSTRIA DEL COBRE

A continuación se presenta el catastro del sector cobre y el correspondiente análisis de su información.

A.13.4. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA INFORMACIÓN

La metodología para proyectar los consumos energéticos de la industria del cobre se basa en la variación anual de la producción de las empresas, el tipo de proceso y en particular los grandes equipos más intensivos en consumo de energía en ciertos procesos, como los molinos, planta de concentración, entre otros.

La información de producción proyectada puede ser obtenida a través de las empresas mineras, además que COCHILCO desarrolla estudios de inversiones proyectadas de la minería con horizontes de 5 a 10 años.

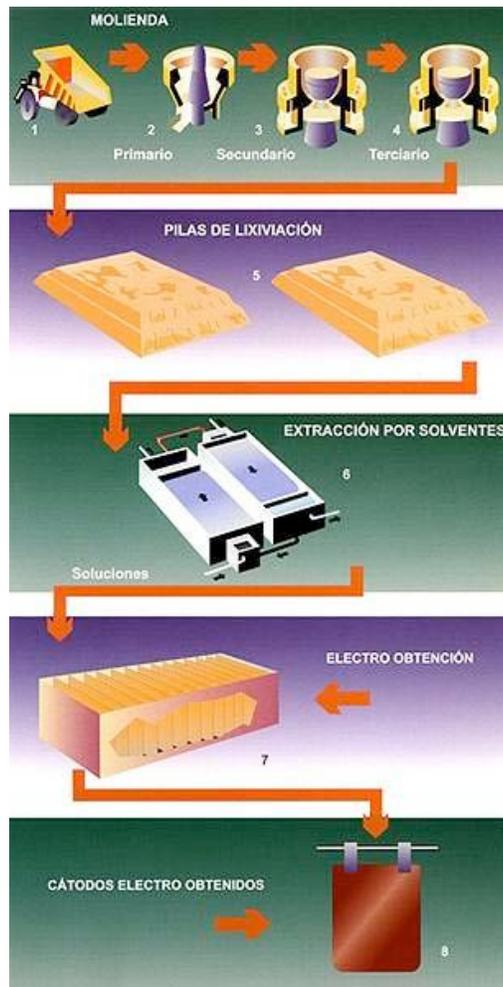
Respecto a los procesos, ellos se representan en las figuras siguientes y comprenden aquellos determinados para minerales oxidados y sulfurados (Mina, Concentradora, Fundición, Refinación electrolítica, Lixiviación, Extracción por solventes, Electro obtención). Sin embargo, esta no es la clasificación más relevante, ya que los mayores consumos se presentan en la etapa de molienda y concentración.

Cuadro 43: Catastro Industria del Cobre

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación de la información	Acceso	Estado	Comentario
Producción de cobre	Consumo eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> SIC/SING, nacional Por empresas 	<ul style="list-style-type: none"> Anual Mensual 	COCHILCO y CNE	1973 – 2012	--	<ul style="list-style-type: none"> www.cochilco.cl/ BD privada Cochilco y encuesta CNE 	<ul style="list-style-type: none"> Público Restringido 	<ul style="list-style-type: none"> PDF BD 	La información de COCHILCO Incluye Mina, Concentradora, Fundición, Refinación electrolítica, Lixiviación, Extracción por solventes, Electro obtención (por empresas y agregado)
Producción de cobre	Consumo combustible a nivel agregado y por tipo de combustible	<ul style="list-style-type: none"> SIC/SING, nacional Por empresas 	Anual	COCHILCO y CNE	2001-2011	--	<ul style="list-style-type: none"> www.cochilco.cl/ BD privada Cochilco y encuesta CNE 	<ul style="list-style-type: none"> Público Restringido 	<ul style="list-style-type: none"> PDF BD 	Incluye Mina, Concentradora, Fundición, Refinación electrolítica, Lixiviación, Extracción por solventes, Electro obtención (por empresas y agregado)
Nivel de actividad	Horas trabajadas, turnos, etc.	Por empresa	ND	COCHILCO y empresas mineras	ND	--	BD empresas	Restringido	ND	
Producción	TMF mineral	Por empresas	Anual y mensual	INE, COCHILCO y empresas mineras				Público		

Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Proceso Productivo Minerales Oxidados



Fuente: Codelco - Chile

Figura 51: Proceso Productivo Minerales Sulfurados



Fuente: Codelco - Chile

A partir de ello, se relacionan los consumos más importantes de combustibles y electricidad, de acuerdo a la producción proyectada de cada empresa, con lo que se obtiene la proyección de consumo en cada caso.

En el caso de la información de consumos energéticos por procesos unitarios y empresas, las estadísticas de COCHILCO, de acuerdo a sus ejecutivos, abarcan el 95% de la producción de cobre del país.

Por el lado de la eficiencia energética es necesario contar con la información de consumos por tipo de proceso, de manera de poder aplicar medidas de eficiencia en un tipo específico. De la misma forma, sería conveniente levantar un tipo de “estandar de eficiencia” que permita comparar empresas (antiguas y modernas), para de esta forma apuntar a que se logren mejoras de eficiencias diferenciadas de acuerdo al potencial que pueda tener cada una de ellas. Para ello

se debería desarrollar una encuesta cualitativa a las empresas mineras y estudios que permitan estimar este estándar.

Por otra parte, no es posible trabajar a nivel de stock con motores dada la infinidad de equipos, difíciles de catastrar, existentes en las empresas. De esta forma, se podría intentar realizar una encuesta, que permitiera caracterizar los motores y principales equipos consumidores de energía, pero sería una labor bastante compleja. En este sentido existe un estudio del Ministerio de Minería que estima los consumos energéticos de la minería, concentrándose caso el 75% de dicho consumo en los motores eléctricos.

A.13.5. INFORMACIÓN DEL SECTOR INDUSTRIAL

A continuación se presenta el catastro del sector industrial y el correspondiente análisis de su información.

Cuadro 44: Catastro Sector Industrial

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
Nivel de actividad	Unidades físicas / monetarias	Datos por sectores, subsectores, y sectores de destino en la industria ⁽¹⁾	Mensual, anual	SOFOFA	1970 - 2011	Departamento de estudios SOFOFA	http://200.27.194.5/sofofa/index.aspx?channel=3548&appintanceid=9116&pubid=5325	Publico	Excel / .pdf	
Nivel de actividad	Unidades físicas	Por empresa	trimestral	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://www.ine.cl/canales/form_electronicos/edificacion_energia_pesquero/pdf_pesquero/eoisp.pdf	Publico	.pdf	
Nivel de actividad	Pesos	Por categoría CIU	anual	Banco Central	1960-2011	Cuentas Nacionales	www.bcentral.cl	Público	Excel / pdf	
Consumo eléctrico total	Porcentaje de variación (año base ...)	Por sistema interconectado, por sector	anual	SOFOFA	2000 - 2011	Departamento de estudios SOFOFA	http://www.sofofa.cl/sofofa/index.aspx?channel=3552	publico	.pdf	
Electricidad comprada	kwh / pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/industria/enia/pdf/enia2004.pdf	publico	.pdf	
Electricidad vendida	kwh / pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/industria/enia/pdf/enia2004.pdf	publico	.pdf	
Electricidad generada	kwh / pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/industria/enia/pdf/enia2004.pdf	publico	.pdf	

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de información	Periodo Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
							dustria/enia/pdf/enia2004.pdf			
Consumo de combustibles para producción de fuerza y calor	unidades físicas / pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://espino.ine.cl/cgi-bin/rpwebengine.exe/portalaction?&MODE=MAIN&BASE=CLENIA&MAIN=webservermain.inl	publico	.pdf	
Consumo de combustibles como materia prima	unidades físicas / pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 4	---	restringido		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario
Consumo energético total	Teracalorías	Sector (papel, siderurgia,...) y por empresas	Anual	CNE	1991-2011	Estadísticas CNE	http://www.cne.cl/estadisticas/f_balance.html	publico	.pdf	
Índice intensidad energética	porcentaje	sector	Anual	CNE	1990 - 1999	Archivos CNE	http://www.cne.cl/archivos_bajar/indices_sector_industrial.pdf	Publico	.pdf	
Costo de la demanda	pesos	Por empresa	Anual	INE	1998-2011	ENIA, formulario 1	http://espino.ine.cl/cgi-bin/rpwebengine.exe/portalaction?&MODE=MAIN&BASE=CLENIA&MAIN=webservermain.inl	publico	.pdf	
Consumo de combustible de los grupos electrógenos con potencia superior a 20 kw	Unidades físicas	Por empresa/ sector / RM / regiones	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/rete/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario
Consumo de combustible de calderas industriales	Unidades físicas	Por empresa/ sector / RM / regiones	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/rete/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de información	Periodo Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
(generadoras de vapor) con consumo energético de combustible mayor a 1 Mega Joule por hora										
Consumo de combustible de calderas de calefacción con consumo energético de combustible mayor a 1 Mega Joule por hora	Unidades físicas	Por empresa/ sector / RM / regiones	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/retc/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario
Consumo de combustible	Unidades físicas	Por procesos con combustión / sin combustión	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/retc/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario
Nivel de actividad	Unidades físicas / monetarias	Por establecimiento perteneciente a alguno de los sectores determinados por el D.S 138/05 ⁽²⁾ / por procesos con combustión o sin combustión / por artefactos ⁽³⁾	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/retc/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario
Número de días de cada mes del	días	Por fuentes definidas por el D.S 138/05 ⁽²⁾ y	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/retc/1279/p	Restringido a usuarios		Se requiere clave de acceso

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
año en que operan las fuentes		por artefactos ⁽³⁾		Sanitaria RM			ropertyvalue-15095.html	registrados		para acceder al formulario
Ciclo característico de operación en los días de la semana		Por fuentes definidas por el D.S 138/05 ⁽²⁾ y por artefactos ⁽³⁾	Anual	MINSAL, RETC, Autoridad Sanitaria RM	2006-2011	Formulario electrónico 138	http://www.conama.cl/retc/1279/propertyvalue-15095.html	Restringido a usuarios registrados		Se requiere clave de acceso para acceder al formulario

Fuente: Elaboración propia

También se ha detectado la siguiente información que estará disponible en el futuro, la que será obtenida a partir del Cuestionario Estudio de Demanda y Eficiencia Energética para el Sector Industrial Manufacturero (CNE) próximo a ser implementado.

Cuadro 45: Catastro Sector Industrial. Información de encuesta futura.

Uso	VARIABLES relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
Costo de energía consumida	pesos	Por empresas	anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...	Esta información se encuentra en un cuestionario que aún no ha sido implementado
Consumo total por energético	porcentaje	Por empresas	anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Desagregación por usos del consumo total, por energético:				CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Transporte	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Procesos industriales	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Autogeneración eléctrica	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Usos	Porcentaje	Por empresas	Anual							

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
complementarios	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Desagregación del consumo de los procesos industriales, por energético:				CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Uso motor	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Uso térmico	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Uso eléctrico	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Otros usos	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Desagregación del consumo de los procesos industriales de uso térmico por energético:				CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Generación de vapor	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Uso en hornos	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Calefacción	Porcentaje	Por empresas	Anual							
Rendimiento ⁽⁴⁾ de los procesos industriales de uso térmico, por energético:										
Generación de vapor	Porcentaje									
Uso en hornos	Porcentaje									
Calefacción	Porcentaje									

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
Energía total generada	kWh	Por empresas	Anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Participación de la Energía adicional generada:		Por empresas	Anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Participación de autogeneración	Porcentaje									
Participación de cogeneración	Porcentaje									
Generación eléctrica por combustible:		Por empresas	Anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Generación bruta	Kwh									
Consumo	Unidades físicas									
	Unidades físicas									
Capacidad total de almacenamiento para autogeneración	Días									
Número de días de operación normal										
Generación de vapor en calderas, por combustible:		Por empresas	Anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Generación bruta	Kj									
Consumo de combustible	Unidades físicas									
Aprovechamiento del calor generado en:		Por empresas	Anual	CNE	...	Cuestionario EE CNE	...	....	...
Generación de vapor	Porcentaje									

Uso	Variables relacionadas	Espacialidad (SIC/SING, comuna, provincia, región)	Temporalidad	Fuente de la información	Período Existencia datos	Compatibilidad	Ubicación información	Acceso	Estado	Comentario
Calefacción o calentamiento de agua	Porcentaje									
(Pre) calentamiento de medios de producción	Porcentaje									
Hornos	Porcentaje									
Residuos no aprovechados	Porcentaje									
Otros	Porcentaje									
Compras y ventas anuales de energéticos	Unidades físicas	Por empresas	Anual							

Fuente: Elaboración propia

(1) Los sectores considerados por SOFOFA en la industria manufacturera son:

- Alimentos, bebidas y tabaco
- Textil, prendas de vestir y cueros
- Maderas y muebles
- Celulosa, papel e imprentas
- Petróleo, caucho y plástico
- Minerales no metálicos y metálica básica
- Productos metálicos, máquinas y equipos

(2) Los sectores determinados por el D.S 138 / 05 sobre declaración de emisiones de contaminantes atmosféricos son los siguientes:

- Producción de celulosa
- Fundiciones primarias y secundarias
- Centrales termoeléctricas

- Producción de cemento, cal o yeso
- Producción de vidrio
- Producción de cerámica
- Siderurgia
- Petroquímica
- Asfaltos

(3) Los artefactos determinados por el D.S 138 / 05 sobre declaración de emisiones de contaminantes atmosféricos son los siguientes:

- Grupos electrógenos con potencia superior a 20 kw
- Calderas industriales (generadoras de vapor) con consumo energético de combustible mayor a 1 Mega Joule por hora
- Consumo de combustible de calderas de calefacción con consumo energético de combustible mayor a 1 Mega Joule por hora

(4) El rendimiento se define como el ratio energía generada / energía suministrada.

A.13.6. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA INFORMACIÓN

El primer cuadro presentado anteriormente muestra el estado actual de la información concerniente al sector industria. En ella se puede apreciar la existencia de tres niveles de información.

El primer nivel corresponde a información agregada del sector, entre la cual se encuentra el nivel de actividad del sector en su totalidad y en los subsectores definidos de acuerdo a la clasificación CIU, tanto en unidades físicas como monetarias. Adicionalmente existe información del consumo energético total de cada uno de los subsectores, definidos de acuerdo a la clasificación del Balance de Energía (CNE).

Con respecto al costo de la demanda, el INE proporciona información a nivel de empresa.

El segundo nivel corresponde a información del consumo energético por uso, entre la cual se encuentra la proporcionada por el INE, que establece el consumo de combustible por tipo de combustible para cada empresa encuestada, distinguiendo entre procesos de producción de fuerza, producción de calor, y su uso como materia prima (ENIA, Formulario 1). Con respecto al consumo de electricidad, se encuentra información desagregada a nivel de empresas, diferenciándose la compra, la venta y la generación de electricidad por parte de las empresas (ENIA, Formulario 1).

El tercer nivel corresponde a información de stock, encontrándose el consumo energético de los artefactos determinados por el D.S 138 / 05 sobre declaración de emisiones de contaminantes atmosféricos, y en los sectores determinados por el mismo decreto.

Tomando en cuenta la información identificada en el sector industrial, es posible contabilizar la demanda de energía a nivel de uso, es decir, efectuando la distinción entre procesos de producción de fuerza, producción de calor, y uso como materia prima. Dado que la información a nivel de stock está restringida a los artefactos normados por el D.S. 138/05, su inclusión en la proyección de la demanda dependerá de la representatividad de dichos artefactos en el consumo energético total de cada subsector de la industria, información que estará disponible una vez que se haya efectuado el catastro de las fuentes reguladas por dicho decreto.

Con respecto a la desagregación sectorial, se puede clasificar a la industria por categorías (de acuerdo al CIU) o por sectores (aquellos definidos en el Balance de Energía, CNE). Para ello es necesario contar con criterios que permitan clasificar a las empresas encuestadas dentro de cada categoría o sector, entre los cuales se encuentra el tipo de producto primario final de la empresa, su nivel de producción y sus ventas anuales. En relación a esto último, la clasificación de las empresas según el monto de sus ventas anuales, permite determinar su tamaño y, por lo tanto, discernir si pertenece al sector industrias varias (el cual incluye a las PYMES) o a algún otro sector.

En este sentido, el trabajo de Caracterización General de las PYMES con enfoque de mejoramiento de la eficiencia energética³⁸, aporta criterios para diferenciar las PYMES del resto de la industria.

En relación a la representatividad de las encuestas consideradas, es necesario tomar en cuenta el tamaño de las muestras de cada encuesta, y adoptar supuestos que permitan tomar los resultados de dichas encuestas como el universo de empresas de la industria.

En el caso de la Encuesta Nacional Industrial Anual (ENIA), el universo considerado son los establecimientos manufactureros, cuyo tamaño corresponde a una ocupación de mínimo 10 personas, y el directorio de los establecimientos considerados en la encuesta se actualiza mediante los registros de patentes industriales que las municipalidades proporcionan al INE y de acuerdo a los registros de contribuyentes del SII principalmente.

En el caso de la información proporcionada por SOFOFA, el universo considerado son las 7005 empresas registradas en el directorio industrial, consideradas como las más relevantes y representativas del quehacer empresarial del país.

La elaboración del Anuario de Cuentas Nacionales del Banco Central de Chile, por su parte, emplea información proveniente principalmente de registros tributarios, fiscales, de comercio exterior, y estados financieros.

Con respecto a la información recopilada por MINSAL a través del formulario 138, el proceso se encuentra aún en fase de implementación, por lo que aún se requiere la “construcción de un catastro a nivel nacional de las fuentes reguladas por el D.S. Nº 138, y por ende, se espera que los primeros años las autoridades sanitarias locales den a conocer la normativa y presten el apoyo necesario a las empresas en relación con el formulario de declaración. Por otro lado, se requiere implementar los sistemas de aseguramiento de calidad de la información entregada por parte de las empresas”³⁹.

La proyección de la demanda energética del sector industria requiere del empleo de supuestos asociados al nivel de actividad de los subsectores considerados, así como de supuestos relacionados con el consumo de energéticos. En el caso del nivel de actividad, la proyección del PIB por sectores productivos podría permitir proyectar el nivel de actividad de los subsectores de la industria. En este sentido, la serie histórica del PIB regional por sectores económicos que elabora el Banco Central de Chile (entre los cuales se encuentran los sectores agropecuario-silvícola, pesca, minería, industria manufacturera y construcción) puede servir como base de la proyección del PIB sectorial.

En el caso del consumo de energéticos por parte los subsectores de la industria y por parte de los diferentes usos de cada subsector, es preciso elaborar supuestos tecnológicos que ofrezcan una

³⁸“Caracterización general de las PYMES con enfoque de mejoramiento de la eficiencia energética” preparado por ValgestaLtda.. para la Comisión Nacional de Energía (CNE).

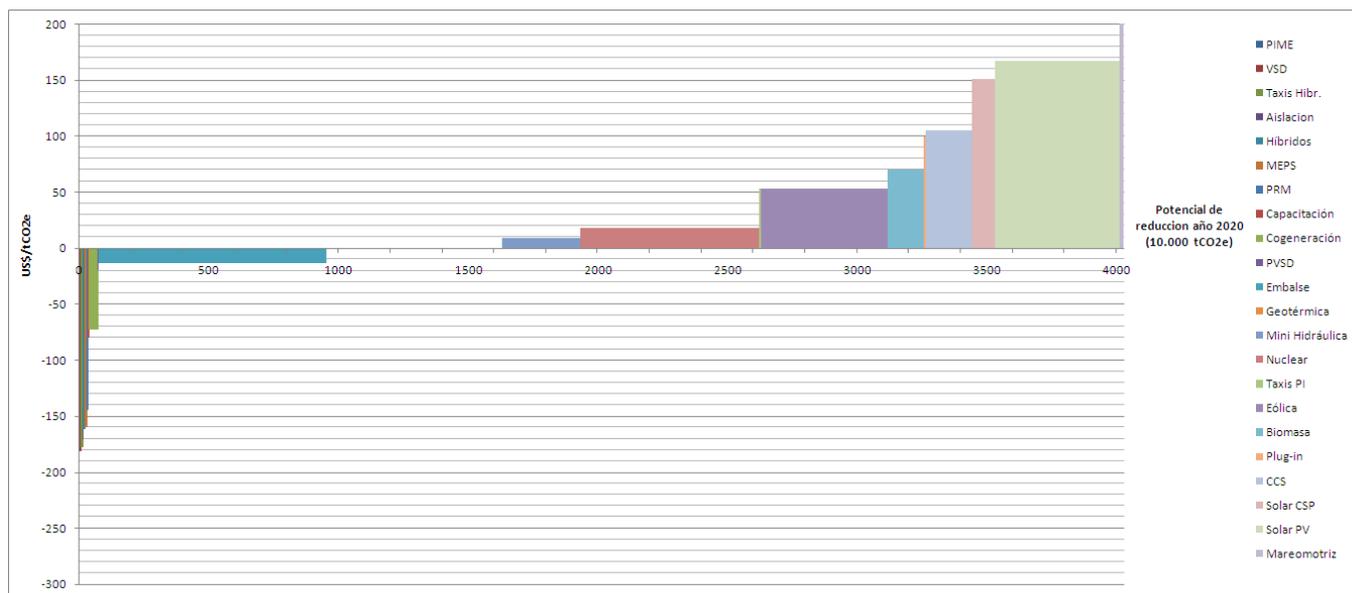
³⁹ Declaración de fuentes atmosféricas. CONAMA. www.conama.cl

proyección de la eficiencia en el uso de energéticos por parte de los procesos de producción de fuerza y de calor, así como la sustitución entre estos.

La segunda tabla que se presenta en esta sección muestra la información que se encontrará disponible en el futuro, una vez que se implemente el cuestionario de Estudio de Demanda y Eficiencia Energética para el Sector Industrial Manufacturero (CNE). El aporte de dicha información, sumado a un mayor desarrollo en la implementación del formulario 138, permitirá establecer una clasificación más detallada de los usos de cada subsector de la industria, enfatizando especialmente en el uso térmico de los procesos industriales. Hasta el momento sólo se dispone de información asociada a los procesos de producción de fuerza y de calor por parte de las empresas (sin desagregar los procesos de calor), así como el uso de combustibles como materia prima. Esta desagregación, sin embargo, carece de la especificidad que permitiría evaluar medidas de eficiencia energética dirigidas a procesos específicos y artefactos determinados (eficiencia de calderas, por ejemplo, en los procesos de generación de vapor; o eficiencia de hornos en los procesos de calor directo).

Adicionalmente, el cuestionario de Estudio de Demanda y Eficiencia Energética para el Sector Industrial Manufacturero permitirá obtener información acerca de la autogeneración y cogeneración en la industria manufacturera, permitiendo con ello efectuar estudios más acuciosos tanto por el lado de la demanda de energéticos como por el lado de la oferta.

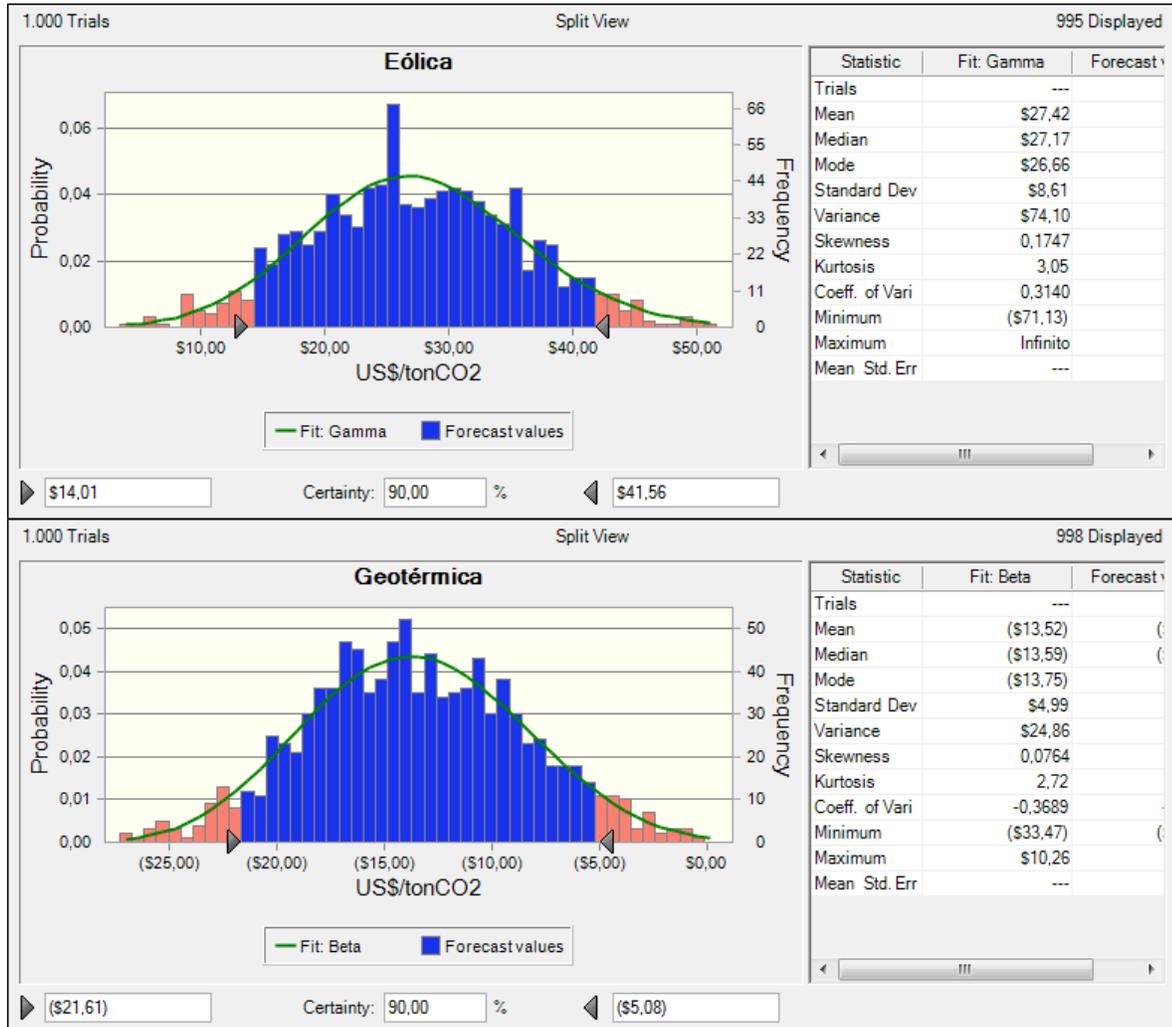
A.14. RESULTADOS CON TASA DE DESCUENTO DE 12%

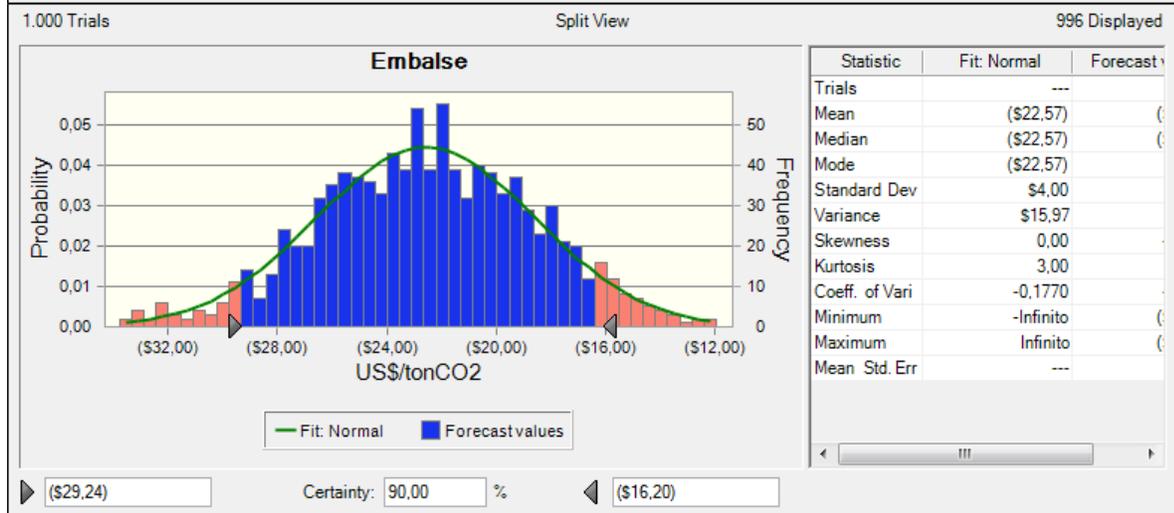
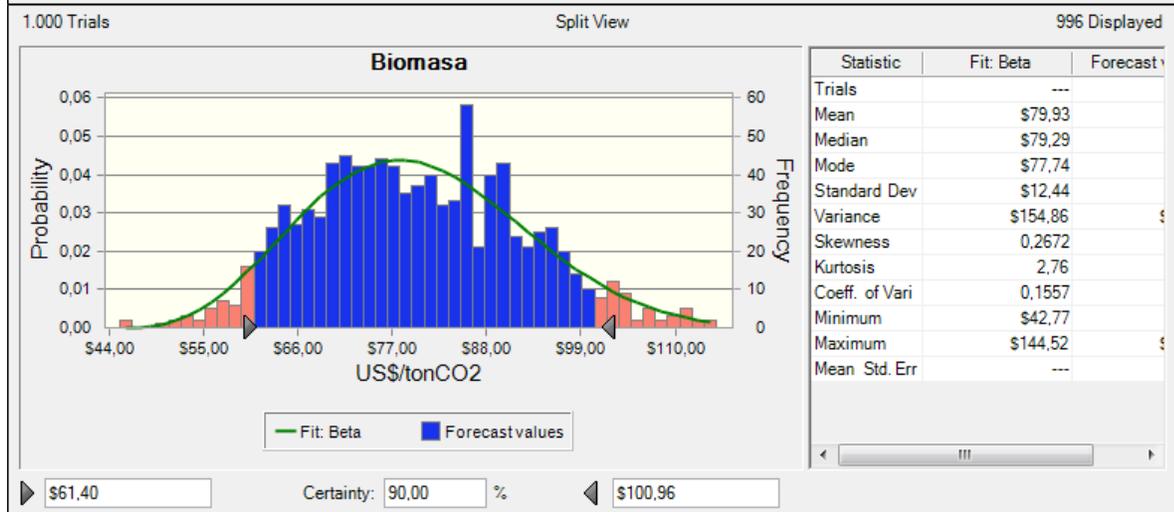
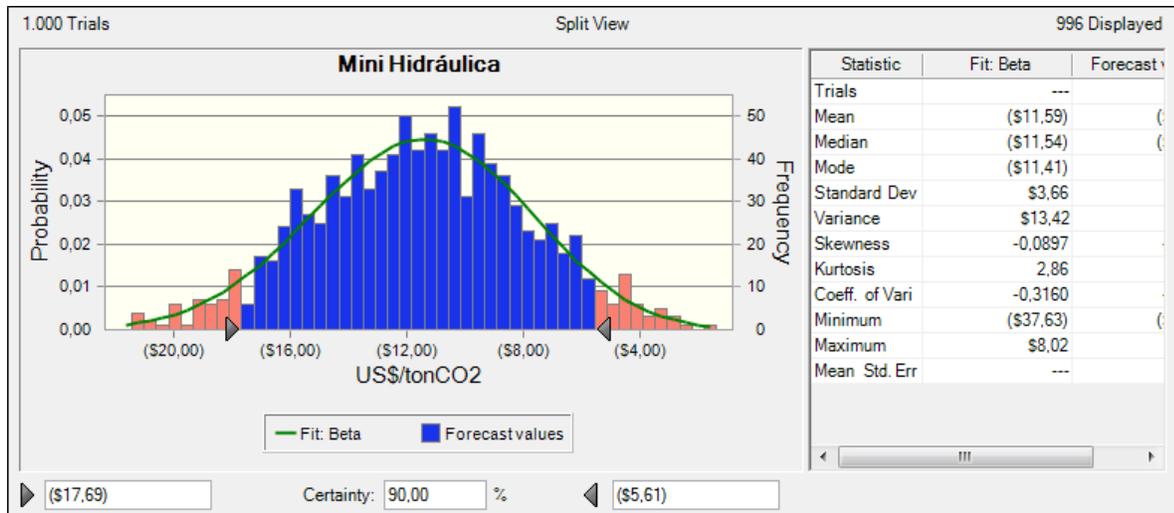


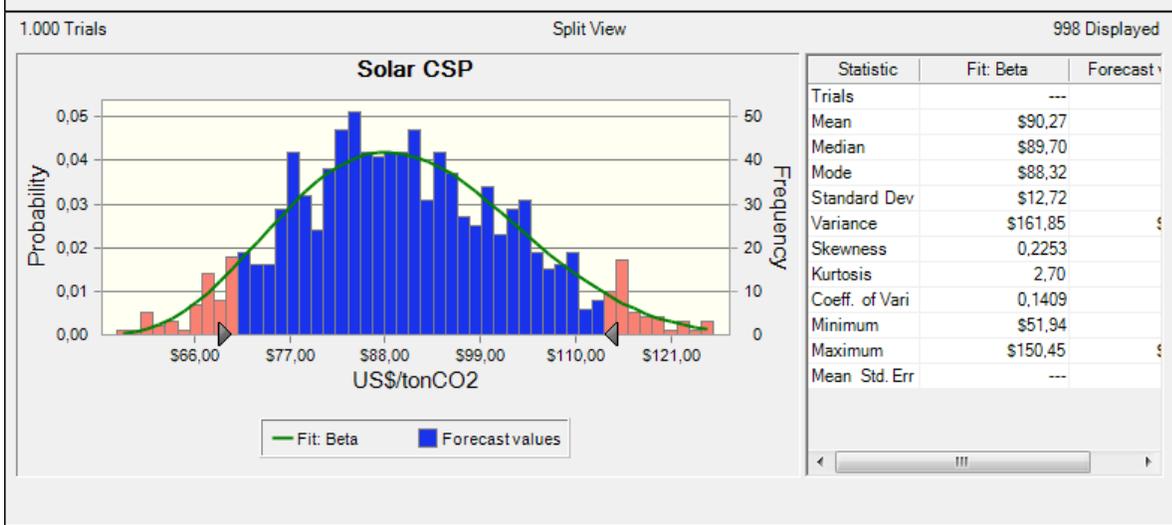
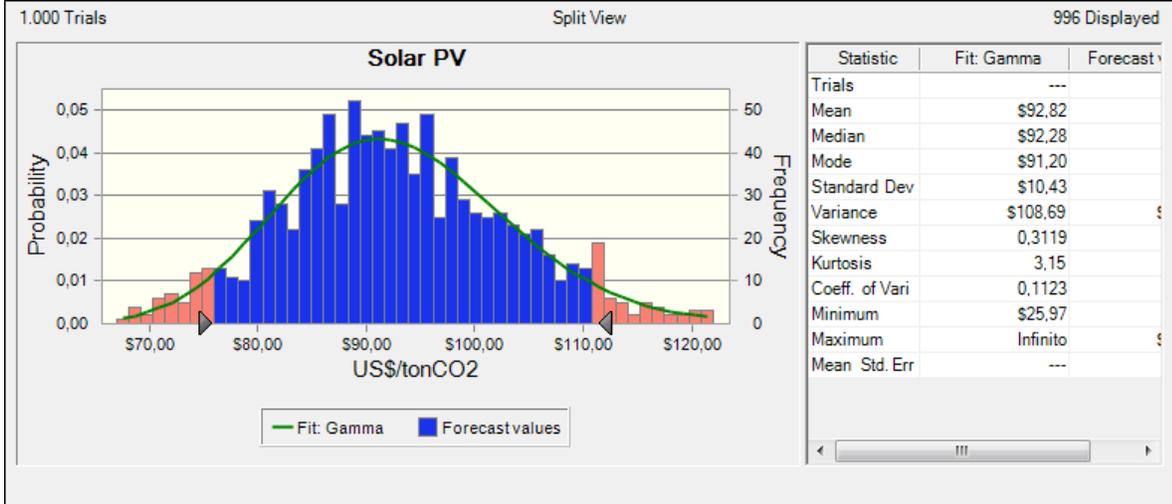
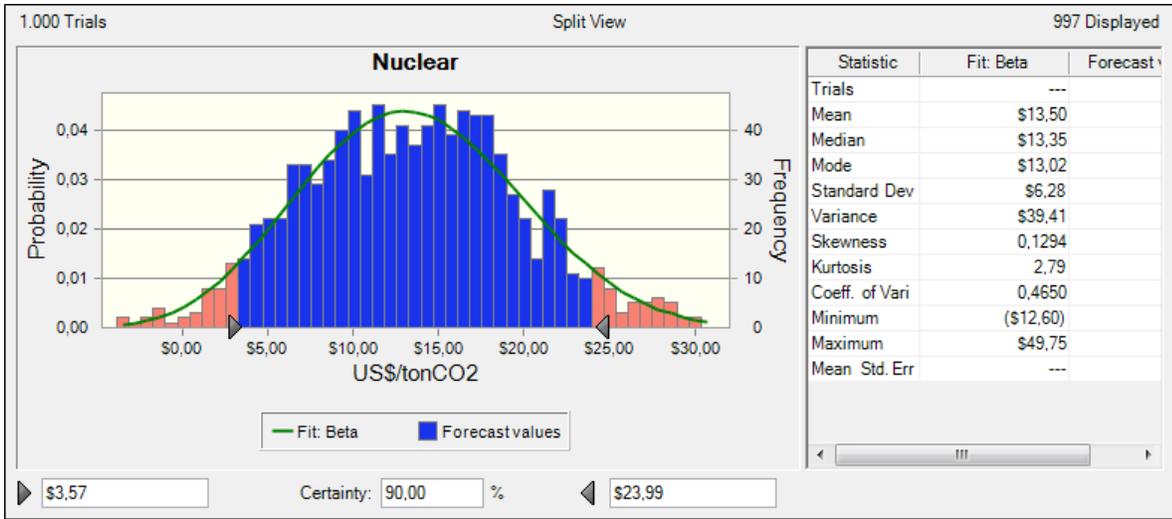
Sector	Medida	Moda (US\$/tCO2)	5%	95%	Potencial (tCO2)
Cobre	PIME	-199,0	-230,7	-166,4	4.016
P&C	VSD	-180,9	-208,6	-151,4	45.599
Transporte	Taxis Hibr.	-178,0	-215,5	-124,8	63.093
P&C	Aislación	-170,6	-196,1	-143,2	11.760
Transporte	Híbridos	-162,0	-193,6	-112,9	78.096
Cobre	MEPS	-159,6	-188,9	-127,7	74.448
Cobre	PRM	-144,6	-171,3	-115,8	43.790
Transporte	Capacitación	-80,0	-185,2	189,0	37.182
P&C	Cogeneración	-72,8	-103,1	-40,5	347.900
Cobre	PVSD	-19,7	-63,7	36,8	21.247
Transformación	Embalse	-13,1	-22,3	-4,5	8.760.000
Transformación	Geotérmica	0,0	-10,6	13,1	6.820.000
Transformación	Mini Hidráulica	8,8	0,7	18,3	3.000.000
Transformación	Nuclear	17,7	1,0	31,5	6.900.000
Transporte	Taxis PI	53,0	8,8	86,0	97.832
Transformación	Eólica	53,4	34,3	73,5	4.866.667
Transformación	Biomasa	69,9	53,4	92,1	1.380.000
Transporte	Plug-in	100,0	57,3	130,7	87.193
Transformación	CCS	104,8	90,6	123,4	1.760.000
Transformación	Solar CSP	150,7	120,6	188,7	890.000
Transformación	Solar PV	167,3	142,5	197,3	4.800.000
Transformación	Mareomotriz	233,2	202,1	274,0	200.000

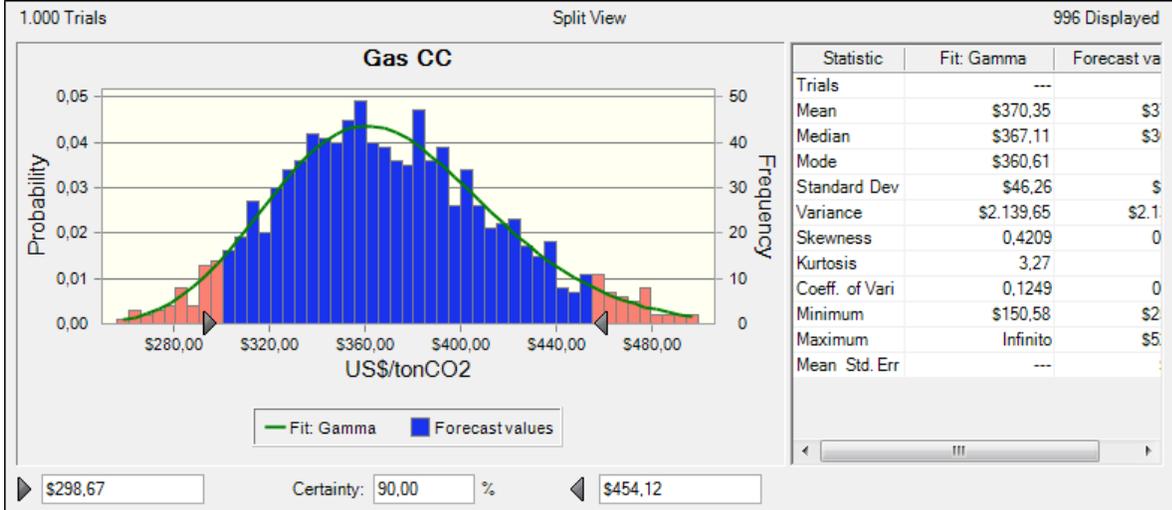
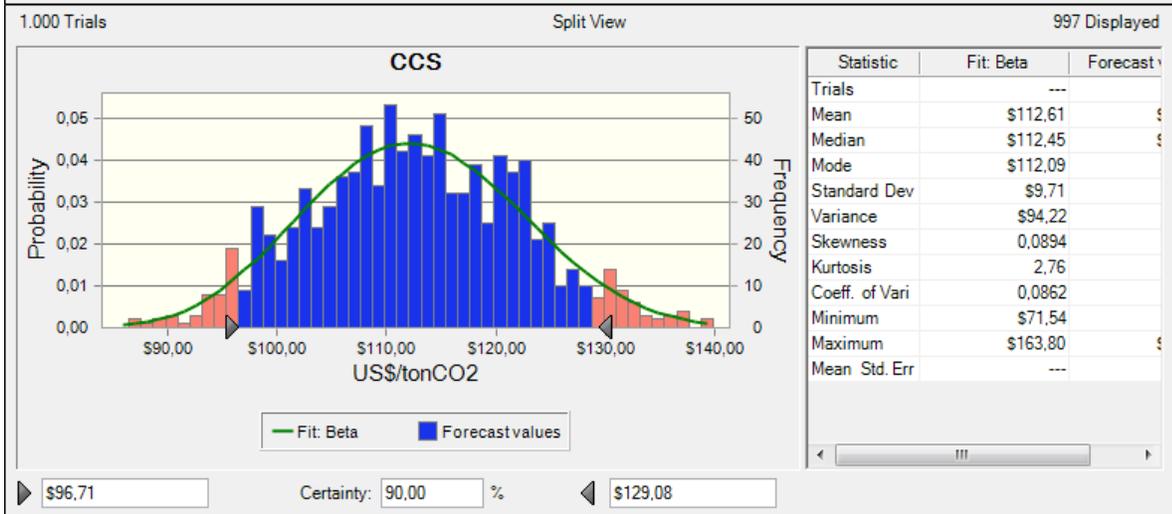
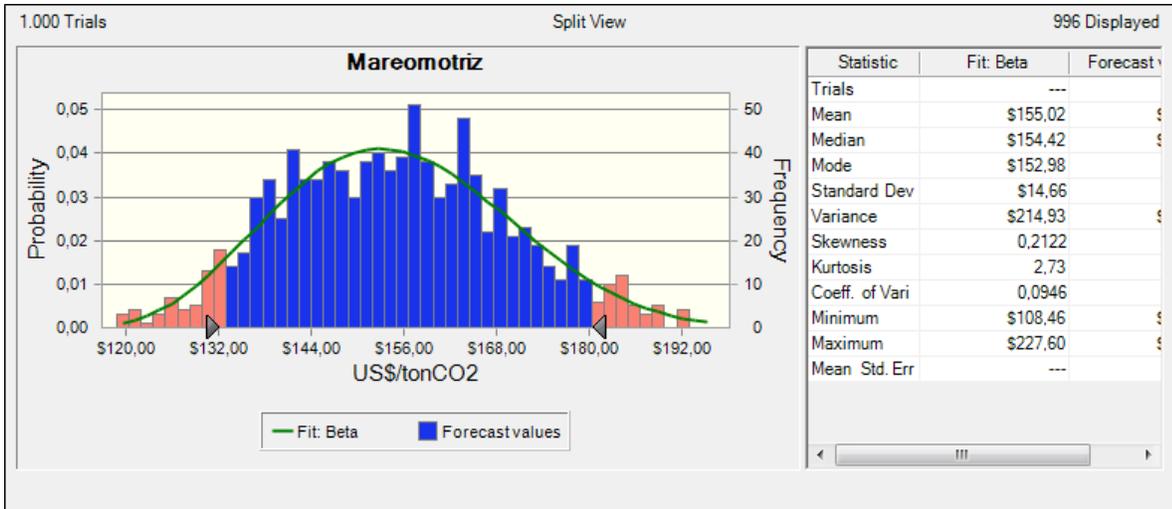
A.15. RESULTADOS ESTOCÁSTICOS DE LAS VARIABLES

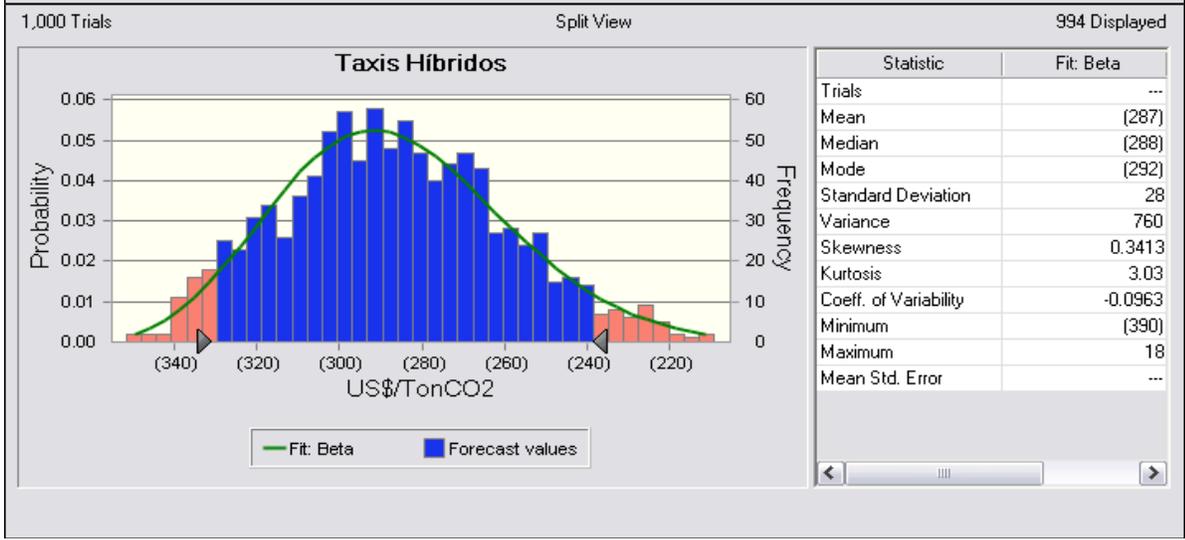
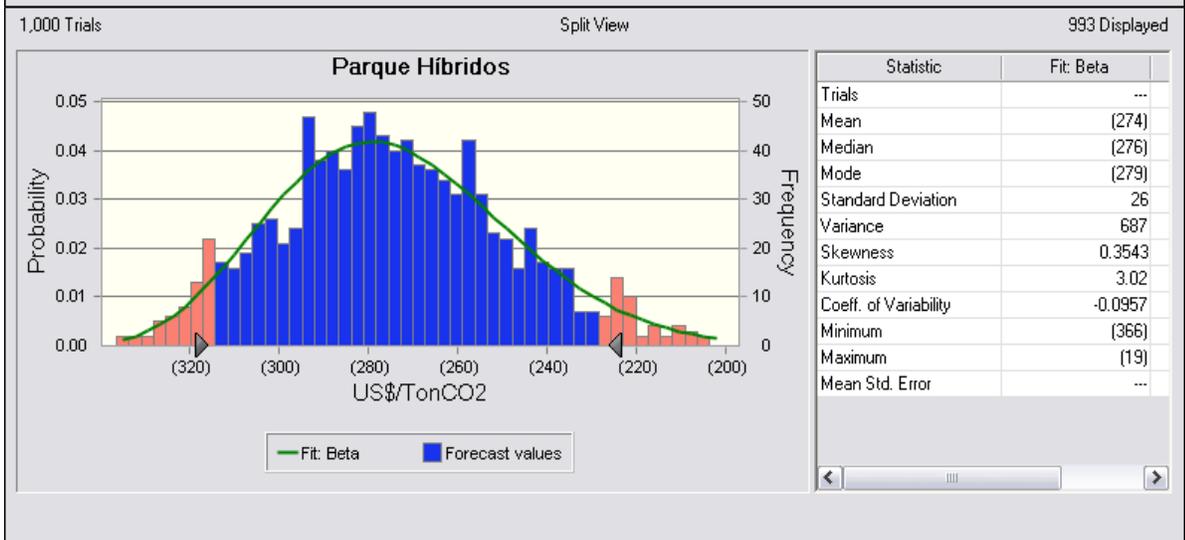
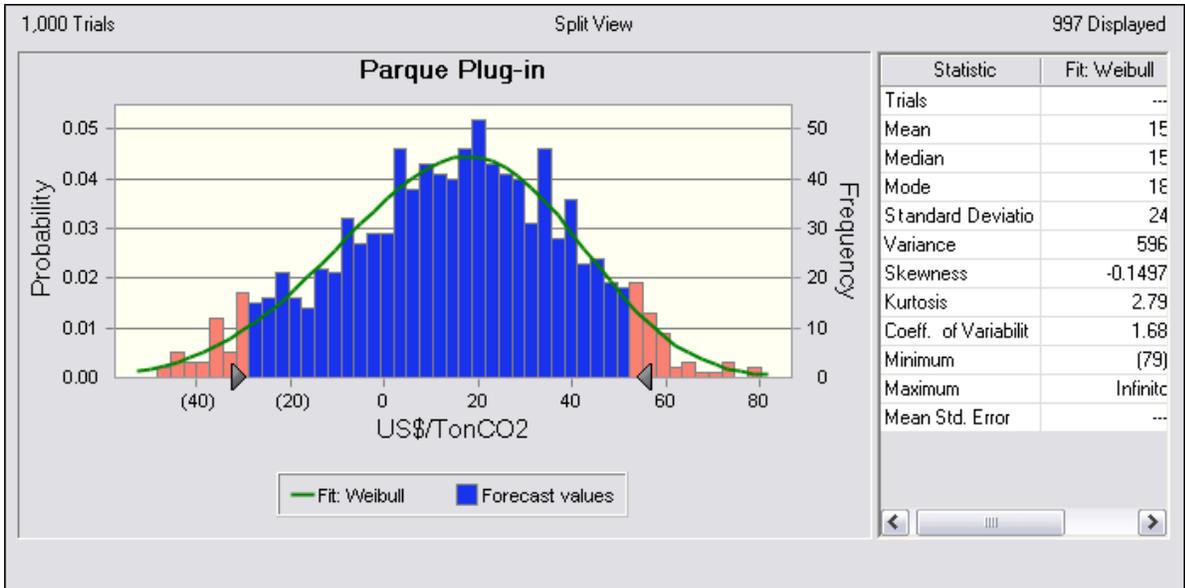
Las siguientes figuras presentan las salidas para las variables del software CrystallBall considerando una tasa de descuento de 6%. Además las figuras muestran la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los resultados obtenidos

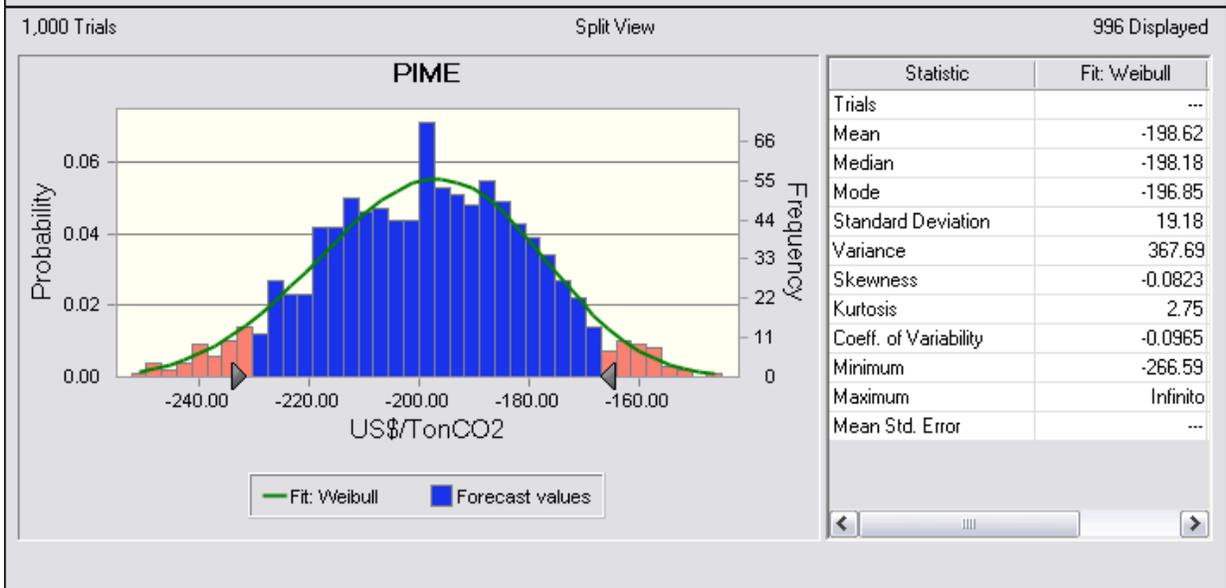
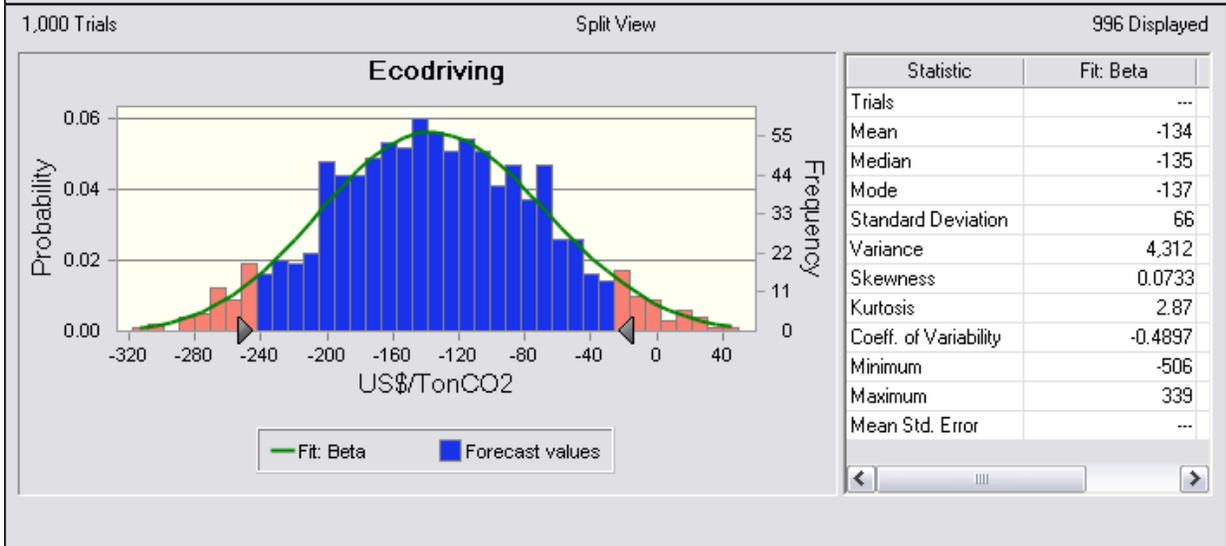
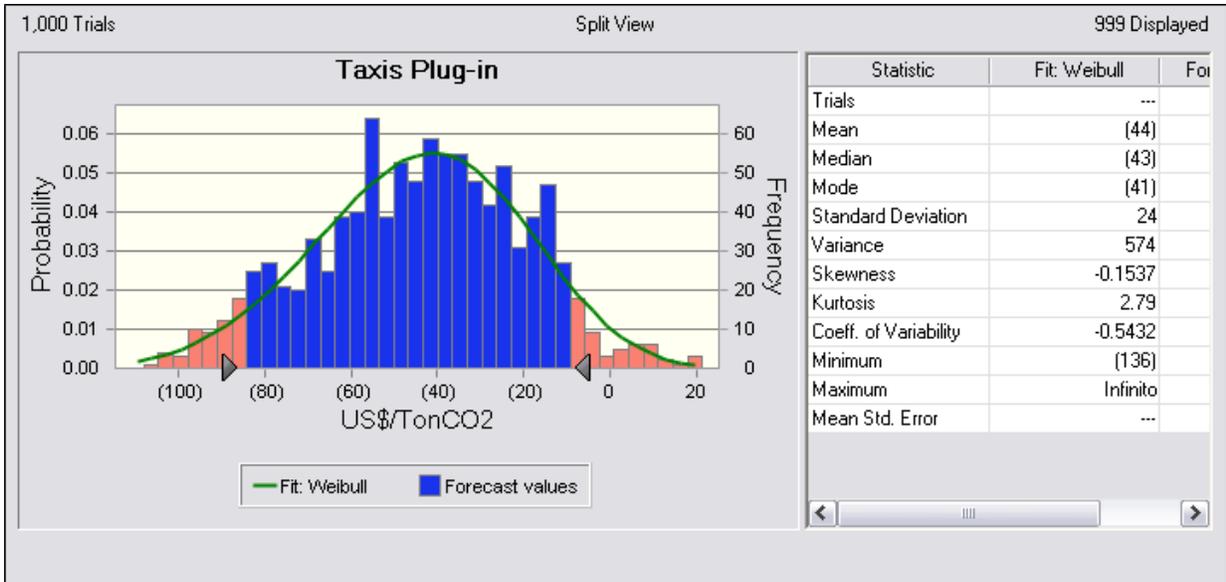


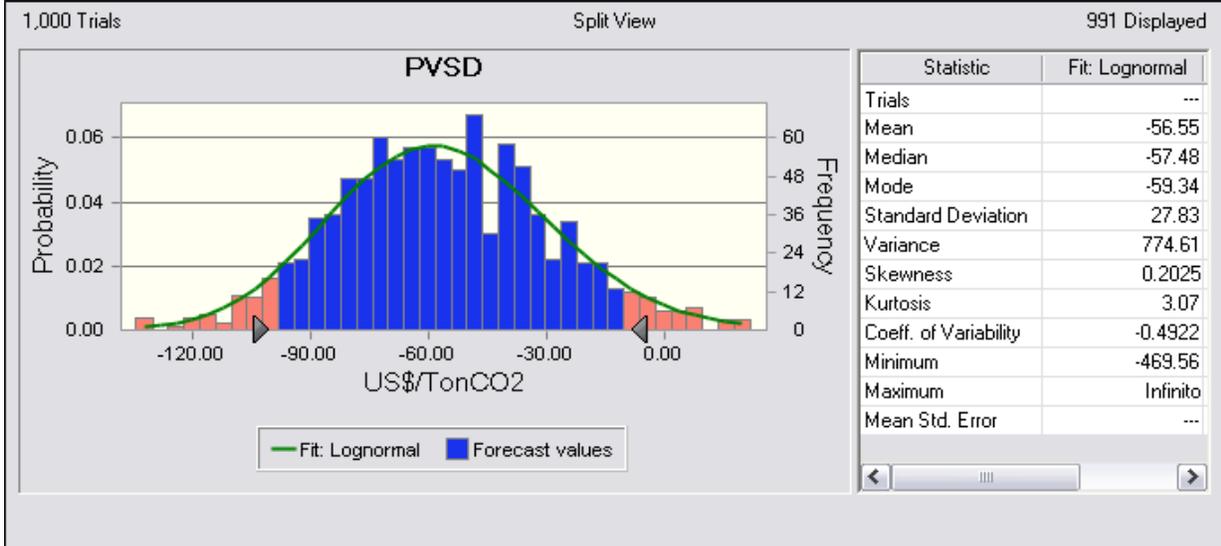
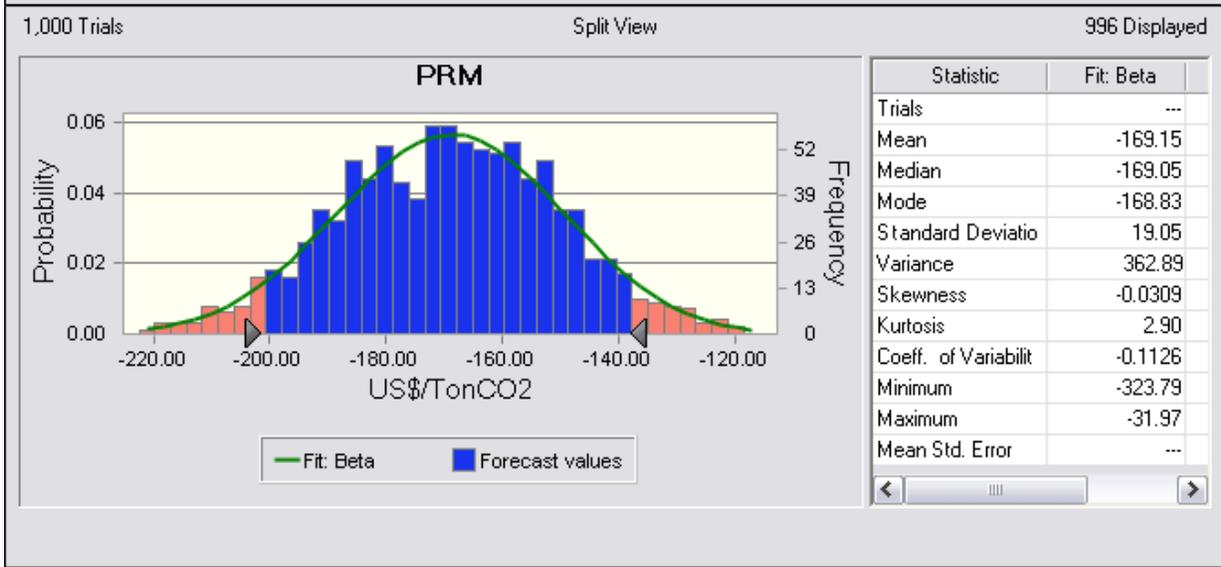
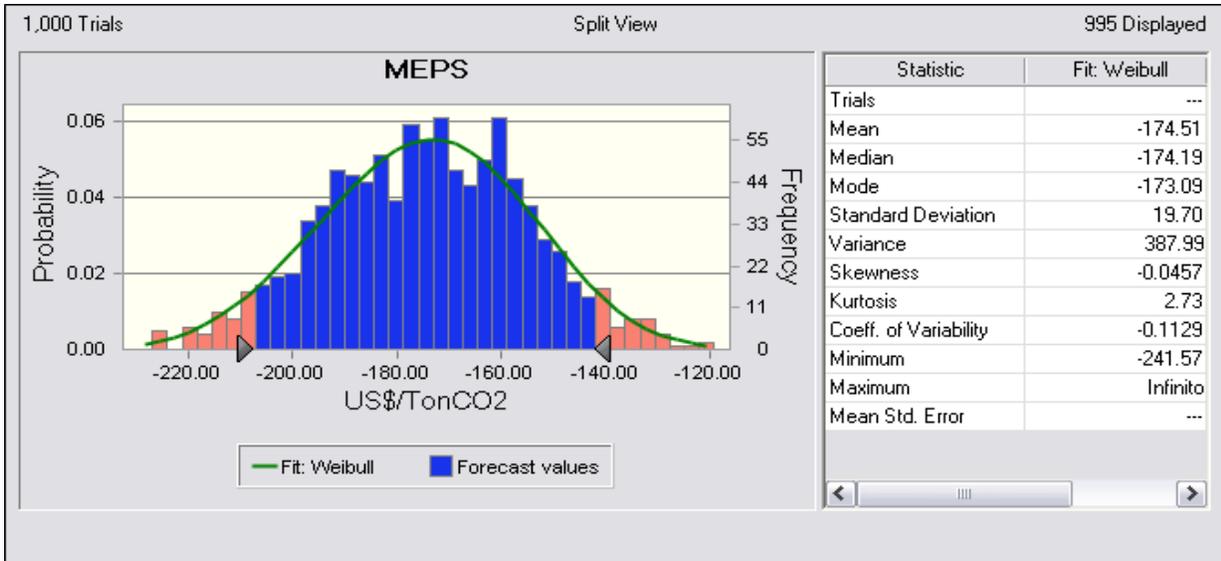


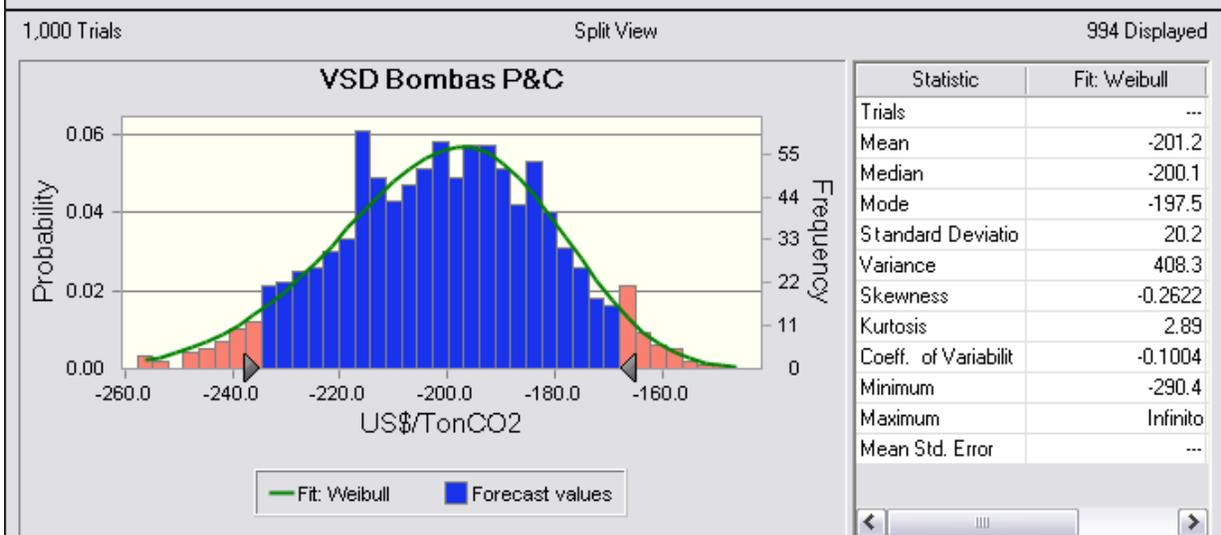
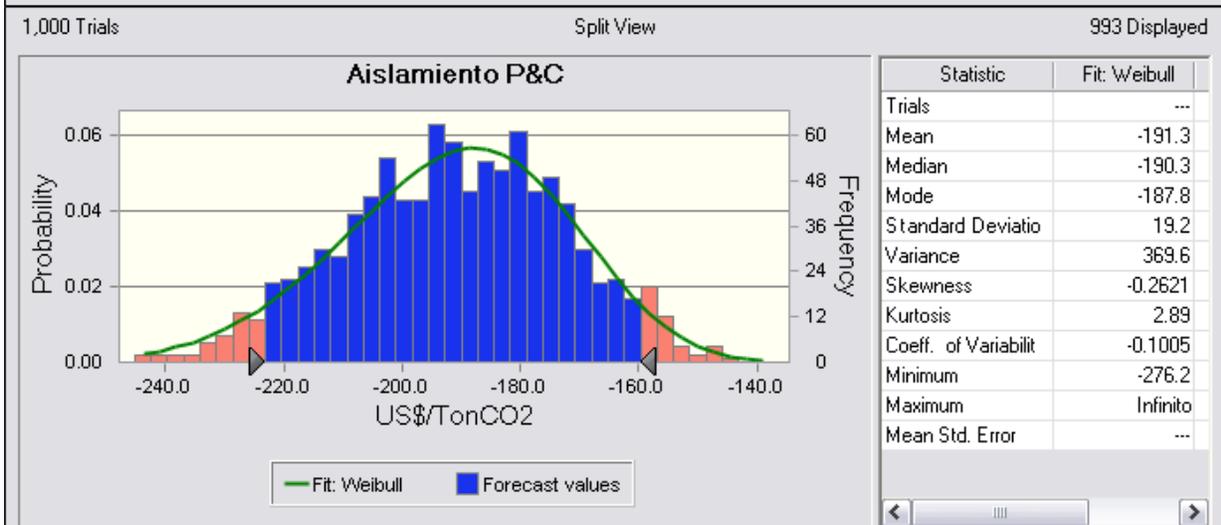
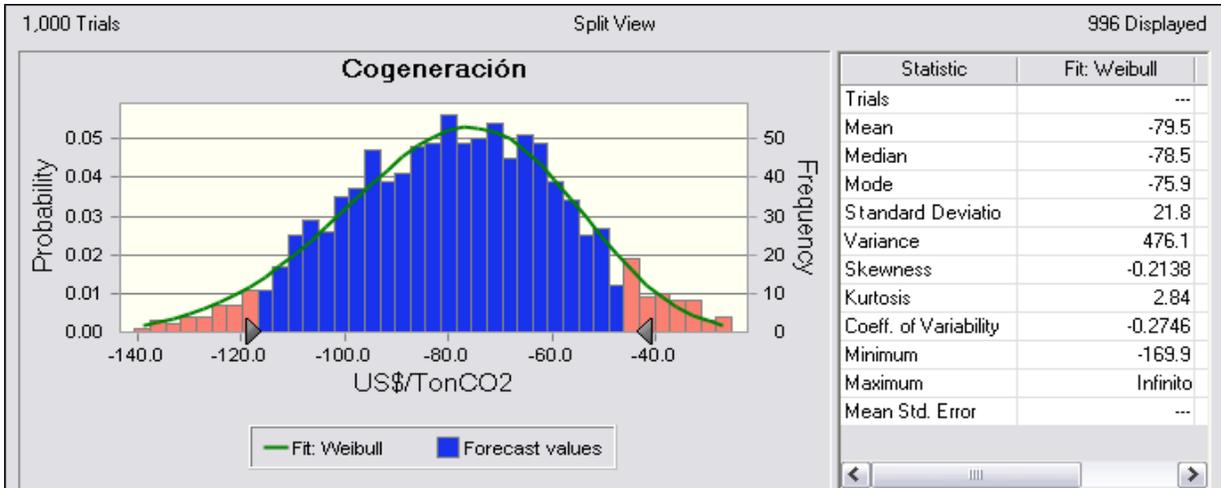












A.16. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES

Sensibilidad: Biomasa

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
* Precio biomasa 2035 US\$/MWh	36%	0.70
* Precio biomasa 2020 US\$/MWh	33%	0.68
Biomasa eficiencia %	-8%	-0.34
Biomasa TC	-7%	-0.32
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-4%	-0.23
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-3%	-0.21
FE Carbón	-2%	-0.16
Other	6%	

Sensibilidad: Eólica

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Inversión Eólica	55%	0.74
Eólica FP %	-22%	-0.47
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-4%	-0.21
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-4%	-0.20
Eólica TC	-3%	-0.18
Carbón TC	2%	0.14
Inversión Carbón	-1%	-0.11
Carbón eficiencia %	1%	0.11
FE Carbón	-1%	-0.10
Other	6%	

Sensibilidad: Gas CC

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
FE Gas CC	37%	0.62
FE Carbón	-23%	-0.48
GAS CC TC	-13%	-0.36
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	10%	0.32
Gas CC eficiencia %	-4%	-0.21
* Precio petróleo 2035 US\$/Barril	4%	0.20
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-1%	-0.11
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-1%	-0.10
Inversión Carbón	-1%	-0.09
Other	6%	

Sensibilidad: Mareomotriz

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Inversión Mareomotriz	54%	0.72
Mareomotriz FP %	-21%	-0.46
FE Carbón	-9%	-0.29
Mareomotriz TC	-7%	-0.25
Mareomotriz O&M	2%	0.12
Inversión Carbón	-1%	-0.10
Carbón TC	1%	0.09
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-1%	-0.07
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-1%	-0.07
Other	5%	

Sensibilidad: Nuclear

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Nuclear TC	-36%	-0.60
Inversión Nuclear	21%	0.46
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-9%	-0.29
Nuclear O&M	6%	0.25
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-6%	-0.24
Precio Uranio US\$/MWh	5%	0.23
Inversión Carbón	-3%	-0.18
Carbón eficiencia %	3%	0.18
Carbón TC	3%	0.16
Other	8%	

Sensibilidad: Solar PV

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Inversión Solar PV	42%	0.69
Solar PV FP %	-23%	-0.51
Solar PV O&M	7%	0.27
FE Carbón	-5%	-0.23
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-4%	-0.21
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-4%	-0.21
Solar PV TC	-3%	-0.18
Inversión Carbón	-2%	-0.17
Carbón O&M	-1%	-0.12
Other	10%	

Sensibilidad: CCS

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
CCS O&M	61%	0.82
FE Carbón	-16%	-0.42
CCS TC	-12%	-0.37
Inversión CCS*	1%	0.11
Other	9%	

Sensibilidad: Embalse

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-22%	-0.50
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-21%	-0.49
Embalse FP %	-20%	-0.48
Inversión Carbón	-7%	-0.29
Carbón TC	6%	0.26
Carbón eficiencia %	4%	0.21
Carbón O&M	-4%	-0.20
Embalse TC	-4%	-0.20
Embalse O&M	3%	0.18
FE Carbón	3%	0.18
Other	6%	

Sensibilidad: Geotérmica

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Inversión Geotérmica	45%	0.72
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	14%	-0.41
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	13%	-0.38
Geotérmica O&M	7%	0.29
Carbón TC	5%	0.24
Inversión Carbón	4%	-0.22
Carbón O&M	3%	-0.17
Carbón eficiencia %	2%	0.17
Geotérmica TC	1%	-0.12
Other	5%	

Sensibilidad: Mini Hidráulica

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-26%	-0.56
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-24%	-0.54
MiniHidro FP%	-13%	-0.40

Inversión Carbón	-8%	-0.31
MiniHidro TC	-7%	-0.30
Carbón TC	7%	0.29
Carbón O&M	-5%	-0.26
Carbón eficiencia %	3%	0.18
MiniHidro O&M	1%	0.12
Other	5%	

Sensibilidad: Solar CSP

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Solar CSP FP %	-42%	-0.67
Solar CSP	29%	0.55
FE Carbón	-6%	-0.24
Solar CSP O&M	4%	0.21
Solar CSP TC	-4%	-0.20
* Precio carbón 2035 US\$/Ton	-3%	-0.18
* Precio carbón 2020 US\$/Ton	-3%	-0.18
Inversión Carbón	-2%	-0.13
Carbón TC	1%	0.12
Other	7%	

Sensibilidad: Parque Plug-in

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Rendimiento convencional KM/lt	63%	0,83
Costo adicional Plug-in 2020 US\$	12%	0,37
Rendimiento Híbrido KM/lt	6%	-0,25
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	4%	-0,20
* Precio petróleo 2035 US\$/Barril	2%	-0,16
Other	13%	

Sensibilidad: Taxis Plug-in

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Rendimiento convencional KM/lt	61%	0,83
Costo adicional Plug-in 2020 US\$	12%	0,37
Rendimiento Híbrido KM/lt	5%	-0,24
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	4%	-0,21
Nivel de Actividad Taxis KM/año	4%	-0,21
Other	13%	

Sensibilidad: Parque Híbridos

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Rendimiento convencional KM/lt	46%	0,68
Rendimiento Híbrido KM/lt	20%	-0,45
Costo adicional Híbrido 2020 US\$	14%	0,37
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	6%	-0,25
* Precio petróleo 2035 US\$/Barril	4%	-0,20
Other	10%	

Sensibilidad: Taxis Híbridos

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Rendimiento convencional KM/lt	51%	0,72
Rendimiento Híbrido KM/lt	22%	-0,47
Costo adicional Híbrido 2020 US\$	8%	0,29
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	5%	-0,23
* Precio petróleo 2035 US\$/Barril	3%	-0,19
Other	10%	

Sensibilidad: Ecodriving

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Reducción consumo por capacitación %	26%	-0,55
* Precio petróleo 2020 US\$/Barril	25%	-0,54
Rendimiento Camiones KM/lt	23%	0,51
* Precio petróleo 2035 US\$/Barril	9%	-0,33
Nivel de Actividad Camiones KM/año	7%	-0,28
Other	10%	

Sensibilidad: PIME

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SING 2020 \$/KWh	87%	-0,84
Dispersión eficiencia 5 %	2%	-0,12
Dispersión precio motor %	1%	0,09
Dispersión eficiencia 20 -50 %	1%	-0,07
Tiempo uso Hrs Cobre	1%	-0,07
Other	9%	

Sensibilidad: PRM

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SING 2020 \$/KWh	97%	-0,89
Dispersión eficiencia 5 %	1%	-0,10

Dispersión precio motor %	1%	0,08
Dispersión eficiencia 20 -50 %	0%	-0,06
Tiempo uso Hrs Cobre	0%	-0,06
Other	0%	

Sensibilidad: MEPS

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SING 2020 \$/KWh	94%	-0,86
Dispersión precio motor %	2%	0,12
Tiempo uso Hrs Cobre	1%	-0,09
Dispersión eficiencia 20 -50 %	1%	-0,09
Dispersión eficiencia 5 %	1%	-0,08
Other	1%	

Sensibilidad: PVSD

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SING 2020 \$/KWh	45%	-0,62
Dispersión precio motor %	15%	0,36
Dispersión eficiencia 5 %	13%	-0,34
Dispersión eficiencia 20 -50 %	10%	-0,29
Tiempo uso Hrs Cobre	9%	-0,28
Dispersión eficiencia 5 - 20 %	7%	-0,24
Dispersión eficiencia 50 - 100 %	0%	-0,04
Penetración recambio %	0%	0,04
Other	0%	

Sensibilidad: Cogeneración

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SIC 2020 \$/KWh	81%	-0,83
* Precio biomasa 2020 US\$/MWh	10%	0,29
* Precio biomasa 2035 US\$/MWh	8%	0,26
O&M US\$/KWh	0%	0,06
Inversión MMUS\$/MW	0%	0,01
Tiempo cogeneración (hrs/año)	0%	0,01

Sensibilidad: Aislamiento P&C

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SIC 2020 \$/KWh	99%	-0,88
Ahorro aislamiento	0%	-0,04

**Sensibilidad: VSD Bombas
P&C**

Variable	Contribución a la varianza	Ranking de correlación
Electricidad SIC 2020 \$/KWh	93%	-0,87
Ahorro variadores	2%	-0,12
Costo variadores	0%	0,05
Other	5%	

A.17. REGRESIONES DE PRECIOS

1) Regresión del Precio del Diesel

Se corre el siguiente modelo para estimar el precio del diesel (P_t) en función del WTI (West Texas Intermediate) y de un rezado.

$$p_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot WTI_t + \beta_2 p_{t-1}$$

Los resultados se muestran en el cuadro siguiente:

Dependent Variable: DIESEL				
Method: Least Squares				
Date: 01/26/12 Time: 14:40				
Sample(adjusted): 2000:02 2011:04				
Included observations: 135 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.062349	0.014037	4.441766	0.0000
WTI	0.000701	6.04E-05	11.59223	0.0000
DIESEL(-1)	0.564872	0.038288	14.75321	0.0000
R-squared	0.962249	Mean dependent var	0.786322	
Adjusted R-squared	0.961677	S.D. dependent var	0.246867	
S.E. of regression	0.048327	Akaike info criterion	-3.199676	
Sum squared resid	0.308287	Schwarz criterion	-3.135114	
Log likelihood	218.9781	F-statistic	1682.316	
Durbin-Watson stat	2.217612	Prob(F-statistic)	0.000000	

2) Regresión Precios del Gas Natural

Se corre el siguiente modelo para estimar el precio del gas natural (P_t) en función de Intermediate) y de un rezado del WTI y del precio del Gas Natural.

$$p_t = \beta_1 WTI_t + \beta_2 \cdot WTI_{t-1} + \beta_3 p_{t-1}$$

Los resultados se muestran en el cuadro siguiente:

Method: Least Squares				
Date: 01/26/12 Time: 14:42				
Sample(adjusted): 2000:02 2011:04				
Included observations: 135 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
WTI	0.000895	9.78E-05	9.148117	0.0000
WTI(-1)	-0.000722	0.000108	-6.705996	0.0000
GN(-1)	0.928882	0.029716	31.25910	0.0000
R-squared	0.973789	Mean dependent var	0.942875	
Adjusted R-squared	0.973392	S.D. dependent var	0.319577	

S.E. of regression	0.052129	Akaike info criterion	-3.048219
Sum squared resid	0.358701	Schwarz criterion	-2.983657
Log likelihood	208.7548	Durbin-Watson stat	2.168208

A.18. SOFTWARES DE MODELACIÓN

Una serie de paquetes de software están disponibles para incorporar incertidumbre en los análisis. Los más ampliamente reconocidos y utilizados son los paquetes comerciales @Risk⁴⁰ y Crystal Ball⁴¹. Ambos son paquetes diseñados para operar totalmente integrados en MS-Excel, con su propia barra de herramientas y menús. Estos paquetes se pueden utilizar con un bajo nivel de conocimiento sobre el muestreo y las técnicas de cálculo en sí, lo que facilita el análisis de Incertidumbre. Otro reconocido paquete comercial es Analytica, que es un entorno de modelación cuantitativo con funciones de algoritmos que integran y modelan la incertidumbre.

Si su modelo no se basa en Excel se puede utilizar el paquete de SimLab, que está disponible gratuitamente⁴². SimLab también puede interactuar con Excel, pero esto requiere algunos conocimientos de programación.

Además la mayoría de estos softwares ofrecen la posibilidad de determinar la contribución relativa de la incertidumbre de cada parámetro a la incertidumbre en la salida del modelo, por ejemplo, a través de gráficos de sensibilidad. Ellos pueden ser utilizados para un análisis sofisticado de tendencias en presencia de incertidumbre. A continuación se describen los principales softwares identificados actualmente en el mercado.

Crystal Ball

Crystal Ball es un conjunto de aplicaciones desarrolladas por Oracle, de forma comercial, y basadas en la aplicación de modelos predictivos, de simulación y optimización, que operan en el entorno de MS Excel con menús y funciones propias.

El software permite realizar simulación con el método de Montecarlo o bajo el método Latin Hypercube. Es posible realizar predicciones de series de tiempo, además de incorporar herramientas de análisis y diseño de distribuciones de probabilidad, sensibilidad de resultados a las variables, matrices de correlación, tablas de decisión y optimización.

El software permite un análisis con una amplia gama de resultados estadísticos y gráficos, junto a la exportación de casos y detalles de cada iteración, que permite ampliar el análisis al usuario. Esto complementa la característica más destacada de Crystal ball, que es su simpleza para diseñar modelos, y su gran capacidad de recursos (Guías, modelos, ejemplos). [Sujiyama S. 2007]

Crystal Ball se utiliza e multiples sectores industriales y de servicios, entre ellos empresas petroquímicas, farmacéuticas, producción, aeroespacial, logística, transporte, sociedades de inversión y gestión de carteras y empresas de marketing. Además se ha utilizado en metodologías de mejora de procesos como Seis Sigma.

⁴⁰ <http://www.palisade.com>

⁴¹ <http://www.oracle.com/us/products/applications/crystalball>

⁴² <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>

Destaca el estudio “The Fifth Northwest Electric Power and Conservation Plan” del Consejo para la Energía y Conservación del Noroeste, (USA 2005)⁴³, donde se modelan incertidumbres relativas a la planificación energética y ambiental. Otra interesante aplicación es la herramienta RAM que permite modelar y evaluar riesgo asociada a contaminación de las aguas⁴⁴.

@Risk

@Risk es una herramienta desarrollada por Palisade, que se acopla a MS Excel incorporando una serie de funciones nuevas, cada una de las cuales permite especificar un tipo de distribución diferente para los valores de una celda. Las funciones de distribución se pueden añadir a tantas celdas y fórmulas como se desee en una hoja de cálculo y pueden incluir argumentos que hacen referencia a otras celdas o expresiones, lo cual permite proporcionar sofisticadas especificaciones de incertidumbre. Para ayudarle a asignar distribuciones a los valores inciertos, @RISK cuenta con una ventana gráfica en la que puede ver las distribuciones y añadirlas a las fórmulas.

El software usa las técnicas de simulación de Monte Carlo y Latin Hipercube y se pueden generar distribuciones de posibles resultados de cualquier celda o rango de celdas del modelo de la hoja de cálculo.

El software permite ver una amplia gama de resultados estadísticos y gráficos, junto a capacidades de exportación y flexibilidad de operación, lo que lo hacen una herramienta simple, pero completa y amigable para modelar, simular y presentar los efectos de la incertidumbre.

@Risk puede interactuar con otras herramientas de Palisade para complementar el análisis, siempre en un entorno Excel, con análisis de sensibilidad (TopRank), árboles de decisión (PresicionTree), cálculo de distribuciones (BestFit) y definición de variables de optimización (RISKOptimizer).

El software ha sido utilizado para análisis de opciones de mitigación bajo incertidumbre en el sector energía⁴⁵ o por la Agencia Internacional de Energía (IEA) como en el estudio “Price caps and price floors in climate policy” de Diciembre del año 2008 donde se estudian los efectos económicos y medioambientales de mediano plazo de utilizar políticas de precios máximos y mínimos sobre los derechos de emisión de CO2.

Las aplicaciones existentes de @Risk incluyen finanzas e instrumentos financieros, análisis de decisiones y análisis de riesgos en salud, energía, medio ambiente, transporte, aeroespacial, gobierno y defensa entre otras.

⁴³ <http://www.nwcouncil.org/energy/powerplan/5/>

⁴⁴ <http://www.esinternational.com/RAM-Water-Risk-Assessment-Software>

⁴⁵ JANSEN J.C. 2006, Social cost-benefit analysis of climate change mitigation option in a European context.

Risk Solver⁴⁶

La más reciente de las aplicaciones para simulación bajo incertidumbre es Risk Solver, un software comercial de la compañía Frontline Systems que opera como una aplicación “Add-in” para MS Excel, diseñada para resolver problemas de optimización lineales univariados, multivariados, y no lineales. En una expansión de la línea de productos se incorporó el análisis de incertidumbre, dando la posibilidad de realizar simulación de Monte Carlo a través de métodos complejos como Latin Hypercube o números de Sobol⁴⁷, incluyendo análisis de sensibilidad, ajustes de distribución, y correlación entre variables.

Esta aplicación se ha incorporado fuertemente en la competencia de softwares de simulación de incertidumbre en MS Excel, destacando principalmente su velocidad y sus funcionalidades avanzadas de optimización.

Analytica⁴⁸

Analytica es un software comercial desarrollado por la compañía Lumina y se presenta como un ambiente cuantitativo de apoyo a la toma de decisiones, que ayuda a la visualización de problemas de modelamiento con claridad y mucho más allá de lo que es posible en una hoja de cálculo.

Las “matrices inteligentes” Analytica permiten crear y gestionar tablas multidimensionales de forma simple siendo muy ventajoso por sobre el uso de hojas de cálculo. La construcción a través Analytica, emplea la abstracción de arreglos que permite al modelador operar en todo un punto de vista matemático sin escribir formulas que referencien a cada elemento de una tabla, y sin la necesidad de escribir rutinas iterativas de procesamiento, a menos que sean necesarias referencias específicas a celdas individuales. El resultado es que el tiempo para escribir el código se reduce significativamente en comparación a modelos del estilo “desarrollador”⁴⁹, junto a errores de copia y el tiempo de depuración.

Desde sus inicios, Analytica fue diseñado para analizar el riesgo y la incertidumbre, a diferencia de las hojas de cálculo que requieren complementos especiales. La simulación de Monte Carlo y Latin HyperCube son características totalmente integradas en Analytica, lo que hace sencillo incorporar el tratamiento de la incertidumbre, de forma mucho más rápida que las hojas de cálculo estándar. Los diagramas de influencia de Analytica permiten especificar las variables inciertas con sólo seleccionar un nodo oval para describir una variable aleatoria. A continuación se puede elegir entre una variado set de distribuciones de probabilidad, simple o multivariada, presentando una amplia gama de opciones de visualización de resultados como funciones de densidad, distribuciones acumuladas, bandas de probabilidad, estadística básica, o incluso los valores aleatorios conseguidos en la muestra.

⁴⁶ <http://www.solver.com/platform/risk-solver-pro.htm>

⁴⁷ Método de Generación de números pseudo-aleatorios de baja discrepancia matemática.

⁴⁸ <http://www.lumina.com>

⁴⁹ Refiérase a modelos que requieren un desarrollo a través de códigos de programación/diseño como Matlab, y en el caso particular de este análisis comparativo, a SimLab.

Esto permite a los modeladores evaluar riesgo e incertidumbre rápidamente, estudiando la sensibilidad y relevancia de las variables.

Las aplicaciones existentes de Analytica incluyen planificación estratégica, gestión de I + D, análisis de decisiones y análisis de riesgos en finanzas, salud, energía, medio ambiente, aeroespacial y telecomunicaciones.

Destaca a nivel país su utilización en el paper de análisis de riesgo de sustancias tóxicas en la minería “The Use of Probabilistic Analysis to Improve Decision-Making in Environmental Regulation in a Developing Context: The Case of Arsenic Regulation in Chile” [O’Ryan y Díaz 2008], y el estudio “Preliminary Estimation Of The Potential Ancillary Benefits For Chile” [Cifuentes et al. 2000]

Es posible revisar una serie de casos de aplicación de Analytica en <http://www.lumina.com/case-studies/>. Entre ellas destaca la utilización en la creación de ICAM (Integrated Climate Assessment Model) un modelo integrado de análisis climático que ayuda a entender y explorar las interacciones las actividades humanas, la atmosfera y los ecosistemas naturales, y que considera las incertidumbres ligadas a las variables climaticas.

SimulAr⁵⁰

SimulAr es un software gratuito desarrollado en Argentina, que requiere el compromiso de compartir los análisis desarrollados por el usuario para la autorización de su uso. SimulAr permite realizar simulación de Monte Carlo y está diseñado principalmente para el análisis y evaluación de negocios y toma de decisiones que involucran riesgo. Opera como una “Add-in” de MS Excel incorporando un menú propio y una serie de funciones que permiten el análisis de simulación de Montecarlo y sensibilidad.

El software permite realizar simulación de Monte Carlo, análisis de sensibilidad, asignación de correlaciones entre variables, y definir variables de optimización. No incluye el algoritmo de Latin Hypercube.

SimLab

SimLab es un medioambiente desarrolla como APIs sin interfaz gráfica que necesita un ambiente “hosting” para su ejecución, este puede ser Matlab, Fortran, o C/C++, por lo que se requiere conocimiento de estas aplicaciones para utilizar las características de SimLab. El software es capaz de desarrollar análisis de incertidumbre y sensibilidad usando distintas técnicas matemáticas como simulación de Monte Carlo, Latin Hypercube, análisis de sensibilidad, método de Sobol, entre otros.

Este software fue utilizado para análisis de incertidumbre en la investigación “Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable rural en Chile”⁵¹

⁵⁰ <http://www.simularsoft.com.ar>

⁵¹ http://www.scielo.org/scielo.php?pid=S1020-49892006001100004&script=sci_arttext

Manejo de las aplicaciones

Los paquetes que operan dentro de MS Excel, tales como Crystal Ball, @Risk o Risk Solver son muy fáciles de aprender. En general resultan intuitivos, producto de la cercanía que pueda tener el usuario hacia MS Excel, y permiten generar modelos de simulación de forma sencilla y rápida.

Por otra parte Analytica, como software puro de modelación, permite el desarrollo de modelos más complejos, flexibles y dinámicos, con una velocidad de respuesta superior a aquellas aplicaciones que operan como "Add-in" de MS Excel. Sin embargo los esfuerzos requeridos para la construcción de los modelos de simulación son muy superiores a aquellos que operan en Excel.

Por su parte SimLab requiere un conocimiento de programación superior, y el conocimiento de otras herramientas de carácter técnico, que hacen más complejo el diseño. Además una clara deficiencia versus las otras herramientas mencionadas es la incapacidad de entregar resultados sencillos de transferir a las decisiones. Esto lo perfila como una herramienta de transición para la utilización de otras aplicaciones.

Dado que el problema que se pretende resolver en este estudio no presenta una mayor complejidad en cuanto su dimensión y tiempos de procesamiento, se requiere una herramienta que pueda satisfacer de forma sencilla la ejecución de la simulación, pero que incorpore herramientas de análisis de sensibilidad, y que a la vez presente un set de resultados gráficos flexible, amigable e intuitivo. Bajo esta premisa, la utilización de una aplicación dentro del entorno MS Excel resulta adecuada.

Selección

De los cuatro softwares que operan en MS Excel (Crystal Ball, @Risk, Risk Solver y SimulAr) se excluye del análisis final a SimulAr por no encontrar mayores antecedentes de aplicaciones y aceptación como herramienta confiable de simulación. Si bien los tres softwares restantes que operan en MS Excel presentan características similares para objetivos similares, existen ventajas particulares en ellos se deben mencionar.

Crystal Ball destaca en su sencillez para lograr construir los modelos, junto a una gran variedad de guías, manuales de referencia, múltiples modelos ilustrativos y muchos textos. Además destaca su completitud para desarrollar sub-modelos de simulación de Monte Carlo y optimización.

@RISK tiene el mejor procedimiento para identificar las variables clave que afectan el alcance y la forma de los resultados. Esta es su opción de sensibilidad de regresión. @RISK es un cercano segundo lugar a Crystal Ball en términos de recursos. Están disponibles muchos textos y ejemplos, y sus demos y tutoriales son sencillos y bien diseñados.

Las principales ventajas de Risk Solver son su extraordinaria velocidad de respuesta, y que ofrece las funcionalidades más avanzadas de optimización. Una adicionalidad importante es que Risk Solver permite definir los resultados de una simulación como una distribución de entrada (SIP, Paquete de Información Estocástico) y como un sub-modelo de incertidumbre para su uso en otra simulación. Esto

es un poderoso medio para transferir resultados dentro de una organización manteniendo la consistencia en las componentes claves del análisis.

Considerando el problema original, de incorporar incertidumbre en la evaluación costo-efectiva del costo de opciones de mitigación en el sector energía, los requerimientos dada la dimensión reducida del problema, son básicamente un desarrollo intuitivo y sencillo de la incorporación de la incertidumbre al modelo, y un set de resultados amplio y flexibles, que permita analizar la información en detalle del proceso de simulación.