



Documento de Trabajo No. 06/15  
Junio 2015

**Revisión de Modelos Energéticos**

*por:*

*Karen M. Martínez Torrico  
Javier Aliaga Lordemann*

# **Revisión de Modelos Energéticos**

## **Resumen**

Diferentes episodios de nuestra historia han evidenciado el vínculo existente entre las decisiones de carácter energético, económico y medioambiental, dando origen a la elaboración y aplicación de técnicas de modelaje energético. En la actualidad se cuenta con una amplia gama de modelos energéticos, los cuales abordan asuntos relacionados al campo a partir de diversas ópticas, y utilizando supuestos y técnicas de estimación diferentes. Contando con tan amplio abanico de modelos, la elección del modelo más indicado para su aplicación en un contexto determinado es más que una ciencia, un arte que solo puede ser llevado a cabo teniendo conocimiento sobre las características, atributos y debilidades de las familias de modelos existentes. En este sentido, es que el presente trabajo busca servir como marco referencial para quienes tienen la aspiración de incursionar en el campo energético y desarrollar modelos energéticos.

## **Abstract**

Throughout our history we have demonstrated the relationship between the decisions of energetic character, economy and the environment. For this reason is that they begin to develop and implement energetic modeling techniques as alternative tools for both the development of energy policies, and the evaluation of its effects on the economy itself. At present it has a wide range of energy models, which address issues related to the energy field from various perspectives and using different assumptions and estimation techniques. Armed with such a wide range of models, choosing the most suitable model for application in a given context is more than a science, an art that can only be carried out with knowledge about the features, attributes and weaknesses of model families existing. In this sense, the present work aims to serve as a reference for those who have aspirations to develop energy models framework.

**Clasificación JEL** JELC.01 JEL C.53 JEL C.68 JEL C.61 JEL C.63 JEL D.58 Q.40 JEL Q.48 JEL Q.51

## **Palabras Clave**

Modelo Energético Económico y Medioambiental, modelos Top Down y Bottom Up, modelos híbridos, modelos IAM, escenario energético, estructura jerarquizada, Modelo LEAP, Modelo MERGE, Modelo POLES, Modelo WEM ECO.

## **Acrónimos**

|         |  |
|---------|--|
| ASTRA:  | Assessment of Transport Strategies                                     |
| BAU:    | Business as Usual  |
| BU:     | Bottom-Up  |
| BUENAS: | Bottom-Up Energy Analysis System                                       |
| CES:    | Constant elasticity of substitution                                    |
| CGE:    | Computable General Equilibrium   |
| EFOM:   | Energy Flow Optimisation Model   |
| E3:     | Energético Económico Ambientales                                       |
| GAMS:   | General Algebraic Modeling System                                      |
| IAM:    | Integrated Assessment Models of Climate Change                         |
| IMAGE:  | Integrated Model to Assess the Global Environment                      |
| LEAP:   | Long term energy planing   |
| MAED:   | Model for Analysis of Energuy Demand                                   |
| MARKAL: | Markal Allocation  |
| MERGE:  | Model for Estimating the Regional and Global Effects of Greenhouse Gas |
| MESAP:  | Modular Energy System Analysis and Planning Environment                |
| NIA:    | National Impact Analysis   |
| OCDE:   | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos            |
| OPEP:   | Organización de Países Exportadores de Petróleo                        |
| PAMS:   | Policy Analysis Modelling System                                       |
| POLES:  | Prospective Outlook for the Long-term Energy System                    |
| SAM:    | Matriz de Contabilidad Social  |
| TIME:   | The Integrated MARKAL-EFOM System                                      |
| TD:     | Top Down   |
| UE:     | Unión Europea  |
| VENSIM: | Ventana Systems  |
| WEM:    | World Energy Model   |

## 1. Introducción

A principios del S. XX, la energía pasa de ser considerada únicamente como una propiedad física asociada a transformaciones que ocurren en la naturaleza, a constituirse como el centro de la actividad económica (Tratado de Lisboa, 2007); bien de consumo intermedio y factor de producción determinante para el desempeño económico y la estabilidad social.

Basta con identificar aquellos puntos de inflexión en la evolución del hombre asociados a los descubrimientos y usos de la energía en su beneficio. Hechos que nos llevan a concluir que sin el desarrollo del sector energético, los procesos de industrialización, invención y desarrollo tecnológico no hubiesen tenido lugar.

A pesar de que ya a finales de los años sesenta la energía era reconocida como un recurso imprescindible para el desarrollo del sector productivo, no fue sino hasta la Crisis del Petróleo en 1973 que se comprendió la verdadera magnitud de las implicaciones de este sector sobre la estabilidad económica. Hasta entonces, el diseño de las construcciones, aparatos y medios de transporte eran altamente consumistas de energía, lo que revela el hecho de que la naturaleza escasa de la energía era ignorada.

Los *efectos transitorios*<sup>1</sup> y *efectos permanentes*<sup>2</sup> que se desencadenaron a raíz de este suceso histórico, evidenciaron la interdependencia de los sistemas productivos y la estabilidad social con el sector energético, motivando así el desarrollo de técnicas de modelaje que hasta entonces habían sido solo de interés de *una excéntrica minoría* (Spangar, 1996): los modelos energéticos.

El alcance y enfoque de los primeros modelos giraron en torno a las relaciones económico-energéticas. Sin embargo, fue durante la década de los noventa cuando se condujo la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático<sup>3</sup> y se adoptaron una serie de medidas e instrumentos como el protocolo de Kyoto o la Directiva 2003/87/CE para hacer frente al calentamiento global, que surgió el interés de estudiar las relaciones energético-ambientales. Al ser evidente que cualquier cambio en los sectores económico, energético o ambiental tiene repercusiones sobre los demás (Iranzo J., 2006<sup>4</sup>), se introdujeron las relaciones medioambientales en los modelos energéticos, dando origen a los modelos integrales Energético Económico Ambientales, también conocidos como E3, objeto de estudio de este documento.

El presente trabajo tiene el objetivo de servir como un marco introductorio al modelaje energético, motivo por el cual se estructuró el mismo con la finalidad de facilitar la comprensión del tema. A continuación de esta sección introductoria, se desarrolla una breve reseña de los modelos E3. En la Sección dos se presentan las características compartidos por los modelos energéticos, que servirán para comprender el alcance de estos. La Sección tres, tiene el objetivo de permitir al lector comprender los principales atributos, ventajas,

---

<sup>1</sup> Se entiende como efectos transitorios a los síntomas vividos por los países no pertenecientes a la Organización de Países Productores de Petróleo durante la década de los setenta que comprendieron, entre otros: cortes de energía eléctrica, interrupción de los sistemas de producción, aumento del desempleo y malestar social.

<sup>2</sup> Los cambios del comportamiento de los agentes económicos constituyen la principal característica de los efectos permanentes de la crisis, que significó la búsqueda de nuevas formas alternativas de energía y tecnologías más eficientes para los sectores productivos de la economía, y la modificación de patrones de consumo para los hogares.

<sup>3</sup> En esta Convención celebrada en 1992, los países signatarios llegaron a una serie de compromisos para lograr “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”.

<sup>4</sup> Iranzo, Juan E. (2006), Protocolo de Kyoto: Balance y Efectos en el Sector Energético, Nueva Revista de Cultura, Política y Arte.

debilidades y mecanismos que son utilizados por los modelos a partir de su clasificación. La Sección cuarto esta destinada a describir con mayor claridad el funcionamiento de algunos de los modelos energéticos más importantes. Finalmente en el sector de Anexos se encuentra un glosario sobre los conceptos utilizados en el sector energético, que se recomienda revisar antes de continuar con la lectura a quienes están incursionando por primera vez en el tema, las principales diferencias entre los modelos Top-Down y Bottom-Up y la breve descripción de otros modelos comunes en la literatura de la Economía Energética.

## **1.1 Evolución de los Modelos Económicos Energéticos Ambientales E3**

En términos generales, el modelaje puede ser definido como una técnica diseñada para comprender, explicar y proyectar a futuro la trayectoria de complejas relaciones económico-sociales, facilitando de esta manera la búsqueda y el análisis de medidas de acción en tiempo presente. En el campo energético, esta herramienta es utilizada para resolver cuestiones relacionadas a la sostenibilidad económica y también medioambiental, como ser: el efecto del agotamiento de los recursos energéticos fósiles y la evolución de las tecnologías energéticas sobre el cambio climático; los efectos medioambientales a largo plazo de los patrones actuales de producción y consumo de energía y el impacto de políticas energéticas y ambientales sobre el crecimiento económico. Modelos altamente complejos que son el producto de la integración de instrumentos de disciplinas muy diferentes, tales como investigación operativa, econometría, teorías de crecimiento económico, de equilibrio general y de la mina, así como también de las ciencias del clima y del medioambiente.

Como se lo vio en la sección introductoria, en principio el alcance de estos modelos fue estrecho, estando dirigido únicamente a resolver cuestiones de optimización del funcionamiento de sectores industriales, como en los procesos de planificación de las industrias de generación de electricidad (Anderson, 1972; Meier, 1982; Samouilidis et al., 1984), de producción (Feltenmark, 1997) o de evaluación de políticas sectoriales (Alexander, 1979).

Con la crisis del Petróleo el alcance de estos es ampliado, con el surgimiento de aplicaciones para estudiar problemas tales como el análisis del consumo energético residencial (Dinan y Miranowski, 1984), la distribución de productos petrolíferos (Moore y Zoltners, 1976), o la producción y el agotamiento de recursos energéticos (Lyness, 1978; Rapoport, 1975; Rowse y Copithorne, 1982). Es así como se intensificó del desarrollo de modelos económico-energéticos para estudiar los problemas de dependencia de los combustibles fósiles (Barhen et al., 1983; Manne, 1976), como herramientas de planificación (Kavrakoglu, 1980; Rath-Nagel y Voss, 1981), de análisis de políticas (Sparrow et al., 1979), y de predicción de la demanda energética (Samouilidis y Pappas, 1980).

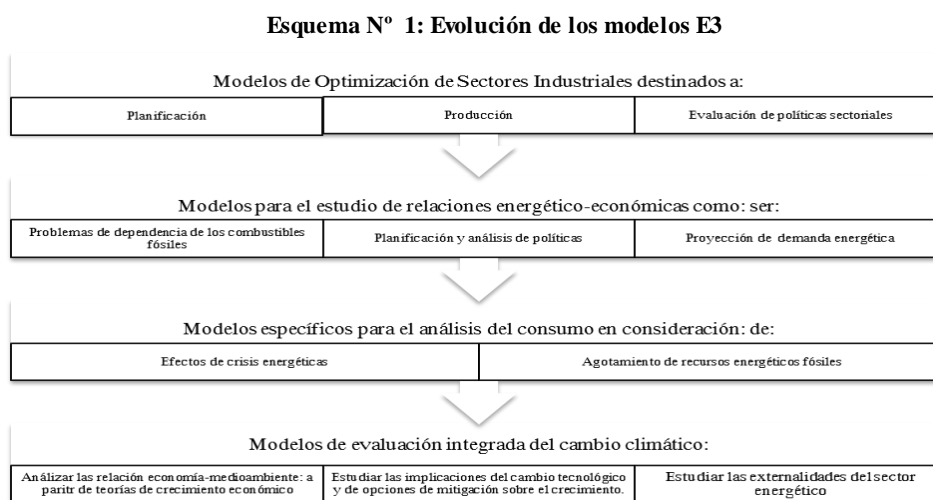
Las técnicas econométricas y de equilibrio general familiares para los economistas, surgieron también a raíz del periodo de la crisis energética (Hudson y Jorgenson, 1974; Hudson y Jorgenson, 1977). Estas estaban pensadas para estudiar las relaciones existentes entre las políticas energéticas y los sectores de actividad económica directamente relacionados al sector energético y al crecimiento económico.

Ya a finales del s. XX se incorporan las relaciones del medio ambiente en los modelos energéticos, lo que aumentó la complejidad de los mismos. Los primeros de estos modelos estuvieron dedicados a analizar la relación entre economía y medio ambiente en base de la teoría del crecimiento económico, y estaban dirigidos a estudiar las implicaciones del cambio

tecnológico y de las opciones de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> sobre el crecimiento a largo plazo. A su vez, comenzaron a ser desarrollados modelos de equilibrio (Kavrakoglu, 1983; Lesuis et al., 1980) basados en datos sobre los efectos contaminantes del uso de la energía sobre el medio ambiente, y de las externalidades sobre la economía.

Los modelos energéticos más recientes son los de evaluación integrada del cambio climático IAM (Integrated Assessment Models of Climate Change) como IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment) o MERGE (Model for Estimating the Regional and Global Effects of Greenhouse Gas), reducidos utilizados en el análisis del efecto que tiene el aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero sobre los patrones climáticos, los impactos derivados del sector energético sobre el medio ambiente y el sistema económico, entre otros.

La evolución de los modelos E3 se resume en el esquema siguiente:



**Fuente:** Elaboración propia.

## 2. Atributos de los Modelos

En la actualidad existe una amplia gama de modelos energéticos que cuentan atributos diferentes que les permiten abordar cuestiones específicas a partir de diferentes ópticas. Es imprescindible conocer las características de los modelos energéticos al momento de elegir un determinado instrumento para hacer frente a un problema de carácter ambiental o energético, dado que debido a las hipótesis con las que parte cada uno de estos, hace que un mismo problema cuente con múltiples posibles respuestas. Por ello es que esta Sección está dedicada a familiarizar al lector con los principales aspectos que deben ser considerados al momento de elegir una herramienta de modelaje.

### 2.1 Cobertura Geográfica

Los modelos E3 pueden tener una cobertura geográfica global, regional, o nacional. Los primeros consideran diferentes conjuntos de regiones a las que se pueden aplicar diferentes hipótesis económicas y tecnológicas. Normalmente las proyecciones de los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera requieren el uso de modelos globales. Mientras que los modelos regionales son útiles para analizar la

efectividad y el impacto económico de políticas asumidas a nivel nacionales, como ser la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para determinados sectores industriales.

## **2.2 Horizonte Temporal**

Los modelos E3 representan la evolución de los sistemas que conforma a corto (menor de 2 años), mediano (hasta 25 o 30 años), y largo plazo (mayor a 30 años). Es importante considerar el horizonte temporal debido a que define el punto de vista que se tiene del sistema representado que influye sobre el tipo de relaciones consideradas (Energy Information Administration, 1991) y sobre la relevancia de las variables exógenas.

A corto plazo por ejemplo, se puede asumir que los patrones climatológicos son relevantes, que la tecnología es fija y que la población es constante o varía conforme a un patrón conocido. En contraste, a mediano plazo, los cambios en la tecnología, el stock de capital, los patrones demográficos y económicos pueden anticiparse razonablemente bien a partir de datos históricos recientes. Con este horizonte de tiempo sólo se consideran las tecnologías que ya están en uso o aquellas que están a punto de empezar a ser utilizadas.

Como lo menciona Hidalgo, I., a diferencia de los modelos de corto y mediano plazo, los modelos de largo plazo consideran los efectos de la aparición de tecnologías que todavía se encuentran en sus primeras fases de desarrollo, como la fusión nuclear por ejemplo, así como también las restricciones sobre el agotamiento de los recursos naturales y restricciones ambientales. Por esta razón, la mayoría de estos modelos consideran hipótesis sobre la introducción de tecnologías futuras basadas en combustibles fósiles (e.g. esquistos bituminosos o las técnicas de licuefacción del carbón o del gas natural) y tecnologías de “último recurso” (backstop technologies) que no están basadas en combustibles fósiles (e.g. la energía solar, la eólica o la geotérmica) ni son restringidas durante el periodo de simulación como lo son los recursos fósiles.

## **2.3 Nivel de Detalle o Agregación**

Los modelos se diferencian también por su capacidad para analizar sectores y tecnologías específicas. En este sentido existen modelos con bajo nivel de detalle que permiten la incorporación de un número limitado de fuentes de energía, como el petróleo o la electricidad. También se encuentran modelos con un nivel de detalle alto, que pueden incorporar cientos de formas de energía.

De la misma forma, algunos modelos distinguen entre unas pocas categorías de demanda de energía, como transporte o fabricación, mientras que otros desagregan a mayor profundidad los sectores que hacen uso de la energía.

En cuanto al tratamiento de los impactos del medioambiente, existen modelos que incluyen en los cálculos emisiones de gas de efecto invernadero limitado, a partir del consumo agregado de energía. Mientras que otros, tienen la capacidad de analizar el efecto de ilimitado supuestos sobre las emisiones, sobre el comportamiento de la atmósfera, y sobre una serie de impactos ambientales (deforestación, calentamiento global, acidificación, efectos sobre zonas costeras, usos del suelo, etc.).

Un aspecto que no debe olvidarse es la relación directa existente entre el nivel de desagregación, la necesidad de datos y la capacidad de analizar una tecnología, un sector o un ecosistema determinado.

## 2.4 Hipótesis de Previsión de Precios

Estos modelos pueden partir de dos hipótesis opuestas para el cálculo de precios: la previsión miope y la previsión perfecta. La primera considera que las condiciones actuales se mantienen o varían en el tiempo de forma conocida (concretamente cambiarían conforme lo han hecho en el pasado). Esta suposición implica que los agentes no conocen las relaciones estructurales endógenas del modelo, ni los valores futuros de las variables exógenas.

En contraste, la hipótesis de previsión perfecta considera que los agentes económicos predicen los precios a través del modelo. Esto implica que todos los agentes tienen la misma información, y que la procesan de la misma manera, que quien construye el modelo. Los agentes con previsión perfecta ajustan su consumo, su producción y sus inversiones conforme a los cambios esperados de los precios.

## 2.5 Técnicas de Resolución

Entre las principales técnicas de resolución se encuentran las siguientes:

- **Modelos de Optimización.-** Estos modelos plantean funciones objetivo de minimización de costes energéticos o maximización de utilidad del consumidor sujeto a ciertas restricciones como el límite de emisiones así como supuestos de racionalidad de los agentes económicos y de competencia perfecta. Estos modelos identifican la Solución Óptima entre todas las alternativas, es decir la mejor vía para resolver problemas determinados. El modelo MARKAL (Markal Allocation) utiliza este tipo de metodología.
- **Modelos de Simulación.-** En estos modelos, las variables evolucionan en función de unas ecuaciones de comportamiento, tratando de representar cómo funciona el sistema real que representan bajo unas condiciones dadas. A diferencia de los modelos de optimización, estos no se encuentran limitados por los supuestos de comportamiento óptimo de los agentes económicos, motivo por el cual son ampliamente utilizados para ensayar los efectos de la aplicación de políticas o estrategias determinadas. Los modelos LEAP (Long term energy planing), NIA (National Impact Analysis), BUENAS (Bottom-Up Energy Analysis System) y MAED (Model for Analysis of Energy Demand), son algunos de los que siguen esta técnica metodológica.
- **Modelos de Equilibrio General.-** Estos son modelos multisectoriales que incorporan mecanismos de mercado en la asignación de recursos y que consideran las interacciones de la totalidad de los sectores de la economía, lo que permite al usuario analizar los efectos directos e indirectos de forma global. Utilizan expresiones algebraicas para representar el flujo circular de la economía y datos económicos tabulados a partir de los cuales el modelo es calibrado y permiten al usuario realizar simulaciones de mediano y largo plazo. Se los considera útiles para evaluar los impactos de políticas energéticas y/o ambientales en la economía a corto plazo.

Los modelos actuales son complejos en su formulación debido a que están estructurados a partir de una amplia serie; en ocasiones miles de ecuaciones, variables y datos. Por este motivo es que son utilizados lenguajes generales de alto nivel como GAMS (General Algebraic Modeling System), VENSIM (Ventana Systems) o paquetes específicos como LEAP.



### 2.5.1 Tratamiento de las Tecnologías

De acuerdo a Hidalgo, I. [1], las hipótesis en las que se basan los modelos son muy importantes para la descripción de las tecnologías y para las proyecciones de su evolución futura, determinando las conclusiones que pueden derivarse sobre las opciones tecnológicas. Todos los modelos contienen información que describe una tecnología en un año base o año de referencia. En el máximo nivel de detalle, se describen los costes de capital y de operación, las necesidades de combustible, la vida técnica, la capacidad de producción y los impactos ambientales de una tecnología.

La mayoría de los modelos tratan de predecir qué tecnologías ganan y cuáles pierden, por qué razón y a qué velocidad. Habitualmente se describen en términos de una inversión inicial y de unos costes anuales de operación y mantenimiento. Algunos modelos van un poco más lejos y consideran adicionalmente el ciclo de vida de las tecnologías, incluyendo los costes de desmantelamiento y reciclaje. En otros casos también se tienen en cuenta los costes de las externalidades que provocan.

Otros datos como la disponibilidad, el impacto ambiental o el efecto de la legislación existente influyen en la cuota de mercado de una tecnología. Tan importantes como las descripciones de las tecnologías son las restricciones que se imponen para evitar resultados absurdos e incompatibles con la realidad. Los modelos deben considerar restricciones políticas, económicas y ambientales. Las restricciones políticas aparecen en casos como el de la energía nuclear. Su tratamiento varía mucho de un país a otro, desde la moratoria y el desmantelamiento gradual de la capacidad instalada hasta el mantenimiento de un ritmo sostenido de construcción de nuevas centrales. Las restricciones económicas pueden ser límites a la inversión. Las restricciones ambientales pueden consistir en el establecimiento de objetivos de producción con energías renovables o de límites en las emisiones.

### 2.7 Disponibilidad de Datos

Las fuentes de información de las que se extraen todos estos datos son muy variadas, y dependen mucho de lo exhaustivo y preciso que sea el modelo. La calidad y la disponibilidad de las fuentes varían entre los distintos países, industrias y tecnologías. Las fuentes pueden ser agencias gubernamentales, asociaciones industriales, empresas comerciales o centros de investigación. Cada uno de estos organismos tiene sus propios objetivos, y recolectan datos diferentes y con diferentes niveles de detalle. Los datos pueden ser incoherentes entre sí, y a veces para desarrollar un modelo hay que elegir entre informaciones contradictorias. Cuando no se dispone de datos o la incertidumbre es muy grande hay que recurrir a establecer hipótesis adicionales en el modelo.

### 2.8 Objetivos del modelaje energético

Los propósitos de estos modelos pueden ser generales o específicos. De acuerdo a Hourcade et. al. (1996, 283-384), dentro del primer grupo se encuentran los siguientes objetivos:

- **Proyecciones.-** Estos modelos consisten en la extrapolación de tendencias históricas, motivo por el cual son usualmente aplicados para analizar impactos a corto plazo. De acuerdo a Van Beek N. (1999, pp. 7-8), un prerequisite para realizar esta tarea es

mantener constantes aquellos parámetros de desarrollo críticos, como las elasticidades. Adicionalmente, esta aproximación requiere la representación endógena del comportamiento económico y de los patrones de crecimiento, y es desarrollado normalmente a partir de modelos econométricos.

- ***Análisis de Escenarios.-*** permiten explorar comportamientos futuros. Esta tarea consiste en la construcción de un número ilimitado de escenarios diseñados bajo los supuestos del modelador acerca del comportamiento de los agentes económicos, necesidades de recursos, cambios en la tecnología, procesos de adaptación e inclusive implementación de políticas de mitigación, que son comparados con un modelo de referencia denominado BAU *Business as Usual*. Estos análisis de sensibilidad cruciales para proveer información sobre los efectos de supuestos específicos pueden ser abordados con ayuda de los conocidos modelos *Bottom Up* y *Top Down*.
- ***Backasting.-*** El propósito de este tipo de modelos es la construcción de deseados futuros escenarios deseados. Esta tarea es realizada con ayuda de expertos para determinar los cambios presentes que son necesarios para alcanzar objetivos a futuro.

La categoría de propósitos específicos hace referencia a propósitos concretos, en los que los modelos se enfocan como la proyección de la demanda de una determinada tecnología en un determinado sector de la economía. Entre estos propósitos se encuentran los siguientes:

- ***Modelos de Demanda de Energía.-*** Están enfocados ya sea de un sector específico o de toda la economía. Esta técnica toma en cuenta, entre otras variables cambios poblacionales, ingresos y precios.
- ***Modelos de Oferta de Energía.-*** Enfocados principalmente en aspectos tecnológicos que incluyen aspectos referentes a la interacción con la demanda así como también aspectos de minimización de costos.
- ***Modelos de Impactos.-*** Estos modelos están diseñados para estudiar los impactos que tienen las decisiones de carácter económico y ambiental sobre el sistema energético y viceversa.
- ***Modelos de Evaluación*** que son diseñados para ser marcos de comparación de otros modelos. Las consecuencias o impactos de cada opción pueden ser evaluados con este tipo de modelos.

### 3. Tipología de los Modelos Energéticos

Habiendo comprendido las principales características de los modelos energéticos, pasamos en esta sección a identificar las principales bondades, así como también debilidades de estos a partir de su clasificación. Este paso es necesario para facilitar al usuario la elección del modelo y su correcta aplicación de este en un contexto determinado.

En la actualidad existen muchas formas de clasificar los modelos energéticos. El método más común es el que los divide en Top-Down (TD) y Bottom-Up (BU), siendo los primeros aquellos que centran su análisis en un nivel agregado de la economía, mientras que los segundos, utilizan una representación ingenieril detallada del sistema energético<sup>5</sup>. Algunos autores como Hourcade et. Al. (1996, 283- 286) los clasifican de acuerdo a los supuestos que estos utilizan. Otros como Grubb et. (1993, 432-446), consideran únicamente técnicas metodológicas de resolución, mientras que autores como Nicole Van Beeck (1999), adiciona dentro de su clasificación criterios más amplios como la aproximación matemática, cobertura geográfica, cobertura sectorial, horizonte temporal, e inclusive los requisitos de datos del modelo.

La tipología que se utiliza en este trabajo, cubre tres esferas que se complementan con la descripción realizada en la sección anterior. Clasificación que pretende facilitar la comprensión de los modelos energéticos; sus objetivos, características, ventajas y debilidades.

### 3.1 Clasificación de acuerdo al propósito de los modelos

La comprensión del alcance y los límites de cada modelo es el primer paso para realizar un análisis energético. En este sentido se distinguen de acuerdo a su finalidad o propósito los modelos con propósitos generales y los modelos con propósitos específicos. En esta sección se amplía el análisis realizado, presentando la subdivisión de estos tipos de modelos así como también referencias bibliográficas a ser consultadas.

**Tabla N° 1: Sub Clasificación de Modelos de acuerdo a sus Propósitos**

| De acuerdo a su Propósito     | Subclasificación   | Características  | Bibliografía recomendada   |
|-------------------------------|--|--|--|
| <b>Propósitos Generales</b>   | <b>a. Modelos prospectivos de análisis sectorial</b>                               | Combinan modelos econométricos y modelos de pronóstico de series de tiempo para predecir los picos de consumo mensuales tomando en cuenta los cambios en variables económicas y climatológicas[8][9]<br>Aplicados para explicar cómo la toma de ciertas decisiones, e.g. aumento poblacional, el desarrollo económico entre otros  | - Noel D. Uri (1978)<br>- Aplicaciones varias a partir de modelo LEAP, ver cita bibliográfica [7].   |
|                               | <b>b. Modelos prospectivos de la aplicación de recursos energéticos renovables</b> | Utilizados para identificar impactos de la aplicación de recursos energéticos renovables dentro de la matriz energética, para predicciones de predicción y demanda, y para simular y estudiar efecto del uso de fuentes alternativas.  | - Alkinolu y Ecevit, (1990).<br>- Meye y Van Dyk (2002).<br>- Consultar Rajeswaran et al. (1990) y ver cita bibliográfica [10].  |
|                               | <b>c. Modelos de planificación</b>   | Diseñados para apoyar en la toma de decisiones energéticas y analizar la viabilidad del desarrollo de políticas de mitigación ambiental.<br>Dentro de la literatura se encuentran modelos basados en técnicas de simulación, econométricos, Top Down Bottom Up e híbridos.   | - Peter y Martin O. Stern, (1977)<br>- Ver citas [11] y [12]<br>- Sultan, Hafeez Rhman , (1988)<br>- George, Hsu et al. (1987)<br>- Leslie A., Poch y Jenkins, (1990)<br>- Christopher W. Rei et al., (2003).  |
| <b>Propósitos Específicos</b> | <b>a. Modelos de demanda y oferta energética</b>                                   | Diseñados para analizar cuestiones relacionadas al análisis del comportamiento de los precios y la actividad económica sobre la demanda y oferta energética a nivel agregado y desagregado. Basado inicialmente en métodos econométricos para analizar la demanda de electricidad de sectores domésticos. También fueron utilizadas técnicas de simulación de escenarios para analizar el potencial de desarrollo de energías renovables y técnicas de optimización. | - Charles y Mark (Illinois, 1987).<br>- Vischwa B. y Amartyea et al., (1993).<br>- Masood, A. Bardi (1992). Ver también citas [14], [15] y [16].<br>- Duangjai I., et al. (1996).  |
|                               | <b>b. Modelos de reducción de emisiones</b>  | El desarrollo de estos modelos ha ido aumentando con el tiempo, principalmente desde que el cambio climático ha ido adquiriendo un carácter prioritario dentro de la agenda de la comunidad internacional.<br>Estos se diseñaron principalmente para la estimación y evaluación de impactos de políticas de mitigación a partir de modelos Bottom Up e Híbridos principalmente.  | - Para estudiar la aplicación del modelo LEAP, consultar John Reilly (1983).<br>- Para estudiar el impacto de políticas de reducción de emisiones de dióxido de carbono ver Danny Harvey, (1990).<br>- Consultar George J. Y Hsu and Feng Ying Chou, (2000).<br>- Aplicaciones varias a partir de modelo LEAP, ver cita bibliográfica [7]. |

**Fuente:** Elaboración propia.

<sup>5</sup> Para mayor detalle sobre la diferenciación de ambos modelos, ver Anexo 4.2

## **3.2 Clasificación de acuerdo a la aproximación metodológica utilizada**

Los principales enfoques de modelos utilizados para la evaluación de políticas, planificación de sistemas energéticos y de diseño de pronósticos se detallan a continuación.

### **3.2.1 Modelos de Optimización**

Los modelos de optimización basados en la programación lineal, están diseñados para identificar la configuración del menor costo sujeto a restricciones definidas exógenamente. Los supuestos principales de este método, son los de competencia perfecta y de racionalidad económica.

La principal ventaja de esta metodología yace en su utilidad para analizar y comparar opciones tecnológicas conociéndose a priori los costos asociados a cada tecnología individualmente. Adicionalmente, la aproximación metodológica de estos modelos permite responder cuestiones de carácter retrospectivo; como por ejemplo el costo de alcanzar una determinada meta política.

Sin embargo debido al carácter cuestionable de los supuestos con los que parte, estos modelos no son adecuados para simular el comportamiento de los agentes económicos en el mundo real. Por otra parte, debido a que están limitados a las elecciones óptimas de tecnología, no permiten examinar opciones de política como las de mitigación por ejemplo, y debido a los altos niveles de requerimientos de datos y a su relativa complejidad, son difíciles de aplicar por usuarios no familiarizados con las técnicas de optimización, lo cual representa una gran limitación del modelo.

En Australia se hizo uso del modelo MARKAL, modelo basado en la programación lineal, para poder evaluar el comportamiento de la demanda energética durante el periodo 1980-2020[20]. Suganthil. y Jagadeesan T. R (1990), desarrollaron un modelo 3E aplicando la programación matemática de maximización de la razón de intensidad energética sujeto a restricciones medioambientales. El modelo fue diseñado para evaluar los requerimientos energéticos del periodo 2010-2011 en la India. En Finlandia, se desarrolló un modelo de optimización Bottom Up, como herramienta para la planificación sobre el uso sostenible de energía en dicho país. El 2003, Cornio et al., elaboró un modelo de optimización basado en el modelo EFOM (Energy Flow Optimisation Model), con el objetivo de evaluar y promocionar el uso de fuentes energéticas de carácter renovable.

### **3.2.2 Modelos de Simulación**

Este tipo de modelos tienen la finalidad de simular el comportamiento de los agentes económicos a quienes se los enfrenta a diferentes fuentes de información (e.g variación de los precios o salarios en el futuro) y restricciones (e.g límites en la tasa de reemplazo de stock de producción). En este tipo de modelos los precios y las cantidades se ajustan endógenamente de forma iterativa.

Dentro de este tipo de modelos se encuentran modelos basados en la teoría de juegos y en técnicas contables. Los primeros centran su atención en las decisiones estratégicas que influyen en la configuración de los sistemas energéticos y sirven para evaluar mercados oligopólicos. Los últimos contabilizan los flujos físicos y económicos de los sistemas

energéticos para realizar proyecciones sobre las demandas energéticas futuras y sus emisiones relacionadas.

A diferencia de los modelos de optimización, estos no se ven limitados por supuestos de comportamiento óptimo, lo que permite introducir comportamientos estratégicos dentro del análisis. Otra ventaja de este tipo de modelos yace en que estos no asumen que la energía es el único factor que afecta las decisiones tecnológicas.

Las principales debilidades de este tipo de modelos yace su carácter intensivo de datos, que limita su aplicación. Otro punto de este tipo de modelos que ha sido muy cuestionado, es la dificultad de parametrizar algunas relaciones de comportamiento de los agentes económicos.

Los modelos LEAP, NIA National Impact Analysis, BUENAS Bottom-Up Energy Analysis System, MAED Model for Analysis of Energy Demand y PAMS Policy Analysis Modelling System, son algunos de los ejemplos pertenecientes a esta subcategoría.

### **3.2.3 Modelos Econométricos**

Estos modelos basados en la metodología econométrica buscan establecer las relaciones existentes de diferentes variables de interés a partir de un análisis estadístico y fuentes de datos históricos. La aproximación econométrica ha sido intensivamente desarrollada durante las últimas décadas en el campo energético. Autores como Pindyck (1979), señalaban que utilizar la metodología econométrica permitiría comprender la estructura de la demanda energética a largo plazo y su relación con el crecimiento económico. La gran mayoría de los estudios realizados se centraron en la demanda agregada, considerando como variables independientes al Producto Interno Bruto y los precios.

La relación que es determinada por este método, es utilizada en análisis prospectivos. Los resultados de estos modelos, son muchas veces calificados como obsoletos, al tener muchas deficiencias tanto técnicas como prácticas. Las limitaciones del modelo para capturar los efectos de cambios en la tecnología, es un claro ejemplo del primer defecto mencionado anteriormente. Como debilidad práctica de este tipo de modelos, se encuentra la gran dificultad de poder utilizar este modelo en regiones que, o bien carecen de registros históricos dentro de sus bases de datos, o si bien estas existen, debido a la inconsistencia de los mismos, no sirven como fuentes ideales de datos. Es principalmente debido a las limitaciones de este modelo, que este no será abordado con mayor detalle en el presente trabajo.

### **3.2.4 Modelos de Uso Final o de Contabilidad**

Este tipo de modelos realizan descripciones físicas sobre el sistema energético, los costos y los impactos medioambientales. Este tipo de modelos considera explícitamente los resultados de decisiones específicas y examina sus implicaciones en la economía.

Estos modelos están diseñados para responder cuestiones tales como ¿cuáles serían los costos, niveles de reducción de las emisiones y ahorros de combustible si las inversiones estuvieran dirigidas a fuentes de origen renovable? En otras palabras, están dedicados a explorar las consecuencias de escenarios alternativos en el futuro.

La principal ventaja de estos modelos, es que no están basados en supuestos restringidos como lo son los de la competencia perfecta. Por otro lado su simplicidad en el manejo, flexibilidad de modelación y bajo requerimiento de datos, lo hace un modelo ideal para adaptarse a diferentes contextos.

Sin embargo, estos no tienen la capacidad de identificar automáticamente los sistemas de menor costo, por lo que son menos efectivos en el análisis de sistemas complejos donde la solución del menor costo es necesaria. Por otro lado, se han cuestionado a este tipo de modelos, principalmente debido a la inconsistencia de las soluciones.

Entre estos modelos se encuentran los modelos LEAP y MESAP (Modular Energy System Analysis and Planning Environment), entre otros.

### **3.2.5 Modelos de Equilibrio General**

Los modelos de equilibrio general son modelos multisectoriales que incorporan mecanismos de mercado en la asignación de recursos. Este modelo combina la estructura de los teoremas de equilibrio general de Arrow-Debreu y del teorema de la existencia de equilibrio Brower-Kakutani con datos de la economía que determinan los niveles de la oferta, demanda que respaldan el equilibrio general<sup>6</sup>. Estos modelos consideran las interacciones de la totalidad de los sectores de la economía, lo cual permite al usuario analizar los efectos directos e indirectos de forma global.

Los modelos de Equilibrio General utilizan expresiones algebraicas para representar el flujo circular de la economía y datos económicos tabulados a partir de los cuales el modelo es calibrado. A su vez, estos modelos incorporan los precios de forma endógena y permiten la sustitución entre los factores productivos.

Las cualidades teóricas y estructurales de este tipo de modelos, permiten al usuario realizar simulaciones de mediano y largo plazo por un lado, y por otro, a corto plazo, evaluar los impactos de políticas energéticas y/o ambientales en la economía.

La debilidad de este tipo de modelos surge en su nivel de abstracción, lo cual imposibilita considerar características reales de los sistemas energéticos como lo son las fallas de mercado y las brechas de eficiencia energética. Por otro lado, y al igual que otros modelos de corte macroeconómico, este tipo de modelo tiene la debilidad de tratar las interrelaciones económicas a partir de tecnologías débilmente detalladas.

### **3.2.6 Modelos de Equilibrio Parcial**

A diferencia de los modelos de equilibrio general, estos evalúan sectores de la economía de forma individual y sacrifican la amplitud de su análisis macro a cambio de mayores niveles de detalle tecnológico. Este tipo de modelos centran su atención en la modelación, análisis de la demanda y oferta energética de un sector específico de la economía.

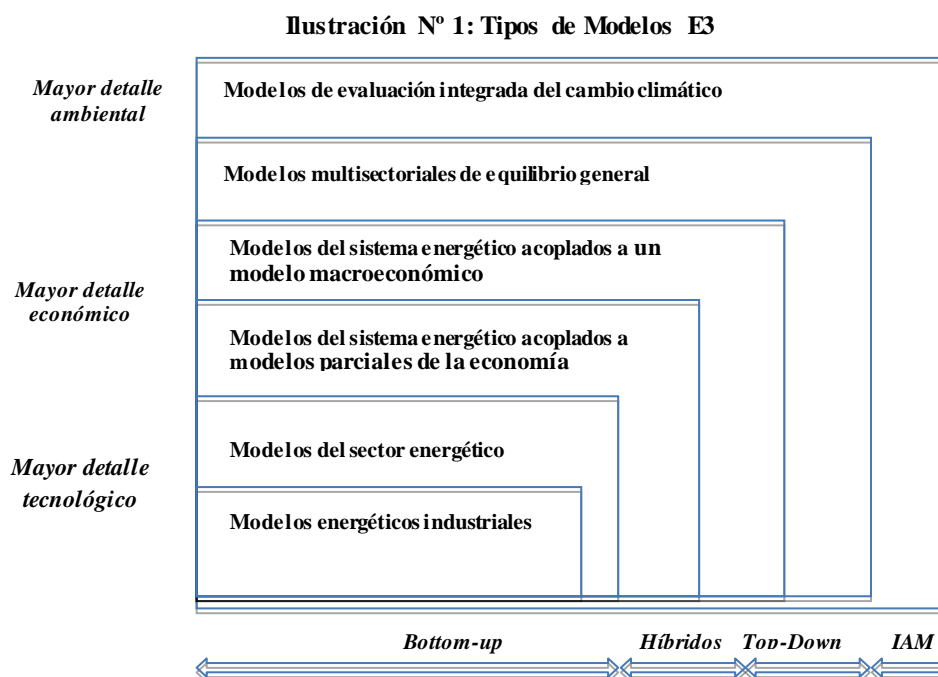
Dentro de esta categoría de modelos se encuentran: POLES (Prospective Outlook for the Long-term Energy System), WEM (World Energy Model) , y PRIMES entre otros.

---

<sup>6</sup> El primero considera que existe una oferta y demanda bien comportadas, beneficios nulos y un set de precios que vacían los mercados, mientras que el teorema de la Existencia de Equilibrio garantiza que, mientras no se alcance un equilibrio, existirá un proceso iterativo que permitirá alcanzarlo en algún momento.

### 3.3 Clasificación de acuerdo a la cobertura del modelo

Esta clasificación sirve para comprender el alcance de los modelos E3 y sus principales diferencias metodológicas. En esta se encuentran agrupados modelos que abordan cuestiones energéticas a partir de tres ópticas muy diferentes: el enfoque económico, ingenieril y ambiental.



**Fuente:** González, Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medio ambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES, p. 43

#### 3.3.1 Modelos de mayor detalle tecnológico

Dentro de esta categoría se encuentran los modelos de corte ingenieril que, como se puede observar en la Ilustración N° 1, es utilizado para la elaboración de modelos del sector energético o de modelos energético-industriales. A continuación se detallan las principales características de este modelo.

### Modelos Bottom-Up

Dentro de los modelos que se consideran como parte del *paradigma optimista ingenieril*<sup>7</sup>, se encuentran los modelos Bottom-Up (BU de aquí en adelante), modelos de uso final también conocidos como modelos de aproximación ingenieril. Fueron diseñados específicamente para describir las técnicas, el desempeño y los costos directos asociados a las opciones de tecnología utilizada y para permitir identificar posibilidades de mejora en los sistemas.

En la actualidad, los modelos BU son conocidos por su alto nivel de desagregación y sus usos para el análisis prospectivo y están orientan el análisis del ciclo de vida del output en

<sup>7</sup> Van Beek Nicole, 1999. Clasification of Energy Model, p. 9.

base al análisis de su proceso, para así comprender el impacto ambiental de estos a lo largo de su proceso de transformación, e.i. desde la materia prima hasta su disposición final.

Desde su primera aplicación para la planificación de la producción energética por *utilities*, han sido elaboradas grandes cantidades de trabajos de corte ingenieril. Esto debido al interés de identificar los usos finales de las altas demandas energéticas pronosticadas en la década de los setenta (WILSON y SWISHER, 1993) y a la necesidad de introducir otros factores explicativos (al margen del precio que hasta entonces había sido considerado como la principal fuente de información para la toma de decisiones energéticas) tales como los potenciales impactos de políticas y programas, que pasaron de ser netamente energéticos, a económicos y medioambientales (protocolo de Kyoto) .

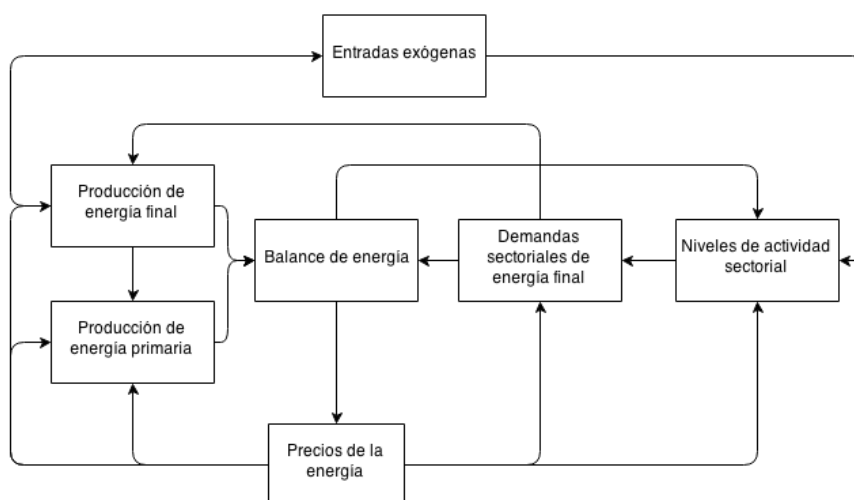
Dentro de este tipo de modelos se encuentran los modelos de equilibrio parcial, modelos de simulación, optimización y más recientemente se cuenta con los modelos de agentes múltiples.

## Estructura del Modelo

A partir de las entradas exógenas (como el PIB o la población), de precios de la energía y de su oferta, se determinan los niveles de actividad de los sectores considerados en el modelo, e.g. sector industrial o de transporte. A partir de estos niveles de actividad son calculadas las demandas de las diferentes formas de energía secundaria.

La producción de energía primaria tiene en cuenta la demanda de energía secundaria, la producción de energía a partir de fuentes renovables, y factores exógenos (como variaciones en la eficiencia tecnológica, en los costes, o en los recursos energéticos disponibles). Tanto la producción como la demanda de energía, y los niveles de actividad sectorial están influidos por los precios de las diferentes formas de energía consideradas.

**Ilustración N° 2: Estructura Genérica de un Modelo Ingenieril**



**Fuente:** González, Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medio ambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES, p. 44



## Ventajas y Debilidades del Modelo

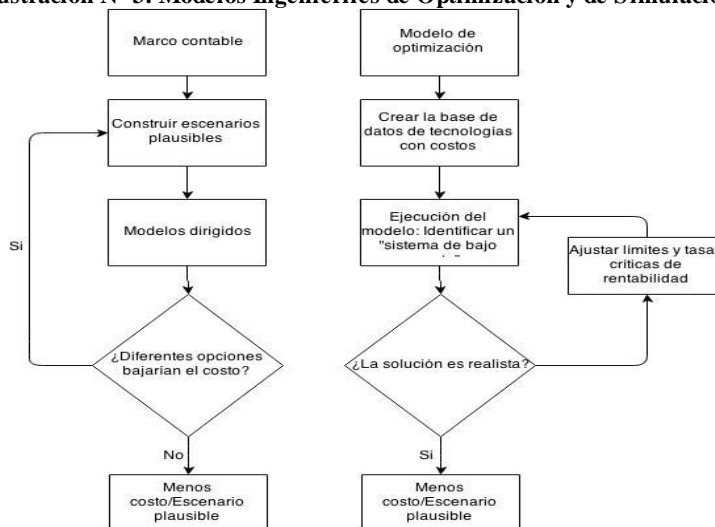
Las principales ventajas de este tipo de modelos, son que: (i) no requieren de datos históricos para tareas prospectivas, (ii) tienen la capacidad de capturar cambios estructurales en la economía y el desarrollo de nuevas tecnologías, y finalmente, (iii) al poder realizar análisis a nivel desagregado, permiten realizar proyecciones detalladas para sectores como de la industria, comercio, sector doméstico y de transporte. Gracias a estos tres aspectos, es posible formular diferentes escenarios que capturen el desarrollo de las trayectorias de interés y la influencia que tienen las decisiones ya sea de naturaleza energética, económica o ambiental, sobre la economía. Adicionalmente, debido a su flexibilidad, requerimientos limitados de habilidades, capacidad de capturar las diferentes características del área rural urbana además de energías tanto tradicionales como modernas, la metodología BU es ideal para la evaluación energética dentro del contexto de países en vías de desarrollo<sup>8</sup>.

Sin embargo el modelo posee dos grandes debilidades. Por un lado, la incapacidad de capturar los efectos de las transacciones y políticas que no están valoradas en términos monetarios, debilita su efectividad para el análisis de ciertas políticas. La otra debilidad es que este tipo de modelos tienden a ignorar restricciones económicas reales, que se representan en la frontera de producción (e.g. comportamiento del mercado, costos de implementación, imperfecciones del mercado, efectos de indicadores macroeconómicos como el empleo).

## Revisión de Modelos y Trabajos Realizados

A grandes rasgos, los modelos ingenieriles se subdividen en modelos de *optimización*, entre los que se encuentran por ejemplo los modelos MARKAL (Markal Allocation) y MARKAL-MACRO (cuyas metodologías son descritas en la sección A de los Anexos) y *modelos de simulación* como el LEAP (detalladamente descrito en la sección cuatro de este trabajo).

**Ilustración N° 3: Modelos Ingenieriles de Optimización y de Simulación**



Fuente: Fei Teng, Alun Gu, Maosheng Duan, 2007

<sup>8</sup> TIMILSINA GOVINDA (2010).

También se encuentran dentro los estudios ingenieriles, trabajos basados en investigación operativa (Kavrakoglu, 1982; Samouilidis, 1980; Samouilidis y Berahas, 1983). En la literatura aparecen algunas revisiones y clasificaciones de modelos de los sistemas energéticos (Boyd et al., 1990; Huntington et al., 1982; Rath-Nagel y Voss, 1981), y algunas comparaciones y críticas (Koreisha, 1980; Ulph, 1980).

### **3.3.2 Modelos de mayor detalle económico**

Dentro de esta categoría se encuentran los modelos construidos a partir de la teoría económica. A continuación se detalla más respecto a las características y metodología del mismo:

#### **Modelos TOP DOWN**

Los modelos Top Down (TD de aquí en adelante) utilizan datos agregados para estudiar la interacción entre el sector energético y los otros sectores de la economía, con el objetivo de examinar la totalidad del desempeño macroeconómico. Esto es posible gracias a la endogenización de las relaciones de comportamiento de la economía que permiten extrapolar tendencias del pasado en el futuro, motivo por el cual son considerados como herramientas ideales para propósitos predictivos a corto plazo.

Se podría decir que la principal característica de estos modelos, que los diferencian de los modelos BU, es la forma en la que estos representan las tecnologías a partir de la construcción de funciones de producción agregadas para cada sector de la economía. Otra característica de estos modelos es que buscan alcanzar un equilibrio a partir de drivers de crecimiento económico, cambios inter industriales, desarrollo demográfico y tendencias de precios<sup>9</sup>.

Estos modelos son utilizados para evaluar costos económicos y efectos de instrumentos políticos de regulación energética y medioambiental. Dentro de la literatura se pueden encontrar cuatro diferentes tipos de modelos TD: modelos Input-Output, econométricos, modelos de equilibrio general computable y de sistemas dinámicos.

##### **a. Modelo Top-Down de Equilibrio General Computable**

Los modelos de equilibrio general computable (CGE: Computable General Equilibrium) consideran el equilibrio simultáneo de todos los mercados, tanto de bienes y servicios como de factores productivos (Jorgenson y Wilcoxon, 1990).

##### **Estructura del Modelo**

En estos modelos, las empresas y los consumidores optimizan su comportamiento. Se considera un número limitado de fuentes de energía en vez de tecnologías detalladas de producción o demanda de energía. La demanda de energía se deriva de la demanda de otros bienes y servicios, mientras que su producción requiere del uso de factores primarios y de bienes intermedios. Los precios, los salarios los tipos de interés se ajustan a través de mecanismos del mercado.

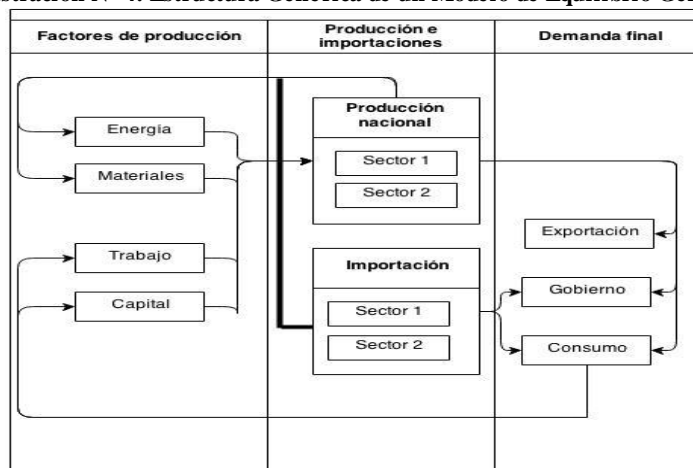
---

<sup>9</sup> A diferencia de los modelos analizados en la anterior sección, estos no toman en consideración el progreso tecnológico, innovación o cambios intra industriales.

Los agentes económicos que intervienen en un modelo de equilibrio general son el sector productivo (encargado de la producción doméstica y de las importaciones), los consumidores, el gobierno y un sector que representa al resto del mundo (exportaciones e importaciones). El sector productivo se divide por sectores (grupos de bienes). Esta desagregación permite usar mecanismos de sustitución entre bienes basados en cambios de los precios. La demanda final del gobierno se determina equilibrando los ingresos y los gastos del sector público.

La demanda de cada sector productivo está formada por las demandas intermedias de otros sectores y por la demanda final de consumidores, gobierno e importaciones. Los productores determinan su combinación de entrada de factores primarios, bienes intermedios e inversión de manera que minimizan sus costes. Entre los factores de producción se encuentran varias fuentes primarias y secundarias de energía. Los consumidores maximizan una función de utilidad que define la evolución temporal de su gasto en consumo, su ahorro y su oferta de trabajo. El gobierno recibe impuestos, distribuye transferencias, y compra bienes y servicios.

**Ilustración N° 4: Estructura Genérica de un Modelo de Equilibrio General**



**Fuente:** González, Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medio ambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES, p. 50.

Las variables económicas de cada región y de cada sector se calculan endógenamente a partir de las decisiones de producción y consumo de los agentes económicos. Las ecuaciones que modelan estas decisiones se basan en parámetros tecnológicos, preferencias, y restricciones sobre las políticas y los recursos. Lo más importante de estos modelos es que representan los ajustes de los mercados inducidos por cambios en los precios. Los modelos de equilibrio general calculan endógenamente el PIB, lo cual establece un vínculo directo entre las actividades energéticas y las económicas. El efecto que tiene una política determinada sobre el bienestar general puede estimarse a partir del cambio que produce en el PIB.

En los modelos de equilibrio general, el capital se reparte entre todos los sectores. El capital disponible en cada periodo es el resultado de la acumulación y la depreciación de las inversiones pasadas. Los precios de los bienes producidos y de los factores de producción varían de modo que los niveles de actividad satisfacen las condiciones de equilibrio de cada mercado.

Los modelos de equilibrio general se distinguen entre sí por su cobertura geográfica y sectorial, por su horizonte temporal, y por su detalle de representación del sector energético. Además, se distinguen por las especificaciones de sus funciones de producción y de utilidad (CES, Cobb- Douglas, Leontieff, etc.), y por sus hipótesis sobre comercio y gasto público.

La literatura científica proporciona algunas revisiones y comparaciones de modelos de equilibrio general aplicados al análisis de problemas energéticos y medioambientales (Bergman, 1988; Bhattacharyya, 1996; Diesendorf, 1998; Loschel, 2002; Smith y Hill, 1982).

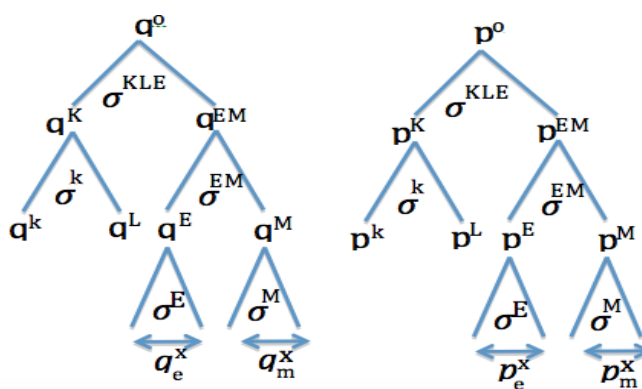
## Metodología

Estos modelos parten de sistemas de ecuaciones algebraicas para representar el flujo circular de la economía, el proceso de maximización del productor y del consumidor. Adicionalmente, hacen uso de una matriz de datos a partir de la cual el modelo es calibrado. La metodología que se utiliza para hallar los parámetros que representan la participación de cada factor en el marco de un Equilibrio General, se realiza a partir de la calibración de dichas ecuaciones en base de una matriz de Contabilidad Social (SAM de aquí en adelante). Este procedimiento, que usualmente es considerado como una Caja Negra o Black Box, es realizado con ayuda de programas computacionales especializados, motivo por el cual se utiliza el termino C de Computacional o Computable en el modelo CGE.

Para poder representar los ajustes de los mercados inducidos por cambios en los precios y/o políticas energético-ambientales, no son los parámetros del modelo, sino más bien las elasticidades entre los factores productivos los que son de interés de estudiar. Por este motivo se toman en cuenta diferentes posibilidades de sustitución, tales como: sustitución entre factores primarios y bienes intermedios; sustitución entre el trabajo, capital, materiales energéticos; sustitución entre las diferentes fuentes energéticas de un sistema e inclusive entre los materiales no energéticos del modelo.

Para determinar las posibilidades de sustitución se diseña una estructura jerarquizada del modelo que se presenta en la Ilustración N° 5. Dicha estructura representa la naturaleza de los modelos TD, en el cual los componentes de un sector o actividad de interés son desagregados en diferentes niveles de forma *descendente*. En cada nivel se construyen nodos representados por funciones de producción que denotan el output en ese nivel, que es obtenido a partir de inputs determinados por cada una de las ramificaciones conectadas al no

Ilustración N° 5: Estructura Jerarquizada del Modelo Top Down



Fuente: Wing, Computable General Equilibrium Models for the Analysis of Energy and Climate Policies, p. 21

Los primeros métodos para estimar las posibilidades de sustitución en el modelo CGE se basaron en juicios de valor o en estimaciones precias de la literatura empírica, procedimientos altamente criticados por su naturaleza ad hoc (Jorgenson, 1984). En la actualidad, las posibilidades de sustitución en la economía son determinadas por métodos más robustos. Uno de estos se realiza a partir de la matriz SAM y técnicas econométricas<sup>10</sup>. Otra metodología para su estimación es la de calcular los parámetros del modelo, e.i. la participación de cada factor en el modelo, a partir de una aproximación BU<sup>11</sup>, que tiene la ventaja de representar de forma detallada las opciones de tecnología actuales y futuras.

## **Ventajas y Debilidades**

Si bien los modelos TD son consistentes con la teoría económica, al tratar a la tecnología dentro de una caja negra o black box, se dificulta la conversión de proyecciones tecnológicas en las funciones de producción de los modelos.

A pesar de que los modelos de equilibrio general computable tienen la capacidad de comprender la interdependencia económico-medioambiental, la rigidez de los supuestos en los que estos se basan, impiden modelar de forma adecuada las reacciones de economías con características distintas.

### **b. Modelos Input Output**

Estos modelos, basado en los legados de Francois Quesnay (1758) y de Leon Walras junto a Wassily Leontief (1966), describen la totalidad de los flujos de bienes y servicios subdivididos en diferentes sectores y usuarios de un país.

A partir de esta aproximación, se puede capturar la demanda directa e indirecta de energía, a partir de transacciones inter industriales, lo cual hace de este método una herramienta de análisis interesante. Sin embargo al precisar un alto nivel de datos y el supuesto de coeficientes Input Output invariantes en el tiempo, limitan su aplicación en la vida real.

### **c. Sistemas Dinámicos**

El concepto de sistemas dinámicos fue desarrollado en el instituto tecnológico de Massachusetts MIT en 1950 por Forrester. Es utilizado en la actualidad para analizar el comportamiento a largo plazo de sistemas sociales, tales como grandes compañías industriales e inclusive ciudades. El objetivo de este tipo de modelos es el de explicar el comportamiento de la interacción de sistemas sociales como resultado de supuestas interdependencias y considerando cambios dinámicos a lo largo del tiempo. En el modelo se definen flujos, stocks y componentes centrales del sistema definido cuyas interconexiones son establecidas por sistemas de retroalimentación representados por ecuaciones diferenciales no lineales.

---

<sup>10</sup> Un ejemplo de esta metodología fue utilizado en el modelo GEM E3, cuyas principales características serán descritas en la sección 4.

<sup>11</sup> Un ejemplo de esta metodología fue utilizado en el modelo MIT EPPA, cuyas principales características serán descritas en la sección 4.

Este tipo de modelos son resueltos utilizando herramientas de software que calculan las ecuaciones diferenciales de los sistemas de retroalimentación y su desarrollo a lo largo el tiempo.

Ejemplos de modelos que utilizan la aproximación de sistemas dinámicos están el modelo POLES, ASTRA (Assessment of Transport Strategies) y TIME (The Integrated MARKAL-EFOM System).

### 3.3.3 Modelos de mayor detalle ambiental

A raíz de la necesidad de modelar las relaciones entre los sectores energético, económico y medioambientales, se busco desarrollar técnicas de modelaje multidisciplinarias, como los son los modelos de evaluación integrada del cambio climático analizado a continuación.

#### Modelos de Evaluación Integrada del Cambio Climático<sup>12</sup>

El fenómeno del cambio climático es uno de los temas más complejos de estudio dentro de las ciencias sociales como naturales, debido al rol que juega la incertidumbre<sup>13</sup> sobre el bienestar económico y social. Ningún otro fenómeno medioambiental representa tan gran amenaza para la integridad de los seres vivos, requiere un nivel tan alto de coordinación entre países, ni tiene efectos perdurables a lo largo del tiempo.

Como ponen en manifiesto diversos estudios, (IPCC, 1996; Nierenberg, 1995; US National Research Council, 1983), el desarrollo económico influye sobre el clima, mediante la contaminación, y viceversa, los costes de reducción de la contaminación y los efectos de los cambios de los patrones climáticos influyen directamente en la economía. De acuerdo con Rotmans y Dowlatabadi (1998):

*“La evaluación integrada del cambio climático es un proceso interdisciplinario que combina, interpreta, y comunica conocimientos entre diferentes disciplinas científicas de un modo tal que, el conjunto completo de interacciones causa-efecto de un problema se evalúa desde una perspectiva sinóptica caracterizada por su valor añadido y por su utilidad en cuanto al apoyo para la toma de decisiones. Esta definición de evaluación integrada requiere que toda la variedad de causas, mecanismos e impactos del cambio climático sean abordadas”.*

Los modelos de evaluación integrada del cambio climático (IAM de aquí en adelante) son por tanto aquellos que combinan modelos del sistema económico y energético con modelos climáticos, ecológicos, oceanográficos y, en algunos casos, sociológicos y pueden ser utilizados para evaluar políticas o para optimizarlas (IPCC, 1996).

### Metodología

A partir de un modelo económico, o de unas proyecciones totalmente exógenas, se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del crecimiento económico y de los patrones de uso energético. Las emisiones de gases de efecto invernadero producen

---

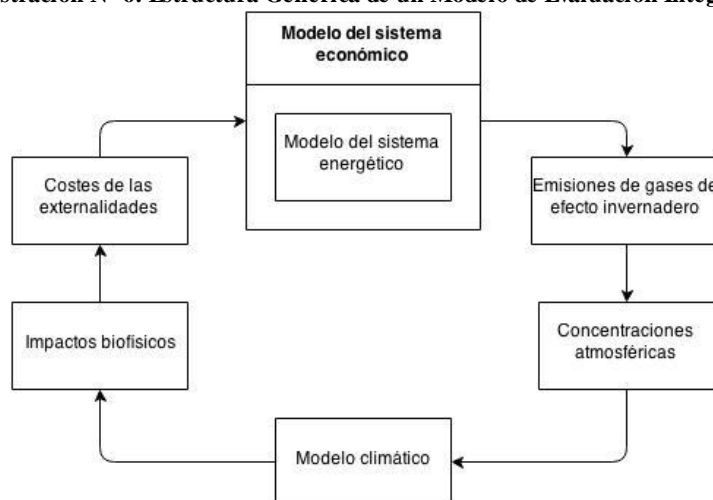
<sup>12</sup> Mayor detalle ver cita [27]

<sup>13</sup> Uno de los asuntos dominantes dentro de la economía de cambio climático es el rol de la incertidumbre (Manne and Richels ,1992).

cambios en la composición atmosférica, que un modelo climático traduce en impactos biofísicos e incluso sociales. El ciclo se completa introduciendo la valoración económica de estos daños en el módulo económico inicial.

Los modelos IAM pueden ser completos o parciales. Los primeros son aquellos que modelan todo el ciclo completo representado en la Ilustración N° 5. Los modelos parciales suelen tomar como exógenas las proyecciones sobre emisiones, prescindiendo de un módulo del sistema económico.

**Ilustración N° 6: Estructura Genérica de un Modelo de Evaluación Integrada**



**Fuente:** (González, Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medio ambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES)

A pesar de que el surgimiento de los modelos IAM es relativamente nuevo<sup>14</sup>, ha sido intensamente desarrollado durante las últimas décadas, al probar ser una herramienta útil para comprender al fenómeno de cambio climático (e.i., costos, daños y efectos del cambio climático o de políticas de mitigación). Ya en 1996, se contaban con más de veinte modelos IAM, diseñados para proveer información sobre partes específicas del problema.

La literatura científica proporciona algunas revisiones y comparaciones de modelos IAM (Foell, 1980; Grubb, 1993; Idso, 1984; Kickert et al., 1999; Mohnen et al., 1991; Rotmans y Dowlatabadi, 1998). (Nordhaus, 1995) ofrece una descripción de la relación entre el clima y el desarrollo económico. (Fernández-Armesto, 2002) explica desde un punto de vista más general la relación entre clima, medio ambiente y desarrollo humano.

## Ventajas y Debilidades

Debido a la amplitud de los sistemas que modelan, al horizonte de tiempo que consideran, y a su alto nivel de agregación, estos modelos no suelen ser aptos para analizar el impacto de tecnologías específicas en el cambio climático. Lo que sí se puede estudiar con ellos son los impactos no representados en los modelos puramente energéticos o económicos como los cambios en la composición de la atmósfera o en el nivel del mar.

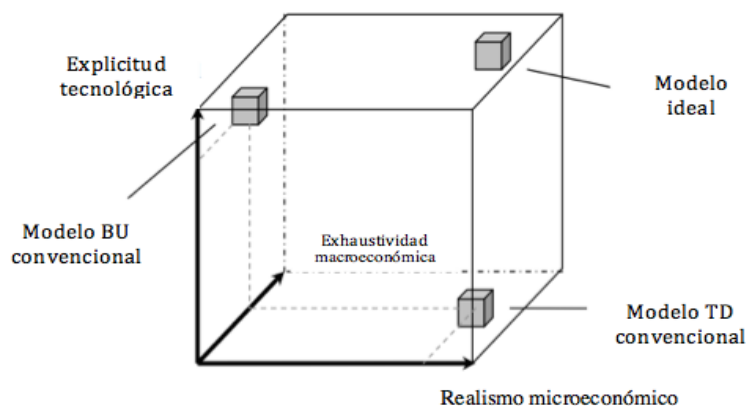
<sup>14</sup> El primer Modelos IAM fue introducido por Nordhaus en 1991.

### 3.3.4 Modelos Híbridos

Como se vio anteriormente, los modelos BU y TD, poseen tanto ventajas como debilidades. Si bien los modelos BU tienen la bondad de describir a gran detalle las tecnologías subyacentes en un sistema energético, carecen de fundamento teórico microeconómico necesario para comprender el comportamiento de agentes económicos al momento de elegir las tecnologías, así como también de la posibilidad de capturar los feedbacks macroeconómicos.

En contraste, los modelos TD, si bien resuelven las debilidades de modelos de uso final, al representar los feedbacks macroeconómicos en un marco de equilibrio, no proveen una descripción realista de las tecnologías ni de las medidas o decisiones que conllevan a su evolución.

**Ilustración N° 7: Representación de Modelos BU y TD**



**Fuente:** (Fabien Roques, Olivier Sassi, Céline Guivarch, Henri Waisman, Renaud Crassous, Jean-Charles Hourcade , 2009)

La tradicional dicotomía BU vs TD, ha ido desapareciendo gradualmente, gracias al desarrollo de modelos que tienen la capacidad de combinar el gran detalle tecnológico, el realismo microeconómico así y también los feedbacks macroeconómicos. En otras palabras, han logrado beneficiarse de las ventajas tanto de los modelos BU como TD.

Estos modelos son los denominados modelos híbridos, que si bien surgieron a causa de las limitaciones de los modelos mencionados anteriormente, en la actualidad integran modelos ingenieriles y Top Down en un solo modelo.

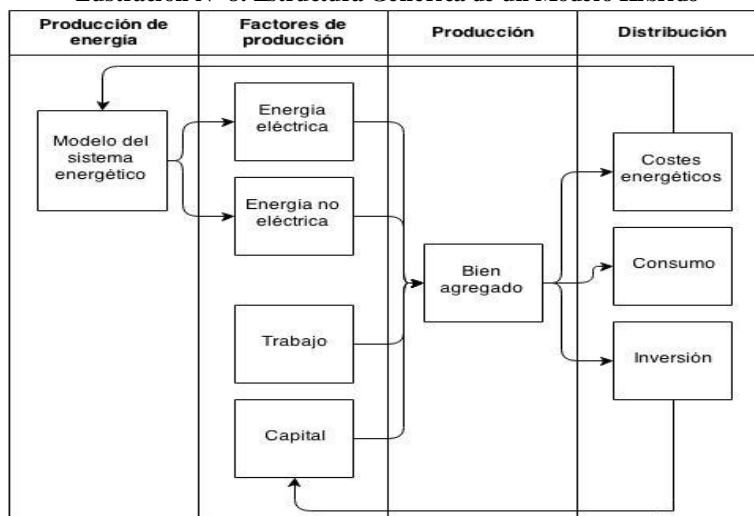
### Estructura del Modelo

Al integrar un modelo BU con uno TD es fundamental garantizar la capacidad intrínseca de un modelo de capturar la información proveniente del otro modelo y fundamentalmente compartir la superposición de áreas en el modelado donde el dialogo entre ambos modelos es posible. Muchos modelos de equilibrio general hacen uso de funciones de producción predeterminadas para representar la tecnología de los diferentes sectores de producción. La información proveniente del modelo BU puede ser utilizada para mejorar la calibración de dichas funciones.



El crecimiento económico es descrito mediante una función agregada de producción en la que las diferentes formas de energía se agregan como factores primarios de producción. Las actividades de producción de energía no pueden describirse separadamente según esta formulación, por lo cual la función agregada de producción se acopla a un modelo ingenieril detallado que represente adecuadamente el funcionamiento del sistema energético.

**Ilustración N° 8: Estructura Genérica de un Modelo Híbrido**



**Fuente:** (González, Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medio ambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES)

## Revisión de Modelos y Trabajos Realizados

Dentro de la literatura se encuentran modelos BU o TD que evolucionaron en torno a la una arquitectura híbrida, lo cual significa la inclusión de feedbacks macroeconómicos dentro de modelos BU (MANNE and WENE, 1992) o realismo microeconómico (RIVERS y JACCARD 2005) para la elección de tecnología o modelos TD que incorporan descripción tecnológica explícita dentro de su marco de equilibrio general (McFARLAND et al., 2004). En el trabajo de Schaffer and Jacoby (2005) se utilizó un modelo BU del sector de transporte para mejorar la calibración de la elasticidad de sustitución. Otras referencias literarias se presentan a continuación: Boyd et al., 1990; Laitner et al., 2003; Lakhani, 1980; Pandey, 2002; Samouilidis y Mitropoulos, 1982; Tessmer et al., 1975; Viguiet et al., 2003).

## Ventajas y Dificultades

Los modelos híbridos capturan la diversidad tecnológica con mayor detalle y algunos tratan de asegurar la consistencia macro económica de los supuestos del modelo. En principio, mediante este método, se pueden capturar los efectos de las actividades económicas informales así como también del uso de energías tradicionales. Sin embargo el alto nivel de complejidad que implica el acoplamiento de los modelos debido a los obstáculos computacionales parece ser su mayor debilidad.

## 4. Modelos Energéticos<sup>15</sup>

En esta sección se describen algunos de los modelos más importantes en la comunidad de modelaje energético. Cada modelo descrito en esta sección se encuentra acompañado por un caso de aplicación del mismo. Si bien existe una amplia gama de modelos energéticos, los siguientes son los más representativos de la categoría al que cada uno de ellos pertenece, sin embargo, en la sección de Anexos, se podrá encontrar mayor detalle sobre otros de los modelos más relevantes a la fecha.

### 4.1 El modelo Long-Range Energy Alternatives Planning Model LEAP

A continuación se detallan las principales características de uno de los modelos de mayor tradición de elaboración por los sectores oficiales y académicos a nivel mundial: el modelo LEAP.

#### 4.1.1 Descripción

El modelo LEAP es un modelo de planificación energética integral cuyo alcance cubre la demanda y oferta energética, el análisis de costo beneficio y el análisis de recursos naturales y medio ambiente. La metodología que sigue el modelo es el de simulación Bottom-Up, basado en la descripción física del sistema energético y de la creación de escenarios de desarrollo tecnológico y de impactos ambientales. El modelo LEAP es una herramienta útil para el desarrollo de estudios de escenarios energético ambientales integrados. No solo permite realizar pronósticos dadas una serie de restricciones, si no también realizar análisis sobre la mitigación de los gases de efecto invernadero, balances energéticos, inventarios medioambientales y planificaciones integrales.

Los datos que este modelo precisa se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla N° 2: Variables del Modelo LEAP**

| <b>VARIABLES MACROECONÓMICAS</b>   |   |
|--|---|
| <b>Variables de conducción sectorial</b>                                   | Valor agregado/GDP  |
| <b>Mayor de talle de variables de conducción</b>                           | Producción energética de materiales                             |
| <b>DATOS SOBRE LA DEMANDA DE ENERGÍA</b>                                   |   |
| <b>Totales de sector y subsector</b>                                       | Combustible usado por sector o subsector                        |
| <b>Uso final y tecnología</b>  | Costos de tecnología  |
| <b>Características del sector y subsector</b>                              | Precio y respuesta del mercado                                  |
| <b>DATOS SOBRE EL ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA</b>                            |   |
| <b>Características del suministro de energía, transporte y facilidades</b> | Capital, costos y rendimiento                                   |
| <b>Planes de suministro de energía</b>                                     | Nuevas capacidades en fechas en línea, costos y características |
| <b>Recursos energéticos y precios</b>                                      | Reservas de combustible fósil o fuentes renovables              |
| <b>OPCIONES DE TECNOLOGÍAS</b>   |   |
| <b>Costos de tecnología y rendimiento</b>                                  | Capital, costos y rendimiento                                   |
| <b>Penetración de tarifas</b>  | Porcentaje de stock nuevo existente reemplazado por año         |
| <b>Costos administrativos y de programas</b>                               | Emisiones por unidad consumida, producida o transportada        |
| <b>Factores de emisiones</b>   |   |

**Fuente:** Elaboración propia

<sup>15</sup> En Anexo A se encuentra una descripción de otros modelos importantes dentro de la revisión literaria.

Para su análisis prospectivo, el modelo hace uso del software con el mismo nombre que fue creado en 1980 por el *Beijer Institute's Fuelwood Project* como una herramienta flexible de largo plazo para la planificación de energía integral. El programa permite la estructuración de los datos para crear balances energéticos, proyecciones de la demanda y escenarios para la oferta, evaluar las tendencias del impacto del cambio climático sobre la economía, así como también medidas de mitigación de los gases del efecto invernadero por sobre el sistema energético.

Debido a sus propiedades, el modelo LEAP ha sido intensamente desarrollado durante los últimos años. Entre algunas de las aplicaciones del modelo se encuentran el modelo desarrollado por la FAO de planificación de la energía a partir de materia orgánica en el área urbana del sur de Asia; el Estudio del Transporte Integral realizado en Texas, la elaboración Estudios Energéticos Globales desarrollados por el Instituto Tellus en coordinación con Greenpeace; el Plan de Acción frente a la Emisión los Gases de Efecto Invernadero y el estudio del Transporte en las Ciudades Asiáticas desarrollado en Tailandia.

Las principales características y atributos del modelo LEAP son presentadas a continuación:

**Tabla N° 3: Descripción del Modelo LEAP**

| CRITERIO                         | LEAP  |
|----------------------------------|---|
| <b>Origen</b>                    | SEI Boston USA (1997)   |
| <b>1. Propósito</b>              |   |
| <b>General:</b>                  | Prospección y elaboración de escenarios.  |
| <b>Específico:</b>               | Análisis de comportamiento de demanda, oferta, impactos medioambientales, aproximación integral, evaluación de recursos renovables, planificación integral energética, análisis del ciclo energético. |
| <b>2. Cobertura sectorial</b>    | Nivel desagregado   |
| <b>3. Metodología</b>            | Simulación (LEAP 2011) basado en la descripción física del sistema energético y de la creación de escenarios de desarrollo tecnológico y de impactos ambientales.                                     |
| <b>4. Cobertura geográfica</b>   | Local, nacional, regional y global.   |
| <b>5. Horizonte temporal</b>     | Medio a largo plazo.  |
| <b>6. Requerimiento de datos</b> | Cuantitativos, monetarios a nivel agregado o desagregado. No precisa datos históricos,  |
| <b>7. Aplicación</b>             | Países industrializados y en vías de desarrollo.  |

**Fuente:** Elaboración propia

## Análisis de la Demanda Energética

Para estudiar el comportamiento de la demanda, este modelo considera la tecnología como el acoplamiento de la estructura del consumo energético de cada sector de la economía- que evoluciona de acuerdo a la velocidad de ajuste económico y el crecimiento económico- y de modelos macro energéticos (Aliaga J. y Herrera A., 2014).

Los cálculos se basan en la desagregación de las actividades económicas y sociales en Niveles de Actividad, que miden el consumo energético por sector (como los hogares), subsector (como el sector rural), finalidades de uso energético (como la electrificación) y aparatos (como estufas por ejemplo) de una economía. Estos niveles se ordenan de forma jerárquica, tal que el primero de los niveles es representado en términos absolutos, mientras que los siguientes se presentan en términos proporcionales, es decir porcentajes de

participación y de saturación. Para las categorías más bajas de la estructura jerarquizada, se definen las intensidades anuales energéticas por unidad de nivel de actividad.

Al multiplicar cada nivel de actividad por la intensidad energética anual, se obtiene el consumo energético del sector de análisis determinado.

$$\text{Consumo Energético} = \text{Nivel de Actividad} * \text{Intensidad Energética}$$

La metodología para analizar la energía útil de una economía, es decir el nivel de actividad sectorial, es multiplicada el nivel de actividad por la razón de intensidad energética útil en términos de la eficiencia.

$$\text{Consumo Energético} = \text{Nivel de Actividad} * (\text{Intensidad Energética Útil} / \text{Eficiencia del sector})$$

La energía consumida a partir de un análisis de Stock, también es otra alternativa del modelo para estimar la demanda energética. De acuerdo a esta metodología, el stock de capital es multiplicado por el nivel de intensidad energética por aparato electrónico. En esta metodología, el nivel de Stock es modelado de forma endógena, en base al nivel actual de artefactos electrónicos, ventas de nuevos artefactos y el perfil de los mismos.

$$\text{Consumo Energético} = \text{Stock} * \text{Uso energético por aparato electrónico}$$

Para analizar el consumo energético del sector de transporte se multiplica el stock de capital del sector por la razón de millas por vehículo sobre el combustible de la economía. Esta metodología permite modelar las emisiones de polución a partir de la función de millas por vehículo.

$$\text{Consumo Energético} = \text{Stock} * (\text{Millas por vehículo} / \text{Combustible})$$

Una vez calculados los niveles de consumo energético, se puede obtener el nivel de eficiencia energética final para cada fuente energética, información que es necesaria para calcular la demanda energética para el año base y la demanda de cada escenario planteado:

$$\text{Demanda } (b, s, t) = \text{Actividad Total } (b, s, t) * \text{Eficiencia Energética } (b, s, t)$$

Donde  $b$  hace referencia a cada rama del modelo;  $s$  el escenario que no es considerado al momento de calcular la demanda del año base;  $t$  que representa el año que se asume es cero para el año base; y la *Actividad Total* para cada tecnología que es calculado como el producto de la actividad total de todas las ramas del modelo:

$$\text{Actividad Total} = \text{Actividad}(b_1, s, t) * \text{Actividad}(b_2, s, t) * \dots * \text{Actividad}(b_n, s, t)$$

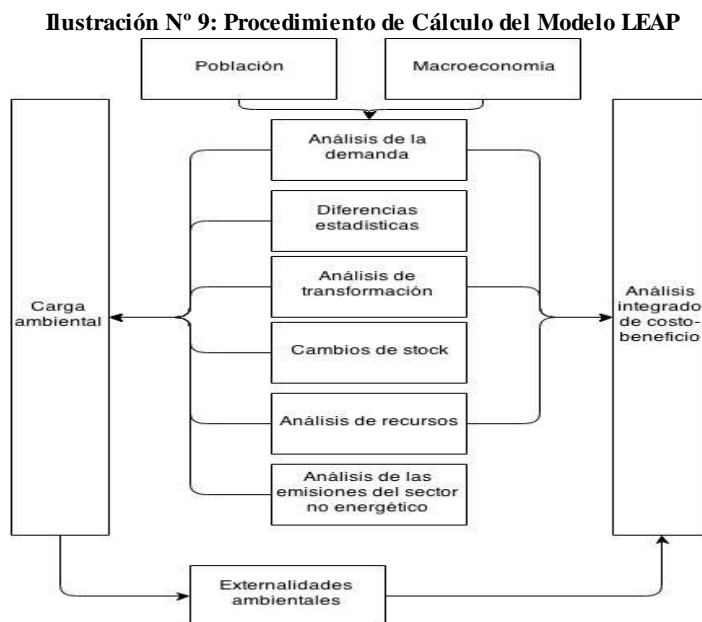
Donde  $b_1$  representa la rama de origen;  $b_2$  es la rama que depende de  $b_1$  y así sucesivamente hasta  $b_n$ .

La estructura de este modelo permite la generación de escenarios alternativos, a partir de la modificación de variables exógenas, e.i. características globales de toda la economía como la tendencia demográfica, o características particulares de cada sector de la economía. En consecuencia, es posible analizar la evolución de la demanda a nivel desagregado por fuente energética, en periodos específicos de tiempo y en cada sector de la economía, así como también estudiar la evolución de la demanda total.

Heaps (2002), recomendando seguir los siguientes pasos para el análisis de la demanda energética:

1. Definir el orden de la estructura desagregada del consumo energético.
2. Construir un árbol jerárquico, ubicando en la parte superior al sector de estudio y en la parte inferior las tecnologías y combustibles de uso final.
3. Identificar las variables socio-económicas (niveles de crecimiento poblacional o económico) de interés siguiendo el mismo procedimiento de jerarquización.
4. Estimar la demanda energética.

En la siguiente Ilustración se muestra el procedimiento de cálculo:



Fuente: Fei Teng, Alun Gu, Maosheng Duan, 2007

## **Análisis de Escenarios**

Los usuarios del modelo LEAP, pueden crear y evaluar escenarios alternativos mediante la comparación de requerimientos energéticos, costos, beneficios económicos y sociales, además de los impactos medioambientales. A partir de la modificación de los perfiles demográficos, económicos o de regulaciones medioambientales, se pueden construir escenarios alternativos para así determinar la evolución del consumo desagregado en la economía.

## **Ventajas y Limitaciones**

Las ventajas más sobresalientes del modelo LEAP se reflejan en su flexibilidad y facilidad de uso, lo que le permite al usuario pasar rápidamente de la planificación de políticas, al análisis del efecto de las mismas.

Si bien el modelo LEAP puede ser usado para identificar los escenarios de menor costo, no generan escenarios óptimos o de equilibrio de mercado. Otra debilidad es que el modelo no logra estimar los impactos de política energéticas en el PIB o en el empleo, es decir la interacción entre el modulo macroeconómico con los otros módulos continúa abierto.

#### **4.1.2 Un Ejemplo de Aplicación del Modelo LEAP**

El Proyecto Promoviendo la Generación de Electricidad Renovable en Sudamérica REGSA financiado por la Unión Europea, es una iniciativa que tiene el objetivo de mejorar las condiciones de la participación de energías renovables dentro de la generación eléctrica en países como Bolivia, Brasil y Chile. Dentro de sus iniciativas se encuentra el desarrollo de escenarios energéticos.

Durante el 2012 se desarrolló el estudio “Escenarios Energéticos 2007-2025” en Bolivia que buscó definir los potenciales escenarios respecto a los principales agregados energéticos de la matriz energética boliviana durante el periodo de estudio.

El estudio fue realizado con ayuda del modelo, utilizando el año 2007 como base.

##### **Escenario de Referencia**

El estudio describe un escenario de referencia que proporciona una descripción del sistema energético boliviano, que utiliza para su estimación datos del Plan de Desarrollo Energético del Ministerio de Hidrocarburos y Energía. Los resultados de este escenario deberían verse como un patrón de referencia para la evaluación de políticas alternativas que puede ser mejorada si se implementan las políticas apropiadas.

Según este escenario de referencia, el crecimiento del consumo neto total de energía entre el periodo 2007-2025 sería de 3,4% (de 31,872 kBep a 57,908 kBep en el 2025). El mayor crecimiento de los sectores de consumo de energía final sería el sector industrial con una tasa de crecimiento de 4%. La intensidad energética útil crecería al 1.7%. La electricidad pasara del 9.8% del consumo neto total en el año base al 11,9% mientras que el gas natural sería el recurso con el mayor incremento, pasando de 21.11% a 25.9%. La generación bruta total de electricidad crecería al 4.5% anual acumulado en todo el periodo del escenario BAU.

##### **Escenario de Mitigación**

El escenario alternativo propuesto incorpora los efectos de políticas de eficiencia energética así como de sustitución de lámparas incandescentes por las de bajo consumo, así como también de refrigeradores de alto consumo energético por otros de consumo eficiente. La implementación de cocinas a leña, fue otra medida de las medidas tomadas en cuenta.

Debido a la implementación de dichas medidas, el crecimiento de energía sería menor al del BAU, llegando al 2025 solo a 53,210 kBep, es decir a una tasa de 2.9%. A diferencia del escenario de referencia, el consumo del sector industrial solo crecería a una tasa de 3.5% mientras que la intensidad energética útil crecería a un 2%.

Debido a la introducción de aparatos electrónicos eficientes, la electricidad pasaría del 9.8% del consumo neto total del año base a un 10.4%. El consumo neto de gas pasaría a ser el 2025 un 35.8%. Dentro de las proyecciones de abastecimiento de energía, se prevé que la Generación Bruta Total de Electricidad llegaría al 3.2%. La generación de electricidad en 2025 utilizaría 4,698 kBep menos de Gas Natural que en el escenario BAU, debido a la incorporación de generación Geotérmica y a las medidas de eficiencia energética propuesta como parte del escenario de mitigación.

## 4.2 El modelo Prospective Outlook for the Long-term Energy System POLES

A continuación se detallan los principales aspectos de una de las herramientas de modelaje más útiles para abordar cuestiones energético, y que es utilizado para simular la demanda y oferta de cerca de 32 países en 18 regiones del mundo: el modelo POLES.

### 4.2.1 Descripción

El modelo POLES es un modelo híbrido de simulación concebido para desarrollar escenarios a largo plazo (2050) que describan el suministro y la demanda de energía en diferentes regiones del mundo. El modelo se estructura en una serie de módulos interconectados entre sí que permiten analizar los mercados internacionales de la energía, los equilibrios energéticos regionales, y, a nivel nacional, la demanda de energía y los sistemas de producción de electricidad y de energía primaria.

Las principales variables exógenas son el PIB y la población de cada región, mientras que los precios de la energía se calculan. En un periodo dado, la oferta y demanda de energía en cada región responden con diferentes retrasos a variaciones en los precios internacionales de la energía que se han producido en periodos anteriores. Las ecuaciones de cada módulo tienen en cuenta la combinación del efecto de los precios y de las restricciones técnicas y económicas, además de desfases temporales y tendencias (de crecimiento económico y demográfico, de difusión de tecnologías, etc.). La versión actual del modelo divide el mundo en 47 regiones, siendo Europa y los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos OCDE las regiones con mayor nivel de detalle geográfico.

Tabla N° 4: Descripción del Modelo POLES

| CRITERIO                | POLES  |
|-------------------------|--|
| Origen                  | LEPII-EPE de Francia y IPTS de Comisión Europea  |
| 1. Propósito            |  |
| General:                | Desarrollo de escenarios.  |
| Específico:             | Describir y analizar el suministro y demanda energética, mercados internacionales, equilibrio energético, análisis de sistemas de producción de electricidad y energía primaria. |
| 2. Cobertura sectorial  | Híbrido  |
| 3. Metodología          | Simulación   |
| 4. Cobertura geográfica | Internacional, regional y nacional.  |
| 5. Horizonte temporal   | Medio a largo plazo.   |
| 6. Variables exógenas   | PIB y datos demográficos   |
| 7. Variables endógenas  | Precios  |

Fuente: Elaboración propia

Para cada región el modelo consiste en cuatro módulos. Los módulos regionales producen la demanda de energía y la capacidad de exportación de cada zona, que se integran en el módulo de mercados internacionales de la energía. Se considera un único mercado mundial de petróleo, y tres mercados regionales (América, Europa y Asia) para el carbón y el gas, para poder tener en cuenta sus diferentes costes, mercados y estructuras técnicas. Estos módulos están centrados en:

## **La Demanda de Energía Final**

El cálculo de la demanda de energía final combina el impacto del cambio de precios y niveles de actividad con tendencias tecnológicas exógenas, a un nivel de detalle sectorial relativamente alto. En cada zona, el consumo nacional de energía se desagrega en once sectores. Estos sectores son homogéneos desde el punto de vista de precios, actividad, consumo y tecnología. En cada sector el consumo de energía se calcula separadamente para la electricidad y para el conjunto de combustibles sustituibles entre sí. Las ecuaciones de demanda de energía por sectores combinan elasticidades con respecto al PIB, a la actividad y al precio, a largo y a corto plazo, con desfases temporales, asimetrías en el efecto de los precios, tendencias tecnológicas y efectos de saturación. Las variables de actividad de cada sector se calculan a partir de hipótesis exógenas de crecimiento demográfico y económico. Las ecuaciones de sustitución de combustibles consideran las rigideces que implican los equipos existentes y la capacidad que tienen los equipos más modernos para usar distintos tipos de combustible.

## **Las Tecnologías Energéticas Emergentes o Renovables**

El módulo de tecnologías energéticas emergentes o basadas en recursos renovables considera los potenciales técnicos y económicos de estas tecnologías, así como los parámetros que caracterizan sus procesos de difusión. Este módulo introduce elementos tales como curvas de aprendizaje y nichos de mercado. Se distinguen diez tecnologías genéricas que puedan ser importantes en el desarrollo a largo plazo de los sistemas energéticos. El horizonte temporal del modelo es el año 2050, lo cual hace considerar que las tecnologías que podrían tener un peso destacado por esas fechas deberían haber superado en la actualidad sus primeras fases de desarrollo.

## **El Sistema de Producción de Electricidad y de Energía Primaria**

El sistema eléctrico de cualquier país no es sólo uno de los sectores que más energía consumen, sino que probablemente es además el sector más importante para la competencia o sustitución entre combustibles. A causa de la longevidad de sus equipos, este sector tiene una elasticidad precio más alta a largo plazo que a corto. Las restricciones de capacidad se consideran en el módulo calculando la evolución de la capacidad en cada periodo como una función de las decisiones de inversión tomadas en los periodos previos, de la demanda prevista y de los costes variables. Se distinguen doce tecnologías para la generación de electricidad. La curva de demanda en cada región es endógena, calculada a partir de las demandas sectoriales de electricidad mediante el uso de coeficientes de carga para dos días típicos del año, uno de invierno y otro de verano.

## **El Suministro de Energía Primaria**

La producción de petróleo y gas de cada región se simula usando un modelo completo del proceso de descubrimiento de reservas. Los datos disponibles para cada región se componen de estimaciones de las cantidades máximas recuperables de petróleo y gas, de los sondeos y la producción acumuladas desde el comienzo de las actividades extractivas, y de la evolución de las reservas. Los descubrimientos acumulados se calculan sumando la



producción acumulada a las reservas que permanecen sin explotar. La producción de los países que no pertenecen a la Organización de países exportadores de petróleo OPEP se calcula a partir de sus reservas y de una tasa de agotamiento de recursos. Los países de la OPEP ajustan su producción hasta satisfacer la demanda mundial tras tener en cuenta lo que se produce fuera de la OPEP. El proceso es muy similar para el gas y el carbón, siendo la diferencia principal que los mayores productores de cada mercado son los que ajustan su producción para satisfacer la demanda total.

Las ecuaciones de los precios internacionales de la energía son una de las características más importantes de POLES. El precio mundial del petróleo depende a corto plazo de las variaciones en la tasa de uso de la capacidad de producción de los países del Golfo Pérsico. A medio y a largo plazo dependen también de la relación entre reservas y producción, es decir, del ritmo de extracción de recursos. El precio del gas en cada mercado depende de la variación de la relación entre reservas y producción de sus suministradores principales, y del coste de transporte del gas. La producción de carbón se ajusta completamente a la demanda puesto que en el horizonte de simulación de POLES las reservas de carbón no pueden agotarse. Las variaciones en el precio del carbón en algunos de los principales países productores reflejan el incremento de costes que tienen al aumentar la producción. Estas variaciones determinan los cambios en los precios internacionales del carbón.

## **Los Sectores Industriales en POLES**

POLES representa los sectores industriales de un modo muy simplificado, ligando la producción de acero a la evolución del PIB y de la población mediante una relación econométrica. La demanda de energía derivada de la actividad industrial es función a su vez de otra relación econométrica que depende de la producción de acero. La descripción tecnológica de estos sectores es muy simple, y no hay ninguna representación de los mercados industriales.

Recientemente se han empezado a desarrollar nuevos módulos de POLES para representar con más detalle los sectores económicos con mayor consumo energético, que serían los más afectados por las regulaciones medioambientales. Por el momento se han conseguido modelar las industrias del acero y del cemento, aunque se pretende modelar otros sectores como el del transporte u otras industrias como la del aluminio, la de refino de petróleo, o la de producción del papel.

El modelo ISIM (Hidalgo et al., 2005) simula la evolución de la industria del acero y permite estudiar en particular la producción, demanda y comercio de acero a escala mundial, así como el consumo de energía, las emisiones de CO<sub>2</sub>, y la evolución tecnológica del sector. El modelo CEMSIM de la industria del cemento (Szabo et al., 2006) se compone de una serie de módulos interconectados que determinan la producción y demanda de cemento, su comercio, la manera en que se produce, y cómo evoluciona la capacidad de producción.

Ambos modelos permiten estudiar, en el contexto del Protocolo de Kioto, los posibles impactos sobre estos sectores que tendría la implantación de diferentes sistemas de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Además, permiten analizar la evolución tecnológica de estas industrias bajo diferentes condiciones.

## 4.2.2 Un Ejemplo de Aplicación de POLES

El modelo POLES se ha usado recientemente en proyectos como WETO (World Energy Technology Outlook) (Lapillonne et al., 2003). WETO proporciona un marco coherente para analizar la evolución del sector energético, en términos tecnológicos y medioambientales y a escala global, hasta el año 2030. De esta manera, el uso del modelo POLES sirve como apoyo al desarrollo de políticas Europeas a largo plazo sobre cuestiones como:

- La seguridad del suministro de energía
- El Espacio Europeo de Investigación
- Los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero previstos en el Protocolo de Kioto, y los objetivos medioambientales post-Kioto.

Utilizando POLES, y haciendo uso de un conjunto claramente definido de hipótesis sobre actividad económica, población, y recursos energéticos fósiles, WETO describe con gran detalle la evolución de los sistemas energéticos en Europa y en el mundo, teniendo en cuenta los impactos de las políticas contra el cambio climático. El riguroso análisis de escenarios a largo plazo, prestando particular atención a la Unión Europea en un contexto global, sirve como ayuda para el desarrollo de mejores políticas energéticas, tecnológicas y medioambientales.

### Escenario de Referencia

Según este escenario, la demanda mundial de energía aumentaría un 1.8% al año entre 2000 y 2030. El impacto del crecimiento económico y demográfico (respectivamente 3.1% y 1% anual), estaría contrarrestado por un descenso de la intensidad energética del 1.2% anual, debido al efecto combinado de los cambios estructurales de la economía, el progreso tecnológico, y la subida de los precios de la energía. Los países industrializados experimentarían una ralentización en el crecimiento de su demanda energética, al contrario que en los países en desarrollo. En 2030, más de la mitad de la demanda energética mundial provendría de los países en desarrollo, que absorben el 40% del consumo mundial en la actualidad.

El sistema energético mundial continuará dominado por los combustibles fósiles, que representarían casi el 90% del suministro de energía en 2030.

El petróleo continuaría siendo la principal fuente de energía (34%), seguido por el carbón (28%). Casi dos tercios del aumento en el suministro de carbón entre 2000 y 2030 vendrían de Asia. Se espera que el gas natural represente un cuarto del suministro energético mundial en 2030; la mayor parte del cual estaría proporcionado por la generación de electricidad. En la UE, el gas natural se convertiría en la segunda fuente de energía, por detrás del petróleo pero por delante del carbón y del lignito. La energía nuclear y las renovables supondrían algo menos del 20% del suministro energético de la UE.

A causa del continuo dominio de los combustibles fósiles, las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> aumentarían más rápidamente que el consumo de energía, al 2.1% anual. En 2030 las emisiones de CO<sub>2</sub> serían más del doble que en 1990. En la UE aumentarían un 18% con respecto al nivel de emisiones en 1990, mientras que en los Estados Unidos el incremento sería casi del 50%. Mientras que las emisiones de los países en desarrollo representaban el 30% del total mundial en 1990, en 2030 pasarían a producir más de la mitad de las emisiones mundiales.

Existen reservas de petróleo suficientes para satisfacer la demanda prevista en los próximos 30 años. Sin embargo, el descenso de las reservas convencionales de petróleo más allá de 2030 podría ser preocupante. Este descenso estaría compensado en parte por un aumento en las reservas no convencionales. Las reservas de gas natural son abundantes y se espera que aumenten un 10%. En el horizonte de tiempo considerado no habría restricciones en las reservas de carbón.

La producción mundial de petróleo aumentaría un 65% hasta alcanzar los 120 millones de barriles diarios en 2030, de los cuales el 75% provendría de los países de la OPEP. La OPEP produciría el 60% del suministro mundial de petróleo en 2030, cuando producía el 40% en 2000. La producción de gas se duplicaría entre 2000 y 2030. Las disparidades regionales en cuanto a reservas y costes de producción modificarían el patrón de suministro en 2030. Casi un tercio de la producción mundial se originaría en países de la antigua Unión Soviética, mientras que el resto se repartiría por igual entre las demás regiones. La producción de carbón también se doblaría en este periodo. El mayor crecimiento tendría lugar en Asia y en África, donde sería extraído más de la mitad del carbón en 2030.

Los precios del petróleo y del gas sufrirían un considerable aumento desde los niveles actuales. El barril de petróleo alcanzaría los 35 €/barril<sup>11</sup> en 2030, mientras que el gas se pagaría a 28, 25 y 33 €/barril en los mercados euroafricano, americano, y asiático respectivamente. Se espera que las diferencias regionales de precio disminuyan notablemente, reflejando combinaciones de suministro de gas más comparables. El precio del carbón permanecería casi estable alrededor de los 10 €/barril.

La demanda de energía final crecerá a un ritmo similar al de la demanda bruta de energía. Puesto que todos los sectores económicos crecerían a un ritmo similar, la demanda energética de cada sector tendría un peso casi constante: alrededor del 35% correspondería a la industria, un 25% al transporte, y un 40% al sector terciario y residencial. La demanda de energía por sectores presentaría diferencias regionales. En los países desarrollados la demanda del sector terciario tendría el crecimiento más rápido. En los países en desarrollo todos los sectores experimentarían un crecimiento del 2% al 3% anual.

La electricidad continuará su penetración en todas las regiones, y supondrá un cuarto de la demanda de energía final. El consumo de carbón bajará en las regiones industrializadas. La biomasa será progresivamente abandonada en los países en desarrollo. El petróleo seguiría siendo el combustible dominante, representando entre el 40% y el 50% de la demanda de energía final, dependiendo de la región.

La producción de electricidad aumentará a una tasa del 3% anual. Más de la mitad de la generación en 2030 será llevada a cabo usando tecnologías surgidas en los noventa y posteriormente, como turbinas de gas de ciclo combinado, tecnologías avanzadas de carbón y renovables.

La proporción del gas natural en la generación eléctrica aumentará en las regiones de mayor producción de gas (en la antigua Unión Soviética, Oriente Medio, y América del Sur). La del carbón bajará en todas las regiones, salvo en América del Norte, donde se estabilizaría, y en Asia, donde aumentaría significativamente. La generación de origen nuclear no seguiría el de la producción total de electricidad, y su proporción pasaría a ser del 10% en 2030. Las fuentes de energía renovables pasarían del 2% de la producción de electricidad en 2000 al 4%, sobre todo por la rápida penetración de la energía eólica.

## **Escenario Alternativo A: Sensibilidad a los Cambios en los Recursos Fósiles y a los Desarrollos Tecnológicos**

Si las reservas de combustibles fósiles fueran más bajas, los precios del carbón y del gas serían mucho mayores que en el escenario de referencia, alcanzando los 40 €/barril de petróleo en 2030. Esto induciría un descenso de la demanda mundial de energía (-3%), que favorecería particularmente al carbón y a las energías renovables, y haría descender la demanda de gas natural (-13%) y petróleo (-6%). Como consecuencia de una menor demanda energética, las emisiones de CO<sub>2</sub> estarían un 2% por debajo de las emisiones del escenario de referencia.

Por el contrario, un aumento de las reservas de gas natural conduciría a una bajada de su precio hasta los 16, 20 y 28 €/barril en América, Europa y Asia respectivamente. El precio del petróleo bajaría ligeramente, reflejando el limitado potencial de sustitución entre petróleo y gas. Aunque la demanda mundial de energía aumentaría sólo un 1.5%, el suministro de energía cambiaría sustancialmente a favor del gas natural (+21%) y en detrimento del carbón (-9%), el petróleo (-3%) y la electricidad primaria (4%).

Un desarrollo acelerado de las tecnologías de generación de electricidad provocaría cambios en la estructura de la producción de electricidad. Las consecuencias de este desarrollo tecnológico sobre las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> estarían limitadas por el peso de este sector. La disponibilidad de tecnologías avanzadas podría tener un considerable impacto en el coste de reducción de emisiones.

## **Escenario Alternativo B: Impacto de las Políticas sobre Cambio Climático**

Por medio de la asignación de un valor al carbono al usar combustibles fósiles, las emisiones de CO<sub>2</sub> de la UE en 2030 serían inferiores en un 26% a las del escenario de referencia. A escala mundial y en la mayoría de las regiones, esta reducción se alcanzaría por similares cambios en la demanda de energía y en la intensidad de carbono del consumo de energía.

En el escenario de reducción de emisiones de carbono, más de la mitad de la demanda mundial de energía se alcanzaría en el sector industrial. El descenso en la intensidad de carbono sería causado principalmente por la sustitución de carbón, lignito, y en cierta medida incluso de petróleo, por gas y biomasa. La demanda de gas permanecería estable a medida que el cambio de combustibles a favor del gas tuviera lugar. Por el contrario el consumo de biomasa y la producción de energía nuclear aumentarían considerablemente mientras que la energía hidráulica y la geotérmica permanecerían estables.

### **4.3 El Modelo Híbrido WEM-ECO**

La Agencia Internacional de Energía, en conjunto con CIRED utilizó el método de hibridación para evaluar los efectos macroeconómicos de un acelerado crecimiento de China e India en la economía, medio ambiente y energía. El modelo híbrido fue resultado de la integración del modelo WEM World Energy Model y el modelo IMACCLIM-R. El resultado del proceso de hibridación es un modelo de equilibrio parcial con alto nivel de detalle tecnológico del sector energético que es actualizado anualmente para computar los escenarios energéticos al 2030 del WEO World Energy Outlook.

Para comprender el funcionamiento del modelo, es necesario hacer una descripción de los dos modelos que se integraron en el proceso. El primero es el conocido modelo BU WEM utilizado desde 1993 por la IEA para realizar proyecciones a largo plazo y el segundo es el modelo de equilibrio general TD IMACLIM R.

### 4.3.1 El modelo World Energy Model WEM

El modelo de equilibrio parcial WEM, es un modelo de simulación que cubre el sistema energético global diseñado para replicar el funcionamiento de los mercados energéticos y es actualmente la principal herramienta utilizada por la IEA para generar proyecciones detalladas, e.i. sector por sector y región por región, para los escenarios del World Energy Outlook. Al tener una amplia cobertura, el modelo precisa de datos extensos que provistos por las bases de datos de la IEA.

Este modelo integral E3, fue diseñado específicamente para realizar y analizar proyecciones globales y regionales de la demanda, oferta, patrones comercio internacional y balances energéticos al 2035; el impacto sobre el medio ambiente por el uso energético; los impactos de decisiones políticas como de mitigación de los gases de efecto invernadero y cambios en la tecnología; y finalmente para analizar los requerimientos de inversión en el campo energético para satisfacer la demanda energética al 2035.

**Tabla N° 5: Descripción del modelo WEM**

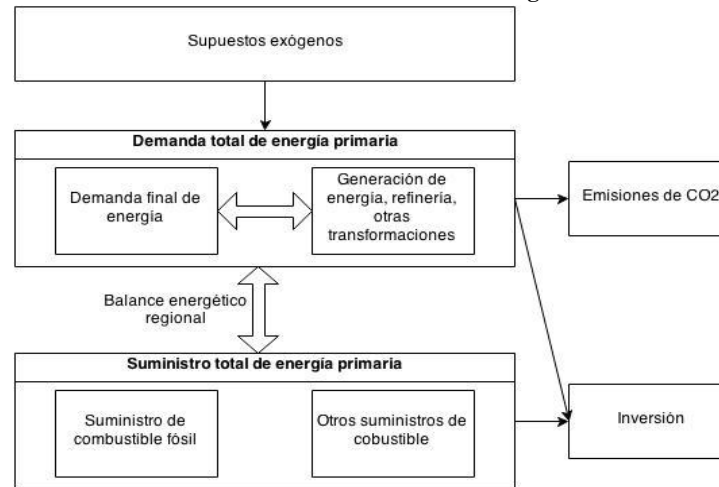
| CRITERIO                       | WEM   |
|--------------------------------|---|
| <b>1. Propósito</b>            |   |
| <b>General:</b>                | Análisis prospectivo.   |
| <b>Específico:</b>             | Análisis de mercado energético, oferta, demanda, patrones comerciales y balances energéticos. |
| <b>2. Cobertura sectorial</b>  | Bottom up para la demanda e híbrido o Bottom Up para la oferta.                               |
| <b>3. Metodología</b>          | Simulación, técnicas econométricas  |
| <b>4. Cobertura geográfica</b> | Global y regional.  |
| <b>5. Horizonte temporal</b>   | Medio a largo plazo.  |
| <b>7. Aplicación</b>           | Países industrializados y en vías de desarrollo.  |
| <b>8. Paquete aplicable</b>    | VENSIM entre otras.   |

**Fuente:** Elaboración propia

Este consta de tres módulos principales: consumo final energético, transformación energética y oferta de recursos energéticos fósiles. Los outputs del modelo incluyen las necesidades de inversión y costos en el sector energético, emisiones de CO<sub>2</sub>, precios por el uso final y flujos de energía por combustible. Para obtener dichos resultados, este se basa en supuestos exógenos (tales como el crecimiento económico y demográfico) que determinan la evolución de las variables utilizadas en el proceso de computo de la demanda y oferta energética.

El siguiente esquema ilustra el funcionamiento de este modelo:

**Ilustración N° 10: Resumen del Modelo Energético Mundial**



**Fuente:** (Fabien Roques, Olivier Sassi, Céline Guivarch, Henri Waisman, Renaud Crassous, Jean-Charles Hourcade , 2009)

## Estructura Del Modelo

El modelo WEM es un modelo de simulación que cubre la oferta, transformación y demanda energética en el cual se utilizan modelos de stock final para caracterizar la infraestructura energética. Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas al campo energético y las inversiones relacionadas al desarrollo energético son también capturadas por el modelo. Utiliza en diferentes partes del modelo, funciones Logit y Weibull, para determinar la distribución tecnológica basada en sus costos específicos (inversión, operación, mantenimiento, de combustible y en algunos casos, costos de emisión de CO<sub>2</sub>).

Los supuestos exógenos conciernen al crecimiento económico, demográfico y al desarrollo tecnológico. El consumo eléctrico y los precios de la electricidad enlazan la demanda energética final con el sector de transformación. El consumo de los principales derivados del petróleo es modelado de forma individual en cada sector de uso final y el modelo de refinación enlaza la demanda individual de sectores de producción con los diferentes tipos de derivados.

La demanda de energía primaria sirve como input para los módulos de oferta. Finalmente se obtiene la demanda para cada sector y sub sector, respetando el nivel de eficiencia de todas las tecnologías de uso final.

## La Demanda Energética

La demanda es modelada a nivel desagregado, tomando en cuenta los sectores industrial, doméstico y de transporte y con un alto nivel de detalle de uso final. La demanda energética final es el resultado de la sumatoria del consumo energético en cada sector de demanda final energética. La demanda energética está en función de variables de actividad que están determinadas por variables socioeconómicas y precios de uso final.

Los determinantes de la demanda tales como el tamaño de los hogares, son estimados econométricamente y basado en fuentes de datos históricas y determinantes socioeconómicos. Todos los módulos de uso final basan sus proyecciones en stocks de

infraestructura energética existente. Ello incluye el número de vehículos en el sector de transporte, la capacidad de producción en la industria y el área de las construcciones. De esta forma se modela la demanda de energía útil a nivel detallado e.i. calefacción, consumo por aparatos y aire acondicionado en el sector residencial de la economía.

Dado que el modelo tiene el objetivo de tomar en consideración los cambios en la estructura del sistema energético, políticas y desarrollo tecnológico, son integrados en el modelo un amplio rango de tecnologías que pueden satisfacer cada servicio energético.

## La Oferta Energética

La estimación de la oferta es realizada a nivel desagregado por fuentes de energía primaria. Para cada una de las fuentes es elaborado un modelo específico utilizando metodologías diferentes. Las tendencias de la producción de petróleo, por ejemplo, son modeladas utilizando la metodología BU que busca replicar las decisiones de inversión en la industria del petróleo, analizando la rentabilidad de las reservas en el nivel proyectado. Para estudiar las tendencias de gas natural, se utiliza la metodología híbrida de la integración de métodos BU y TD.

## Ventajas y Debilidades

Sin embargo, y a pesar de que el modelo hace uso de herramientas fundamentadas en la teoría económica, como las elasticidades, para aproximar la variación de los precios al momento de proyectar la demanda, no garantiza dicho modelo la consistencia entre supuestos macroeconómicos, cambio de precios energéticos y la evolución de las características tecnológicas del sector energético.

### 4.3.2 Modelo IMACLIM-R

El modelo IMACLIM-R es un modelo computable capaz de permitir un dialogo tanto entre las ciencias económicas, energéticas como naturales. Fue desarrollado debido al interés de evaluar la sostenibilidad energética a partir de una óptica integral.

**Tabla N° 6: Descripción del modelo IMACLIM-R**

| CRITERIO                         | IMACLIM R   |
|----------------------------------|---|
| <b>1. Propósito</b>              |   |
| <b>General:</b>                  | Análisis prospectivo.                                       |
| <b>Específico:</b>               | Análisis de oferta, demanda                                 |
| <b>2. Cobertura sectorial</b>    | Integral  |
| <b>3. Metodología</b>            | Proceso iterativo Bottom Up-Top Down                        |
| <b>4. Cobertura geográfica</b>   | Global y regional.  |
| <b>5. Horizonte temporal</b>     | Medio a largo plazo.  |
| <b>6. Requerimiento de datos</b> | Datos monetarios y físicos asociados a vectores de precios. |

**Fuente:** Elaboración propia

## Metodología

El modelo busca comprender (i) el rol que juegan variables técnicas dentro de la oferta, (ii) los cambios estructurales en la demanda final para bienes y servicios y finalmente (iii) el comportamiento de parámetros micro y macroeconómicos (Crassous Renaud et al., 2010).

Para lograr su objetivo, el modelo IMACLIM R hace uso tanto de variables cuantificables en términos monetarios, como de variables físicas<sup>16</sup>, asociadas a vectores de precios. Esta doble visión de la economía, permite que las proyecciones se funden sobre una sólida base económica (impacto de políticas de mitigación sobre el sistema, fallas de mercado o y/o la interdependencia racional del comportamiento de los agentes económicos que interactúan en el sistema) y técnica (análisis de economías a escala, impacto del mecanismo de *learning by doing* o saturación del progreso productivo).

Adicionalmente, abandona las funciones convencionales de producción que, después de Bernt and Wood (1975) y Jorgenson (1981), solían ser consideradas como funciones ideales para imitar la tecnología. Mientras que la ausencia de una función de producción formal<sup>17</sup>, se compensa por una estructura recursiva que permite el intercambio de información sistemático entre un módulo estático de equilibrio y módulos dinámicos, e.i. un proceso iterativo TD/BU. El primero imita al modelo input-output de Leontief<sup>18</sup>, que provee información, en el periodo  $t$ , sobre los precios relativos, niveles de output, flujos físicos, distribución de la inversión entre sectores y tasas de beneficio para cada uno de los sectores, mientras que el módulo dinámico incluye información demográfica, de la dinámica del capital y modelos ricos en detalle tecnológico a nivel desagregado y los resultados del equilibrio estático anterior para así evaluar la reacción de los sistemas técnico, enviando esa información de vuelta al módulo estático en la forma de nuevos coeficientes Input Output para el cálculo del periodo siguiente en  $t+1$ .

### 4.3.3 El Modelo WEM-ECO

El modelo WEM ECO, es resultado del intercambio iterativo de información entre los modelos WEM e IMACLIM R. El procedimiento de este acoplamiento consiste en modificaciones iterativas de las variables conductoras de cada modelo a partir de la información proveniente del otro modelo. Para el modelo WEM, los supuestos contenidos en los sets de variables de actividad y precios energéticos son modificados durante el proceso de asolación, mientras que en el modelo IMACLIM, es el set respecto a la evolución de los coeficientes técnicos del sector energético que sufre las modificaciones mientras que los otros supuestos y parámetros (para ambos modelos) permanecen exógenos.

### Metodología

La estructura del modelo IMACLIM R simplifica el proceso de acoplamiento con un modelo de equilibrio parcial al conjugar tanto un marco de equilibrio general como uno en el cual existe una descripción detallada del sector energético para demanda final,

<sup>16</sup> Estas pueden ser energéticas y no energéticas. En el primer caso se encuentran por ejemplo, los flujos físico de energía (Sands et al., 2005). En cuanto a las variables físicas no energéticas, se encuentran por ejemplo: pasajeros por kilómetros, toneladas por kilómetro o toneladas de aluminio o cemento. Las dos primeras hacen referencia a los sectores de transporte, mientras que las dos últimas al sector industrial.

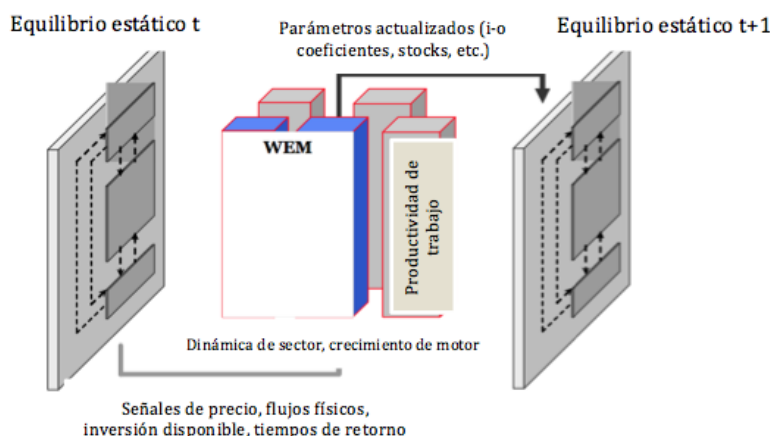
<sup>17</sup> Hourcade, 1993, reconoce el hecho de que es casi imposible encontrar funciones con propiedades matemáticas adecuadas para cubrir trayectorias lejanas al equilibrio de referencia y lo suficientemente flexibles para cubrir diferentes escenarios de cambio estructural resultantes de la interacción de estilos de consumo, tecnologías y patrones de localización.

<sup>18</sup> “El método Input-Output es una adaptación de la teoría neoclásica del equilibrio general al estudio empírico de la interdependencia cuantitativa entre actividades económicas interrelacionadas que esta soportado por una tabla Input Output que describe el flujo de bienes y servicios entre los distintos sectores de la economía nacional durante un periodo fijado en el tiempo” Leontief (1957;p. 70) .



transformación y oferta de energía primaria. Los flujos energéticos son expresados en términos físicos y los commodities no son transados bajo los supuestos del modelo de Armington, que permite un mejor control exógeno sobre los flujos de intercambio energético con el objetivo de tener en cuenta la información proveniente del modelo WEM.

**Ilustración N° 11: Estructura Dinámica recursiva de WEM-ECO**



**Fuente:** (Fabien Roques, Olivier Sassi, Céline Guivarch, Henri Waisman, Renaud Crassous, Jean-Charles Hourcade , 2009)

EL proceso iterativo será realizado hasta que se converge a una solución estacionaria en la que las reacciones técnicas del modelo WEM no modifican las variables de actividad y tendencias de precios generados por el modelo IMACLIM que son utilizados como determinantes exógenos. El acoplamiento de ambos modelos puede ser realizada a partir de técnicas agregadas o profundamente integradas<sup>19</sup>

### Ventajas y Debilidades

La arquitectura dual del modelo, facilita el dialogo entre la comunidad de expertos pertenecientes tanto al campo económico como energético. De esta forma se permite capturar el conocimiento proveniente de diferentes áreas involucradas y brindar una descripción comprensiva sobre sistema económico completo, permitiendo evaluar escenarios 3E con mayor claridad.

#### 4.3.4 Ejemplo de aplicación de WEM-ECO

El modelo WEM ECO fue utilizado para generar los escenarios de referencia y de crecimiento acelerado del World Energy Outlook 2007. Este último fue construido con el objetivo de evaluar el impacto en la economía mundial del crecimiento acelerado (1.5 puntos porcentuales superior al del escenario de referencia) de las economías de China e India.

Dentro de los resultados obtenidos con ayuda del modelo, se encuentra en primer lugar y a consecuencia del crecimiento económico abrupto de China e India, un incremento de la

<sup>19</sup> Para mayor información acerca de las técnicas de acoplamiento consultar Integrated Modelling of Economic-Energy-Environment Scenarios, The Impact of China and India's Economic Growth on Energy Use and CO2 Emissions de Roques Fabian et al., (2009) p. 9.

demanda de ambos países en un 17.4% superior al del escenario de referencia el 2030. La creciente demanda energética de ambos países es el principal conductor del aumento de los precios del mercado energético, dado que el alza de sus demandas lleva a la necesidad de explotar costosos recursos.

Mientras tanto, la demanda de energía primaria y emisiones de dióxido de carbono, se incrementarían, siendo un 6% y 7% mayores a las del escenario de referencia a nivel internacional. Sin embargo el impacto de la demanda energética varía entre regiones, dependiendo de las variaciones del PIB de cada región y de la sensibilidad de la elasticidad precio de la demanda. Es así como la demanda aumenta en unas regiones y disminuye en otras. En el medio oriente por ejemplo, la demanda se incrementa notoriamente en un 11% comparado al 2030, debido a su crecimiento acelerado resultado de la alza de los precios del petróleo y gas. Mientras que en Latinoamérica, decrece debido a los altos precios y el crecimiento económico menor al del escenario de referencia.

#### 4.4 El modelo Model for Evaluating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies MERGE<sup>20</sup>

##### 4.4.1 Descripción

El modelo MERGE es un modelo diseñado para estimar los efectos de la reducción de gases de efecto invernadero a nivel regional y global. El modelo tiene la capacidad de abordar, integrando el conocimiento de diversas áreas de estudio, el amplio rango de asuntos controversiales que emergen con el fenómeno del cambio climático, a saber: costos de medidas de mitigación, daños provocados por el cambio climático, proyecciones y tasas de descuento.

**Tabla N° 7: Descripción del Modelo MERGE**

| CRITERIO                         | MERGE   |
|----------------------------------|---|
| <b>1. Propósito</b>              |   |
| <b>General:</b>                  | Análisis prospectivo.   |
| <b>Específico:</b>               | Demanda y oferta energético, planificación, análisis de uso de recursos alternativos, costos de cambio climático. |
| <b>2. Cobertura sectorial</b>    | Integral  |
| <b>3. Metodología</b>            | Algoritmos de simulación y optimización.  |
| <b>4. Cobertura geográfica</b>   | Global y regional.  |
| <b>5. Horizonte temporal</b>     | Medio a largo plazo.  |
| <b>6. Requerimiento de datos</b> | Datos monetarios y físicos asociados a vectores de precios.   |
| <b>7. Paquete aplicable</b>      | GAMS  |

**Fuente:** Elaboración propia

MERGE contiene sub modelos entre los que se encuentran los de (i) economía nacional e internacional, (ii) emisiones de gases de efecto invernadero proveniente de los usos energéticos (iii) como de usos agentes al sistema energético y finalmente (iv) cambio climatológico global.

<sup>20</sup> Mayor detalle ver cita [26]

## Estructura del Modelo

La economía doméstica de cada región es vista como un modelo Ramsey-Solow de crecimiento óptimo a largo plazo. Las elecciones inter temporales están fuertemente influenciadas por una tasa de descuento valorada en términos de utilidades. El nivel de respuesta frente a variaciones en los precios es introducido dentro del modelo a través de funciones de producción top Down. El Output del modelo depende de los inputs de capital, mano de obra y energía. Las emisiones relacionadas al sistema energético son proyectadas a partir de una perspectiva Bottom up. Se definen tecnologías diferentes para cada fuente de energía eléctrica como también no eléctrica. Las demandas de combustible son estimadas a través de un “proceso de análisis”. Las emisiones de cada periodo se traducen en niveles de concentración global modificando indicadores de cambio climático, como el cambio de la temperatura.

El modelo MERGE puede ser operado de dos modos. El primero a partir de un análisis de efectividad de costos<sup>21</sup>, mientras que el segundo a partir de un análisis de costo beneficio<sup>22</sup>. Se definen regiones geopolíticas individuales. Las opciones de reducción de este fenómeno se distinguen debido a la región, periodo de tiempo y el gas de efecto invernadero a ser reducido.

Por el gran tamaño del modelo y su complejidad, con 20,000 restricciones al 2004<sup>23</sup>, existen una gran serie de posibles elecciones de algoritmos de programación no lineal. Para su resolución se hace uso de sistemas de modelaje de alto nivel para la programación matemática y optimización, tales como el GAMS General Algebraic Modeling System.

GAMS es un programa de software diseñado para modelar problemas de optimización lineal, no lineal e integrada. Este tiene la facilidad de abordar problemas complejos y con amplias restricciones.

## 5. Conclusiones

El modelaje energético es una herramienta de vital importancia para el estudio y la evaluación de la viabilidad de decisiones de inversión en el sector, así como también de la implementación de políticas energéticas, económicas y/o de mitigación del cambio climático, al encontrarse estos tres sectores íntimamente relacionados.

En respuesta a las necesidades económicas y sociales del momento, los modelos energéticos se han ido modificando desde sus orígenes en el sector de la industria eléctrica. Dando como resultado una amplia gama de modelos que abordan cuestiones relacionadas al sector a partir de diferentes ópticas y aproximaciones metodológicas, que fue motivo de estudio en las secciones anteriores.

La gran diversidad de modelos con los que se cuentan en la actualidad puede significar un trabajo agobiante para el modelador si es que este no está familiarizado con el sector o con los mismos instrumentos, e.i. los atributos de los modelos energéticos, sus principales

---

<sup>21</sup> En esta primera aproximación se supone que la trayectoria temporal de emisiones antropógenas provenientes de negociaciones de comercio internacional, satisface las restricciones de concentración global.

<sup>22</sup> En esta segunda aproximación se supone la elección de la trayectoria temporal de emisiones de gases de efecto invernadero que maximice la utilidad del consumo descontada, aun teniendo en cuenta la des utilidad del cambio climático.

<sup>23</sup> De acuerdo al trabajo MERGE de Manne S. Alan y Richels G. Richard (2004).

características, bondades y limitaciones. En consecuencia, pueden llegarse a conclusiones absurdas a partir de la implementación de una de estas herramientas.

Sin embargo, es importante señalar que esto también constituye una dificultad para quienes cuentan con una trayectoria en la materia, dado que la elección de un modelo energético junto a sus supuestos subyacentes y técnicas de resolución, constituyen más que una ciencia, un arte; que como cualquier otro, solo puede ser alcanzado con ayuda de dos pilares fundamentales: el conocimiento teórico y la práctica constante.

Este documento de trabajo fue elaborado con la finalidad de proporcionar al lector un marco introductorio o bien los cimientos de las bases del primero de estos pilares, partiendo de una breve reseña de la evolución de estos modelos; de las principales características a ser tomadas en cuenta al momento de elaborar un modelo; de la clasificación de estos y finalmente, del estudio más detallado de algunos de los modelos energéticos más utilizados dentro de la literatura.

## **Anexo A**

### **A.1 Modelos BOTTOM UP**

#### **A.2 El Modelo Markal Allocation MARKAL**

Modelo más utilizado y más conocido de la familia de modelos de optimización desarrollado en Estados Unidos por el Brookhaven National Laboratory. Utiliza programación lineal como técnica para generar modelos de equilibrio energético y económicos, a partir de la maximización de la utilidad y minimización de costos, los que incluyen desde la explotación, importación y exportación hasta las variables de operación, transmisión y distribución de la energía. Posee una cobertura total del sistema energético y puede ser adaptado para capturar características de países en vías de desarrollo.

Los objetivos de este modelo se los puede resumir en los siguientes puntos:

- Identificar los programas o proyectos de planificación de menor costo, evaluando las opciones bajo el contexto energético, e.i. balance energético, restricciones de política ambiental.
- Estimar tanto los precios de energía y demanda, a partir de la maximización del excedente del productor/consumidor en el horizonte temporal de planificación, como de las emisiones de gases de efecto invernadero e intensidad de usos de las tecnologías tradicionales y alternativas.

Al ser un modelo estrictamente energético, no establece relaciones con otros sectores económicos, lo cual impide al usuario hacer análisis a niveles de profundidad económica. Para resolver esta debilidad, se diseñó el modelo MARKAL MACRO. Este modelo tiene la capacidad de resolver simultáneamente los sistemas energéticos y económicos, es decir, tiene la capacidad de estudiar los impactos de las medidas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono, ya no solo en las tecnologías mismas sino también en el crecimiento del PIB.

#### **A.3 El Modelo MARKAL-MACRO**

El modelo MARKAL-MACRO maximiza el bienestar del consumidor, optimiza la inversión agregada y provee la configuración del sistema de menor costo. Precios de energía y costos de energía son determinados simultáneamente durante la optimización y a diferencia del modelo MARKAL, la demanda es determinada endógenamente. Los costos relativos de la energía determinan el tipo y nivel de sustitución de portadores energéticos y tecnologías.

Este modelo adopta una función de producción de elasticidad de sustitución constante (CES). El modelo resuelve para un consumidor representativo óptimo, donde todas las variables relevantes son agregadas.

### **A.2 Modelos TOP DOWN**

#### **A.2.1 El Modelo GEM-E3**

El Modelo GEM-E3 es un modelo dinámico, con propósitos generales y de equilibrio general que tiene los objetivos principales los de: evaluar políticas y programas relacionados

al cambio climático; analizar mecanismos de regulación ambiental (impuestos, subsidios, permisos de polución, y bonos verdes entre otros); evaluación de programas de infraestructura y tecnología de las consecuencias de dichos programas sobre la equidad y cohesión social, políticas y empleo.

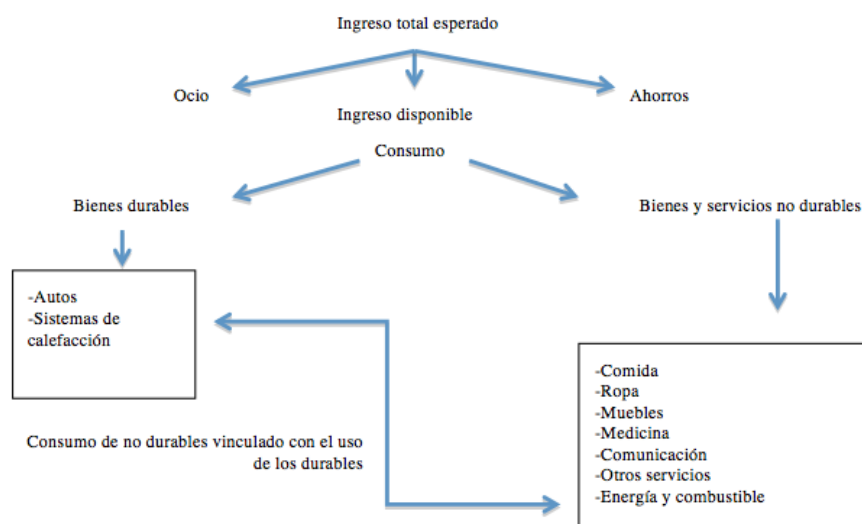
Este modelo es construido a partir de la estructura de la matriz SAM y funciones explícitas de producción y demanda, que son las bases para recrear el modelo de equilibrio general en que los precios se determinan endógenamente y vacían los mercados de bienes, insumos y factores productivos.

## Metodología

La demanda y oferta energética son aproximadas en el modelo a partir del desarrollo de estructuras de consumo y planes de producción, que son diseñados a partir de estructuras jerarquizadas

El consumo es jerarquizado de la siguiente forma:

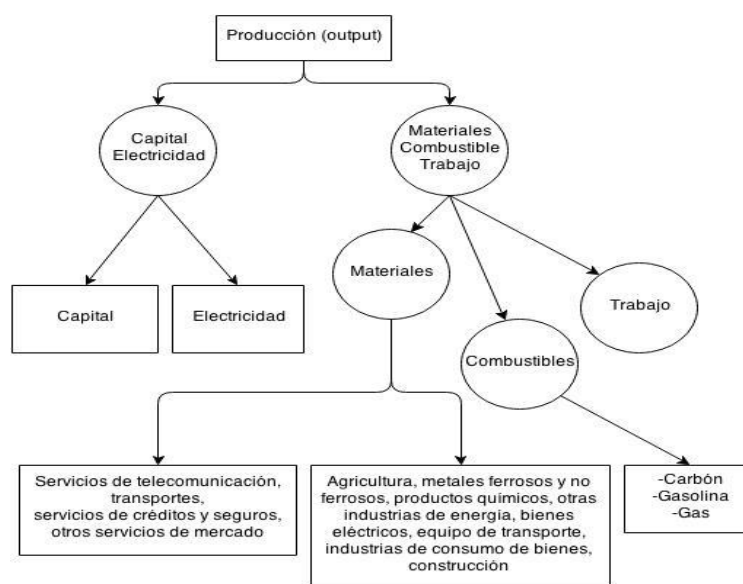
**Ilustración N° 12: Estructura Jerarquizada del Consumo**



**Fuente:** Institute of Computers and Communications Systems National Technical University of Athens General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment. P21

En el caso de la producción podemos apreciar en el gráfico siguiente, una estructura jerarquizada separable que involucra el capital, mano de obra, energía y otros materiales, basado en el tipo de función de producción CES. A partir de los datos de la matriz SAM, se realiza la estimación de las elasticidades de sustitución de los factores a través de técnicas econométricas.

**Ilustración N° 13: Esquema de Producción Anidada en GEM-E3**



**Fuente:** Institute of Computers and Communications Systems National Technical University of Athens General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment. P24

### A.2.2 El Modelo EPPA MIT

El modelo EPPA es un modelo de equilibrio general dinámico y recursivo diseñado para analizar políticas de cambio climático. Este modelo hace uso de funciones de elasticidad constante CES para describir la producción y el consumo entre regiones y sectores de la economía.

El modelo MIT EPPA es una versión del modelo EPPA en el que se introducen tecnologías adicionales a las tecnologías convencionales como ser: biomasa, energía eólica y energía. Para este efecto el modelo hace uso de datos de costos provenientes de una aproximación de corte ingenieril, que junto a los datos del modelo EPPA, provenientes de la matriz SAM y cuentas energéticas físicas, reflejen las diferencias regionales en el costo estructural del sector eléctrico.

Este procedimiento permite representar de forma explícita los cambios entre las tecnologías del proceso, lo cual puede ser visto a partir de los coeficientes de sustitución de los inputs. La sustitución entre recursos energéticos y/o entre los factores de producción, representan lo que en los modelos BU sería considerado como cambios discretos entre una tecnología y otra.

La síntesis de las características principales del modelo se las puede apreciar a continuación.

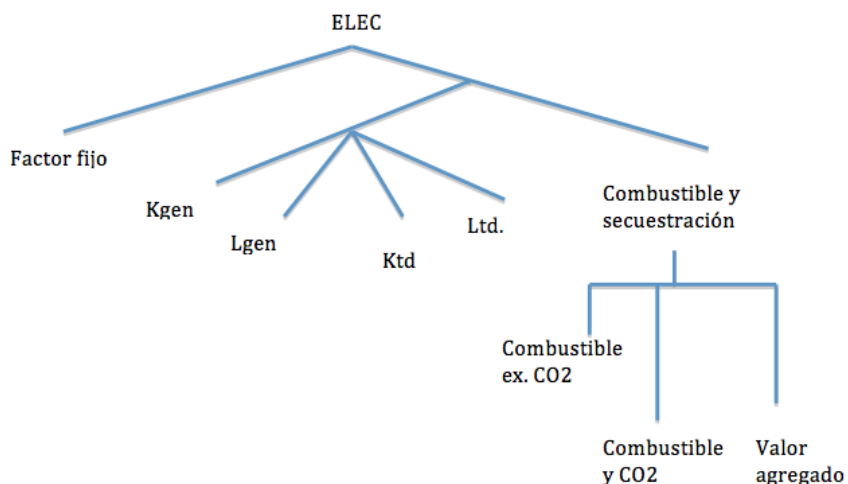
### Metodología

Dada la estructura de costos del modelo CGE, se considera que el total del costo de energía eléctrica es producto de la generación, transmisión, distribución y secuestro o almacenamiento de carbono. A partir de este criterio, se calculan los costos relativos de la electricidad para las tecnologías introducidas en el modelo (NGCC, Gas CCS y Coal CCS).

Los costos estimados a partir del modelo BU son categorizados en las esferas de capital, combustible, mantenimiento y operaciones además de administración. A partir de estos datos se estiman las participaciones de los inputs que pueden ser utilizados directamente como parámetros de la función CES. Las participaciones del capital y del combustible ofrecen una perspectiva de como un cambio de los precios de los factores de producción afectan a cada tecnología.

Una vez separados los varios componentes del costo, se desarrolla la estructura CES y subsecuentemente se especifican las elasticidades de sustitución.

**Ilustración N° 14: Estructura CES de anidación de tecnologías CCS**



**Fuente:** McFarland J., Reilly J. and Herzog H. Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information (2002). P. 8



### 3.4 Anexo B

#### B. Modelo BOTTOM-UP VS TOP-DOWN<sup>24</sup>

| TOP-DOWN   | BOTTOM-UP  |
|--|--|
| Las decisiones se determinan por factores que suceden en el Top  | Las decisiones de agentes se determina por restricciones específicas, que suceden en el Bottom   |
| Modelo de corte macroeconómico: dispone de una fuerte consistencia con la teoría económica.  | Modelo de corte microeconómico: dispone de una base de ingeniería en el que se especifican los requerimientos energéticos de los equipos y máquinas para determinar el consumo energético. |
| Mayor agregación sectorial   | Desagregación sectorial. Uso final   |
| Aproximación: Equilibrio de Mercados   | Aproximación: Equilibrio Parcial, Optimización y Simulación.   |
| Representación de tecnología implícita: funciones de producción.   | Detalle tecnológico explícito: especifica requerimientos energéticos.  |
| Evalúa costos-beneficios a través de impactos en PIB, ingreso y producción.  | Evalúa costos-beneficios de tecnologías particulares.  |
| Parámetros macroeconómicos (Precios, PIB, elasticidades) endógenos, lo que establece vínculo directo entre actividades energéticas y económicas. | Parámetros macroeconómicos (como el PIB) calculados de forma exógena.  |
| Precios, tasas de interés y salarios se ajusta a partir de mecanismos de mercado.  | Precios son determinados exógenamente.   |
| Representan las tecnología a partir de funciones de producción y el comportamiento de agentes mediante funciones de utilidad                     | Representa explícitamente la tecnología del sistema  |
| Captura el comportamiento de agentes económicos, del mercado y otras instituciones económicas.   | Análisis independiente del comportamiento del mercado, agentes económicos y otras instituciones económicas   |
| Subestima el potencial de mejoras en la eficiencia.  | Sobreestima el potencial de mejoras en las eficiencias.  |
| Tiene fines predictivos  | Tiene fines de simulación de escenarios  |
| Captura retroalimentaciones 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: Elaboración Propia a partir de los trabajos revisados.

<sup>24</sup> Fuente: ampliación de trabajo de Van Beeck N, Classification of Energy Models (1999) Pág. 12.

### 3.5 Anexo C

#### Definiciones

Los siguientes términos aparecen recurrentemente a lo largo del trabajo. Para una mayor comprensión del contexto en el que son usados, se presentan a continuación sus respectivas definiciones.

**Análisis prospectivo.-** Técnica basada en la construcción de escenarios para explorar el futuro.

**Algoritmo.-** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema a partir de una secuencia de pasos a seguir.

**Balance Energético.-** Es un instrumento de contabilización del flujo energético en las diferentes etapas y actividades de la cadena energética. Las unidades que se utilizan para este efecto, pueden ser o bien unidades físicas (Giga Vatios hora. o Toneladas Métricas), unidades energéticas (Barriles Equivalentes de Petróleo o Tera Jules)

**Black Box.-** Es un término que se le otorga a todo sistema cuyos inputs y output son conocidos pero sin un conocimiento claro del funcionamiento del mismo. Un ejemplo de Block Box son los algoritmos utilizados dentro de la estructura de un modelo.

**Bottom Up.-** Este concepto se refiere a los modelos energéticos de carácter desagregado centrados en el análisis detallado de las dimensiones técnicas y económicas de políticas específicas.

**Demanda Energética Desagregada.-** Demanda que considera las necesidades energéticas a nivel sectorial.

**Modelo energético.-** Esta denominación es utilizada para designar “cualquier herramienta, metodológica u otro tipo, necesaria para resolver problemas energéticos”. Su objetivo es el de explicar el funcionamiento de sistemas complejos de manera simple y comprensible.

**Calibración.-** Fase que tiene por objeto mejorar la bondad o credibilidad de los parámetros estimados en el modelo.

**Coeficientes Energéticos.-** Coeficientes estimados a partir de análisis estadístico, de insumo producto o de procesos, que permiten medir la participación de la energía en la actividad productiva. Entre los más comunes se encuentran: unidades energéticas físicas / unidades físicas del producto principal (Kep/tn cemento); unidades energéticas físicas / unidades monetarias del producto principal (Kep/ dólar de valor de producción); unidades económicas del insumo energético/ unidades económicas del producto principal (valor del insumo energético / valor de la producción).

**Coeficientes Físicos.-** Coeficientes que dependen estrechamente de la tecnología o función de producción utilizado para cada producto (e.g. cal/Tn cemento) Estos coeficientes permiten analizar el consumo de energía en cada actividad productiva y su relación con el valor de la producción

**Eficiencia Energética.-** Se le denomina eficiencia energética a todas las acciones que conllevan a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, garantizando un nivel de calidad igual o superior y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía.

**Eficiencia Termodinámica:** Es el ratio de contenido energético de la electricidad producida sobre el contenido energético del input de combustible.

**Escenario.-** Representación de la evolución de un sistema energético en el tiempo, bajo un panorama socioeconómico particular y restricciones de política energética determinadas.

**Escenarios de Referencia Business as Usual.-** Descripción consistente y plausible sobre la evolución del sistema energético en el futuro, en ausencia de nuevas y explícitas políticas energéticas y de mitigación de emisiones de efecto invernadero.

**Escenarios Alternativos.-** Incorporan hipótesis marcadamente diferentes a las del escenario de referencia, para realizar el análisis prospectivo y comparar sus resultados con los del Business as Usual.

**Energía.-** En un sentido económico, la energía es un bien heterogéneo de demanda final y de demanda intermedia destinada a satisfacer las necesidades de actividades primarias, secundarias y terciarias, así como de consumo doméstico.

**Energía Primaria.-** Referida a la energía tal cual es provista por la naturaleza. Son de tipo convencionales y no convencionales. En el primer grupo se encuentran recursos tales como el carbón, petróleo, gas natural. En el segundo grupo se encuentran aquellos provenientes de fuentes energéticas nucleares; renovables como la hidráulica y las nuevas energías, que engloban la solar, eólica, biomasa y geotérmica entre otros.

**Energía Secundaria.-** Es la energía obtenida a partir de una fuente primaria u otra secundaria.

**Fuentes energéticas.-** Energía destinada a proveer movimiento (energía mecánica), a la energía destinada a proporcionar calor (energía térmica) y a la energía relacionada a la proporción de electricidad (energía eléctrica).

**Función de Elasticidad de Sustitución Constante CES.-** Es una función generalizada que se caracteriza por poseer una elasticidad de sustitución constante.

**Horizonte de Simulación.-** Longitud del periodo de tiempo del análisis energético.

**Intensidad Energética.-** Definida como el ratio entre consumo de energía primaria y Producto Interno Bruto. Es utilizado para medir la eficiencia en el uso de la energía de una economía.

**Matriz de Contabilidad Social SAM.-** Matriz cuadrada que puede ser entendida como una fotografía de los flujos monetarios internos de una economía. En esta matriz, cada cuenta está representada por una fila y columna y puede ser leída como una tabla Input Output a lo Leontieff. Sirve como base de datos para la creación de modelos económicos y para organizar la información sobre la estructura económica y social de una economía en un periodo dado de tiempo.

**Matriz Energética.-** Representación de la energía disponible en una región que alberga desde el proceso de obtención de energía primaria, posterior transformación en energía secundaria hasta su distribución a los sectores que precisan de la misma.

**Módulo Energético Homogéneo.-** Concepto referido a la desagregación y agrupación de unidades de consumo energético en diversas categorías que presentan cierta unicidad en sus modos de consumo. En cada sector del sistema económico se realiza la caracterización y selección de los módulos homogéneos en base a diferentes criterios (sociales, económicos, demográficos, climático, espaciales, tecnológicos o de abastecimiento de determinadas fuentes energéticas) lo cual permite identificar y cuantificar los requerimientos energéticos de cada unidad de consumo.

**Potencia.-** Energía consumida que puede consumir un aparato durante un tiempo determinado medido en KW.

**Seguridad Energética.-** Garantía del abastecimiento, instalación y sostenibilidad ambiental o social de un recurso energético determinado. La seguridad energética depende del nivel mundial de las reservas, de la capacidad de extraerlas y transportarlas a los mercados mundiales, de la volatilidad de los precios resultante de interrupciones físicas o de movimientos especulativos en los mercados.

**Sistema Energético.-** Puede ser entendido como la sucesión de actividades que permiten satisfacer los requerimientos de energía de una sociedad. Es representado por cadenas energéticas interconectadas que están asociadas a componentes de carácter económico, institucional y ambiental.

**Tecnología.-** Es entendida como el conjunto de técnicas que se utilizan para transformar los factores de producción tales como el capital, la mano de obra y la energía, en productos finales.

**Top Down.-** Este concepto hace referencia a modelos de carácter agregado es decir aquellos elaborados a partir de la aplicación de teorías macroeconómicas y de técnicas econométricas para modelar la demanda y oferta energética de los principales sectores de una economía.

**Uso.-** modalidad de consumo de energía en un equipo o artefacto en los sectores socio económico.

**Simulación.-** Es una técnica numérica diseñada para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo.

**Coste del Ciclo de Vida.-** El coste de la vida de cualquier equipo es el coste total de toda su vida que incluye la compra, instalación, funcionamiento, mantenimiento y retirada de dicho equipo. Determinar este coste implica seguir una metodología que identifique y cuantifique todos los componentes que forman la ecuación de este coste.

**Giga Vatios Gw.-** Medida de energía eléctrica equivalente a mil millones de vatios o un millón de kilovatios

**Toneladas Equivalentes a Petróleo Tep.-** Valor que equivale a la energía en términos de toneladas de petróleo. Sirve como parámetro de comparación entre diferentes fuentes energéticas dentro del Balance Energético.

**Tera Vatio por Hora TWh.-** Unidad energética que equivale al billón de vatios. Esta medida es utilizada para informar sobre la producción energética de las centrales eléctricas durante un periodo de tiempo.

**Vatio.-** Unidad de potencia eléctrica que produce una diferencia de potencial de un Voltio y de una corriente eléctrica de un Amperio.

**Vatio por Hora Wh.-** Unidad energética expresada en forma de unidades de potencia por tiempo.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Hidalgo González Ignacio, Introducción a los modelos de sistemas energéticos económicos y medioambientales: descripción y aplicaciones del modelo POLES.
- [2] Timlisina G., y Bhattacharyya S. (2009). Energy Demand Models for Policy Formulation. Grupo de investigación en medio ambiente y tecnología del Banco Mundial.
- [3] Teng F.; Gu A.; Duan M., et al. (2007). Energy Models in China A Literature Survey. Climate Change Institute Tsinghua University.
- [4] Houcade J.; Waisman G., y Sassi F. (2009) Integrated Modelling of Economic-Energy-Environment Scenarios, The Impact of China and India's Economic Growth on Energy Use and CO<sub>2</sub> Emissions. Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement.
- [5] Timlisina G., y Bhattacharyya S. Received 12 February 2010, Revised 28 July 2010, Accepted 3 August 2011. A review of energy system models. Dundee University.
- [6] Van Beeck N., (1999). Classification of Energy Models. Tilburg University & Eindhoven University of Technology.
- [7] Escenario energético boliviano, REGSA (2012) Promoviendo la Generación de Electricidad Renovable en Sudamérica. Boletín elaborado con asistencia de la Unión Europea.
- [8] Uri ND. Forecasting peak system load using a combined time series and econometric model. Appl Energy 1978; 4:219–27.
- [9] Uri ND, Flanagan SP. Short-term forecasting of crude petroleum and natural gas production. Appl Energy 1979; 5:297–310.
- [10] Painuly JP, Rao H, Parikh J. A rural energy–agriculture interaction model applied to Karnataka state. Energy 1995; 20:219–33.
- [11] Landsberg PT. A simple model for solar energy economics in the UK. Energy 1977; 2: 149–59.
- [12] Marchetti C. Primary energy substitution models: on the interaction between energy and society. Technol
- [13] Halliwell C, Sherif F. The EMR energy demand and price modeling system. IMACS 1985; 227–32.
- [14] Pandey R. Energy policy modeling: agenda for developing countries. Energy Policy 2002; 30:97–106.
- [15] Rijal K, Bansal NK, Grover PD. Rural household energy demand modeling. Energy Econ 1990; 279–88.
- [16] Amatya VB, Chandrashekar M, Robinson JB. Residential sector energy-supply–demand analysis: a modeling approach for developing countries and fuelwood-supply sustainability in Nepal. Energy 1993; 18:341–54.
- [17] Balachandra P, Chandru V. Modelling electricity demand with representative load curves. Energy 1999; 24:219–30.
- [18] Kulshreshtha M, Parikh JK. Modelling demand for coal in India: vector autoregressive models with cointegrated variables. Energy 2000; 25:149–68.
- [19] Danny Harvey LD. Managing atmospheric CO<sub>2</sub>: policy implications. Energy 1990; 15:91–104.
- [20] De Musgrove AR. A linear programming analysis of liquid-fuel production and use options for Australia. Energy 1984; 9:281–302.
- [21] Suganthi L, Jagadeesan TR. A modified model for prediction of India's future energy requirement. IntJ Energy Environ 1992; 3:371–86.
- [22] Morillas Antonio. El modelo de Leontief: formulaiones y limitaciones. Pag.189
- [23] Oliver Sassi et. Al., (2010) IMACLIM R: a framework to simulate sustainable development pathways. CIRED France.
- [24] SEI. (May 2011) User Guide for Version Long range Energy Alternatives Planning System.
- [25] International Energy Agency (2013). World Energy Model Documentation.
- [26] Manne Alan and Ricels G. Richard (June 2004) MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change Introduction. Stanford University and EPR.I
- [27] Kelly L. David and Kolstad D. Charles (November 1998) Integrated Assessment Models For Climate Change Control.
- [28] Ackerman, F., y de Almeida, P.E.F. (1990): "Iron and Charcoal the Industrial

- [29] Fuelwood Crisis in Minas Gerais”, *Energy Policy*, 18, 7, 661-668.
- [30] AES Corporation (1993): “IDEAS Model: A Dynamic Long-Term Policy Simulation Model of U.S. Energy supply and Demand”, U.S. Department of Energy, Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington DC.
- [31] Alcamo, J. (1994): *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Press, Dordrecht/Boston.
- [32] Alexander, S.M. (1979): “A Dynamic Simulation Model for Forecasting and Policy Making in the Regulated Electric Utility”, *Computers & Industrial Engineering*, 3, 4, 269-287.
- [33] Amagai, H. (1991): “Environmental Implications of Fuel Substitution and Thermal Efficiency: A Case Study of Japan’s Electricity Sector”, *Energy Policy*, 19, 1, 57-62.
- [34] Anandalingam, G., y Bhattacharya, D. (1985): “Process Modelling and Industrial Energy Use in Developing Countries-The Steel Industry in India”, *Omega*, 13, 4, 295-306.
- [35] Anderson, D. (1972): “Models for Determining Least-Cost Investments in Electricity Supply”, *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 3, 1, 267-299.
- [36] Babiker, M.H., Reilly, J.M., Mayer, M., Eckaus, R.S., Sue Wing, I., y Hyman, R. C. (2001): “The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results”, Report 71, MIT.
- [37] Backus, G., Amlin, J., y Kleeman, S. (1993): “Introduction to Energy 2020”, Systematic Solutions, Inc., Fairborn, OH.
- [38] Barhen, J., Alsmiller, J.R.G., Weisbin, C.R., Kuuskraa, V.A., Nesbitt, D.M., Philips, R.L. y y Morra, F. (1983): “Design of a Liquid Fuels Supply Model for U.S Ppolicy Analysis”, *Energy*, 8, 3, 169-197.
- [39] Barker, T. (1998): “The Effects on Competitiveness of Coordinated versus Unilateral Fiscal Policies Rreducing GHG Emissions in the EU: An Assessment of a 10% Reduction by 2010 Using the E3ME Model”, *Energy Policy*, 26, 14, 1083-1098.
- [40] Barnett, J., Dessai, S. y Webber, M. (2004): “Will OPEC Lose from the Kyoto Protocol?” *Energy Policy*, 32, 18, 2077-2088.
- [41] Barns, D.W., Edmonds, J.A. y Reilly, J.M. (1992): “Use of the Edmonds-Reilly Model to Model Energy-Related Greenhouse Gas Emissions”, Working Paper No 113, OECD Economics Department, Paris.
- [42] Baughman, M.L., Krafka, J., Frank, y Sullivan, R.S. (1984): “Modeling Emergency Interregional Electric Power Transfer”, *Electric Power Systems Research*, 7, 3, 213-224.
- [43] Beaver, R. (1993): “Structural Comparison of the Models in EMF 12”, *Energy Policy*, 21, 3, 238-248.
- [44] Beaver, R.D. y Huntington, H.G. (1992): “A Comparison of Aggregate Energy Demand Models for Global Warming Policy Analyses”, *Energy Policy*, 20, 6, 568-574.
- [45] Beladi, H. y Zuberi, H.A. (1988): “Environmental Constraints and a Dynamic Model for Energy Development”, *Energy Economics*, 10, 1, 18-28.
- [46] Bergman, L. (1988): “Energy Policy Modeling: A survey of General Equilibrium Approaches”, *Journal of Policy Modeling*, 10, 3, 377-399.
- [47] Bhattacharyya, S.C. (1996): “Applied General Equilibrium Models for Energy Studies: a Survey”, *Energy Economics*, 18, 3, 145-164.
- [48] Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove, L.N., Gabel, H.L. y Weaver, P.M. (1996): “An Environmental Life Cycle Optimization Model for the European Pulp and Paper Industry”, *Omega*, 24, 6, 615-629.
- [49] Boyd, G., Fox, J. y Hanson, D. (1990): “3.4. Set of models”, *Energy*, 15, 3-4, 345-362.
- [50] Buehring, W.A., Hamilton, B.P., Guziel, K.A. y Cirillo, R.R. (1991): “ENPEP: An Integrated Approach for Modelling National Energy Systems”, Argonne National Laboratory.
- [51] Bunn, D.W. y Larsen, E.R. (1997): “Systems Modelling for Energy Policy”, John Wiley and Sons, Ltd.
- [52] Burniaux, J.M., Martin, J.P., Nicoletti, G. y Oliveira Martins, J. (1991): “GREEN - A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO<sub>2</sub> Emissions: A Technical Manual”, Working Paper N<sup>o</sup> 104, OECD Department of Economics and Statistics, Paris.

- [53] Bystrom, S. y Lonnstedt, L. (1997): "Paper Recycling: Environmental and Economic Impact", *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 2, 109- 127.
- [54] Calloway, J.A. y Thompson, R.G. (1976): "An Integrated Industry Model of Petroleum Refining, Electric Power, and Chemicals Industries for Costing Pollution Control and Estimating Energy Prices", *Engineering and Process Economics*, 1, 3, 199-216.
- [55] Capros, P., Karadeloglou, L., Mantzos, L. y Mentzas, G. (1991): "MIDAS Energy System Model for EU", National Technical University of Athens, Athens.
- [56] Cervantes, A.M., Tonelli, S., Brandolin, A., Bandoni, J.A. y Biegler, L.T. (2002): "Large-Scale Dynamic Optimization for Grade Transitions in a Low Density Polyethylene Plant", *Computers & Chemical Engineering*, 26, 2, 227- 237.
- [57] Chambers, M.R. (1985): "A Strategic Planning Framework for Chemicals and Fuels Production - Part 1: Allocation Model", *Engineering Costs and Production Economics*, 8, 4, 291-302.
- [58] Chapuis, T., Dong, M. y Grubb, M. (1995): "The Greenhouse Cost Model: An Exploration of the Implications for Climate Change Policy of Inertia and Adaptability in Energy Systems", *International Energy Workshop*, Laxenburg, Austria.
- [59] Charpie, R.A. y MacAvoy, P.W. (1978): "Conserving Energy in the Production of Aluminum", *Resources and Energy*, 1, 1, 21-42.
- [60] Cocks, A.T., Rodgers, I.R., Skeffington, R.A. y Webb, A.H. (1998): "The Limitations of Integrated Assessment Modelling in Developing Air Pollution Control Policies", *Environmental Pollution*, 102, 1, 635-639.
- [61] Cohan, D., Stafford, R.K., Scheraga, J.D. y Herrod, S. (1994): "The Global Climate Policy Evaluation Framework", *Air and Waste Management Association Global Climate Change Conference*, Pittsburg, PA.
- [62] Craig, P.P., Levine, M.D. y Mass, J. (1980): "Uncertainty-an Argument for more Stringent Energy Conservation", *Energy*, 5, 10, 1073-1083.
- [63] Criqui, P. (1996): "Prospective Outlook on Long-term Energy Systems", EUR 17358 EN, European Commission, Brussels.
- [64] Diesendorf, M. (1998): "Australian Economic Models of Greenhouse Abatement", *Environmental Science & Policy*, 1, 1, 1-12.
- [65] Dinan, T.M. y Miranowski, J.A. (1984): "Obtaining the Optimal Fuel Conserving Investment Mix: A Linear Programming Approach", *Resources and Conservation*, 10, 4, 271-286.
- [66] Dowlatabadi, H. y Morgan, M.G. (1993): "A Model Framework for Integrated Studies of the Climate Problem", *Energy Policy*, 21, 3, 209-221.
- [67] Edmonds, J., Wise, M., Pitcher, H., Richels, R., Wigley, T. y MacCracken, C. (1997): "An Integrated Assessment of Climate Change and the Accelerated Introduction of Advanced Energy Technologies: An Application of MiniCAM 1.0", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1, 311-339.
- [78] Edmonds, J.A., Pitcher, H.M., Barns, D., Baron, R. y Wise, M. A. (1992): "Modeling Future Greenhouse Gas Emissions: The Second Generation Model Description", *Pacific Northwest National Laboratory*, Washington DC.
- [69] Energy Information Administration (1991): "Near-Term, Midterm and Long- Term Forecasting in the National Energy Modeling Sysyem", NEMS Project Office, Washington DC.
- [70] Energy Information Administration (2003): "The National Energy Modeling System: an Overview", DOE/EIA-0581(2003), Washington DC.
- [71] Environmental Protection Agency (1990): "Policy Options for Stabilizing Global Climate", Report to the Congress, Technical Appendices, Washington DC.
- [72] European Commission (1995a): "GEM-E3 Computable General Equilibrium Model for Studying Economy-Energy-Environment Interactions", EUR 16714 EN, DG XII, Brussels.
- [73] European Commission (1995b): "The PRIMES Energy System Model: Reference Manual", DG XII, Brussels.
- [74] European Commission (2003): "World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030 - WETO", EUR 20366, DG Research, Brussels.



- [75] Feltenmark, S. (1997): "On Optimization of Power Production", Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [76] Fernández-Armesto, F. (2002): *Civilizaciones - La lucha del hombre por controlar la naturaleza*, Taurus.
- [77] Foell, W.K. (1980): "A Systems Approach to Regional Energy/Environment Management", *Regional Science and Urban Economics*, 10, 3, 303- 324.
- [78] Frankel, R.J. (1971): "Environmental Quality Considerations in Planning the Future of the Coal-Electric Power Industry", *Atmospheric Environment* (1967), 5, 12, 1051-1056.
- [79] Fujii, Y. y Yamaji, K. (1998): "Assessment of Technological Options in the Global Energy System for Limiting the Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration", *Environmental Economics and Policy Studies*, 1, 113-139.
- [80] Goulder, L.H. (1995): "Effects of Carbon Taxes in an Economy with Prior Tax Distortions: An Intertemporal General Equilibrium Analysis", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 3, 271-297.
- [81] Grubb, M. (1993): "Policy Modelling for Climate Change: The Missing Models", *Energy Policy*, 21, 3, 203-208.
- [82] Gunton, T. (2004): "Energy Rent and Public Policy: An Analysis of the Canadian Coal Industry", *Energy Policy*, 32, 2, 151-163.
- [83] Hamilton, L.D., Goldstein, G., Lee, J.C., Manne, A.S., Marcuse, W., Morris, S.C. y Wene, C.O. (1992): "MARKAL-Macro: An Overview", BNL 48377, Brookhaven National Laboratory.
- [84] Hammitt, J.K. y Adams, J.L. (1996): "The Value of International Cooperation for
- [85] Abating Global Climate Change", *Resource and Energy Economics*, 18, 3, 219-241.
- [86] Hidalgo, I., Szabo, L., Carlos Ciscar, J. y Soria, A. (2005): "Technological Prospects and CO<sub>2</sub> Emission Trading Analyses in the Iron and Steel Industry: A Global Model", *Energy*, 30, 5, 583-610.
- [87] Hillsman, E.L., Alvic, D.R. y Church, R.L. (1988): "A Disaggregate Model of the U.S. Electric Utility Industry", *European Journal of Operational Research*, 35, 1, 30-44.
- [88] Hope, C., Anderson, J. y Wenman, P. (1993): "Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model", *Energy Policy*, 21, 3 SU, 327- 338.
- [89] Hoster, F. (1998): "Impact of a Nuclear Phase-out in Germany: Results from a Simulation Model of the European Power Systems", *Energy Policy*, 26, 6, 507-518.
- [90] Hu, S.D. y Zandi, I. (1979): "The Economics of Energy Conservation Policies: A Study of US Primary Copper Production", *Energy Economics*, 1, 3, 173-179.
- [91] Hubbard, R. y Weiner, R. (1983): "The 'SubTtrigger' Crisis: An Economic Analysis of Flexible Stock Policies", *Energy Economics*, 5, 3, 178-189.
- [92] Hudson, E.A. y Jorgenson, D.W. (1974): "U.S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000", *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 5, 2, 461-514.
- [93] Hudson, E.A. y Jorgenson, D.W. (1977): "The Long Term Interindustry Transactions Model: A Simulation Model for Energy and Economic Analysis", Data Resources, Inc., Cambridge, Ma.
- [94] Huntington, H.G., Weyant, J.P. y Sweeney, J.L. (1982): "Modeling for Insights, not Numbers: The Experiences of the Energy Modeling Forum", *Omega*, 10, 5, 449-462.
- [95] IAEA (1995): "The DECADES Project Outline and General Overview", International Atomic Energy Agency, Viena.
- [96] Idso, S.B. (1984): "Shortcomings of CO<sub>2</sub>-Climate Models Raise Questions about the Wisdom of Energy Policy Implications", *Applied Energy*, 16, 1, 53-57.
- [97] IPCC (1996): "Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, UK, 448.
- [98] IPCC (2000): "Emission Scenarios 2000: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", en Nakicenovic, N. y Swart, R. (coords.), Cambridge University Press, 570.
- [99] Isoard, S. y Soria, A. (1999): "Flexible Returns and the Diffusion of Innovation Policy", *International Journal of Technology Management*, 18, 5/6/7/8.

- [100] Isoard, S. y Soria, A. (2001): "Technical Change Dynamics: Evidence from the Emerging Renewable Energy Technologies", *Energy Economics*, 23, 6, 619-636.
- [101] Jaccard, M. y Roop, J. (1990): "The ISTUM-PC Model: Trial Application to the British Columbia Pulp and Paper Industry", *Energy Economics*, 12, 3, 185-196.
- [102] Jorgenson, D.W. y Wilcoxon, P.J. (1990): "Environmental Regulation and U.S. Economic Growth", *The RAND Journal of Economics*, 21, 2, 314-340.
- [103] Kainuma, M., Matsuoka, Y. y Morita, T. (2000): "The AIM/end-use Model and its Application to Forecast Japanese Carbon Dioxide Emissions", *European Journal of Operational Research*, 122, 2, 416-425.
- [104] Kavrakoglu, I. (1980): "Models for National Energy Policy Analysis and Planning", *Automatica*, 16, 4, 379-392.
- [105] Kavrakoglu, I. (1982): "OR and Energy: Problems of Modelling", *European Journal of Operational Research*, 11, 3, 285-294.
- [106] Kavrakoglu, I. (1983): "Modelling Energy- Economy Interactions", *European Journal of Operational Research*, 13, 1, 29-40.
- [107] Kickert, R.N., Tonella, G., Simonov, A. y Krupa, S.V. (1999): "Predictive Modeling of Effects under Global Change", *Environmental Pollution*, 100, 1-3, 87- 132.
- [108] Kolstad, C.D. (1996): "Learning and Stock Effects in Environmental Regulation: The Case of Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 1, 1-18.
- [109] Koreisha, S. (1980): "The limitations of energy policy models", *Energy Economics*, 2, 2, 96-110.
- [110] Kouvaritakis, N., Soria, A. y Isoard, S. (2000a): "Modelling Energy Technology Dynamics: Methodology for Adaptive Expectations Models with Learning by Doing and Learning by Searching", *International Journal of Global Energy Issues*, 14, 1/2/3/4, 104-115.
- [111] Kouvaritakis, N., Soria, A., Isoard, S. y Thonet, C. (2000b): "Endogenous Learning in World post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations", *International Journal of Global Energy Issues*, 14, 1/2/3/4, 222-248.
- [112] Kydes, A.S., Shaw, S.H. y McDonald, D.F. (1995): "Beyond the Horizon: Recent Directions in Long-Term Energy Modeling", *Energy*, 20, 2, 131-149.
- [113] Laitner, J.A., DeCanio, S.J., Koomey, J.G. y Sanstad, A.H. (2003): "Room for Improvement: Increasing the Value of Energy Modeling for Policy Analysis", *Utilities Policy*, 11, 2, 87-94.
- [114] Lakhani, H. (1980): "Forecasting the Economic, Energy, and Environmental Impacts of National Energy Plans, 1990-2000", *Technological Forecasting and Social Change*, 18, 4, 301-320.
- [115] Lapillonne, B., Gusbin, D., Tulkens, P., Ierland, W.V., Criqui, P. y Russ, P. (2003): "World Energy, Technology, and Climate Policy Outlook: WETO 2030", EUR 20366, Directorate General for Research, European Commission, Brussels.
- [116] Lehtila, A. y Pirila, P. (1996): "Reducing Energy Related Emissions: Using an Energy Systems Optimization Model to Support Policy Planning in Finland", *Energy Policy*, 24, 9, 805-819.
- [117] Lesuis, P., Muller, F. y Nijkamp, P. (1980): "An Interregional Policy Model for Energy-Economic-Environmental Interactions", *Regional Science and Urban Economics*, 10, 3, 343-370.
- [118] Leydon, K., Decker, M., Waterlow, J., Benville, M. y Gray, D. (1996): "European Energy to 2020: A Scenario Approach", European Commission, DG XVII, Brussels.
- [119] Limaye, D.R. y Sharko, J.R. (1974): "US Energy Policy Evaluation: Some Analytical Approaches", *Energy Policy*, 2, 1, 3-17.
- [120] Lin, W.T. (1988): "The Dynamic Behavior of Production in the Extractive Industry", *Resources and Energy*, 10, 3, 225-246.
- [121] Longwell, J.P., Rubin, E.S. y Wilson, J. (1995): "Coal: Energy for the Future", *Progress in Energy and Combustion Science*, 21, 4, 269-360.
- [122] Loschel, A. (2002): "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey", *Ecological Economics*, 43, 2-3, 105-126.
- [123] Lyness, F.K. (1978): "O.R. and U.K. Natural Gas Depletion Strategy", *European Journal of Operational Research*, 2, 3, 160-167.
- [124] Maddison, D. (1995): "A Cost-Benefit Analysis of Slowing Climate Change", *Energy Policy*, 23, 4-5, 337-346.

- [125] Manne, A.S. (1976): "ETA: A Model for Energy Technology Assessment", *The Bell Journal of Economics*, 7, 2, 379-406.
- [126] Manne, A.S., Mendelsohn, R. y Richels, R. (1995): "A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies", *Energy Policy*, 23, 1, 1-105.
- [127] Manne, A.S., Richels, R.G. y Hogan, W.W. (1990): "CO<sub>2</sub> Emission Limits: An Economic Cost Analysis for the USA", *The Energy Journal*, 11, 2, 51-86.
- [128] Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Martinsen, D. y Hake, J.-F. (1996): "IKARUS - A Fundamental Concept for National GHG-Mitigation Strategies", *Energy Conversion and Management*, 37, 6-8, 777-782.
- [129] McKibbin, W.J. y Wilcoxon, P. (1998): "The Theoretical and Empirical Structure of the G-Cubed Model", *Economic Modelling*, 16, 1, 123-148.
- [130] McLaren, J., Parkinson, S. y Jackson, T. (2000): "Modelling Material Cascades - Frameworks for the Environmental Assessment of Recycling Systems", *Resources, Conservation and Recycling*, 31, 1, 83-104.
- [131] Meier, P.M. (1982): "Energy Modelling in Practice: An Application of Spatial Programming", *Omega*, 10, 5, 483-491.
- [132] Messner, S. y Nakicenovic, N. (1992): "A Comparative Assessment of Different Options to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions", *Energy Conversion and Management*, 33, 5-8, 763-771.
- [133] Mohnen, V.A., Goldstein, W. y Wang, W.C. (1991): "The Conflict over Global Warming: The Application of Scientific Research to Policy Choices", *Global Environmental Change*, 1, 2, 109-123.
- [134] Moore, C.L. y Zoltners, A.A. (1976): "Optimal Regional Distribution of Petroleum Products", *Omega*, 4, 3, 301-311.
- [135] Mori, S. (1995): "A Long Term Evaluation of Nuclear Power Technology by Extended DICE+E Model Simulations - Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation (MARIA) Model", *Progress in Nuclear Energy*, 29, 135-142.
- [136] Nakicenovic, N. y Jefferson, M. (1995): "Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond", WP-95-127, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg.
- [137] Neubauer, F., Westman, E. y Ford, A. (1997): "Applying Planning Models to Study New Competition: Analysis for the Bonneville Power Administration", *Energy Policy*, 25, 3, 273-280.
- [138] Newton, J.K. (1985): "Modelling Energy Consumption in Manufacturing Industry", *European Journal of Operational Research*, 19, 2, 163-169.
- [139] Nierenberg, W.A. (1995): "Looking Back 10 Years", *Energy Policy*, 23, 4-5, 283-288.
- [140] Nordhaus, W.D. (1994): "Managing the Commons: The Economics of Climate Change", The MIT Press, 213.
- [141] Nordhaus, W.D. (1995): "The Ghosts of Climates Past and the Specters of Climate Change Future", *Energy Policy*, 23, 4-5, 269-282.
- [142] Nordhaus, W.D. y Yang, Z. (1996): "A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies", *The American Economic Review*, 86, 4, 741-765.
- [143] Nystrom, I. y Cornland, D. W. (2003): "Strategic Choices: Swedish Climate Intervention Policies and the Forest Industry's Role in Reducing CO<sub>2</sub> Emissions", *Energy Policy*, 31, 10, 937-950.
- [144] Onishi, A. (2001): "The World Economy to 2015: Policy Simulations on Sustainable Development", *Journal of Policy Modeling*, 23, 2, 217-234.
- [145] Painuly, J.P., Rao, H. y Parikh, J. (1995): "A Rural Energy-Agriculture Interaction Model Applied to Karnataka State", *Energy*, 20, 3, 219-233.
- [146] Pandey, R. (2002): "Energy Policy Modelling: Agenda for Developing Countries", *Energy Policy*, 30, 2, 97-106.
- [147] Parikh, J. (1985): "Modeling Energy and Agriculture Interactions-I: A Rural Energy Systems Model", *Energy*, 10, 7, 793-804.
- [148] Parikh, J. y Deshmukh, S.G. (1992): "Policy Alternatives for Western and Southern Power Systems in India", *Utilities Policy*, 2, 3, 240-247.
- [149] Parikh, J.K. y Ramanathan, R. (1999): "Linkages among Energy, Agriculture and Environment in Rural India", *Energy Economics*, 21, 6, 559-583.

- [150] Peck, S.C. y Teisberg, T.J. (1992): "CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment", *The Energy Journal*, 13, 1, 55-78.
- [151] Pilati, D. y Sparrow, F.T. (1980): "The Brookhaven Process Optimization Models", *Energy*, 5, 5, 417-428.
- [152] Plackett, M.W., Ormerod, R.J. y Toft, F.J. (1982): "The National Coal Board Strategic Model", *European Journal of Operational Research*, 10, 4, 351- 360.
- [153] Pokharel, S. y Chandrashekar, M. (1998): "A Multiobjective Approach to Rural Energy Policy Analysis", *Energy*, 23, 4, 325-336.
- [154] Polenske, K.R. y McMichael, F.C. (2002): "A Chinese Cokemaking Process-Flow Model for Energy and Environmental Analyses", *Energy Policy*, 30, 10, 865-883.
- [155] Prinn, R., Jacoby, H., Sokolov, A., Wang, C., Xiao, X., Yang, Z., Eckaus, R., Stone, P., Ellerman, D., Melillo, J., Fitzmaurice, J., Kicklighter, D., Holian, G. y Liu, Y. (1998): "Integrated Global System Model for Climate Policy Assessment: Feedbacks and Sensitivity Studies", Report 36, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Massachusetts Institute of Technology.
- [156] Rapoport, L.A. (1975): "Long-Range Modeling of Worldwide Energy Development and Supplies-Outline of Formulation and Applications", *Computers & Operations Research*, 2, 3-4, 195-211.
- [157] Rath-Nagel, S. y Stocks, K. (1982): "Energy Modelling for Technology Assessment: the MARKAL Approach", *Omega*, 10, 5, 493-505.
- [158] Rath-Nagel, S. y Voss, A. (1981): "Energy Models for Planning and Policy Assessment", *European Journal of Operational Research*, 8, 2, 99-114.
- [159] Rotmans, J. y Dowlatabadi, H. (1998): "Integrated Assessment Modeling", Rayner, S. y Malone, E.L. (eds): *Human Choice and Climate Change: An International Assessment*, Battelle Press, Columbus, OH, 291-377.
- [160] Rotmans, J., van Asselt, M., de Bruin, A.J., den Elzen, M.G.J., de Greef, J., Hilderink, H., Hoekstra, A.Y., Janssen, M.A., Köster, H.W., Martens, W.J.M., Niessen, L.W. y de Vries, H.J.M. (1994): "Global Change and Sustainable Development: A Modelling Perspective for the Next Decade", RIVM Report 461502004, National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM).
- [161] Rowse, J.G. y Copithorne, L.W. (1982): "Natural Resource Programming Models and Scarcity Rents", *Resources and Energy*, 4, 1, 59-85.
- [162] Rutherford, T.F. (1992): "The Welfare Effects of Fossil Carbon Restrictions: Results from a Recursively Dynamic Trade Model", Working Paper N<sup>o</sup> 112, OECD Economics Department, Paris.
- [163] Samouilidis, J.E. (1980): "Energy Modelling: A New Challenge for Management Science", *Omega*, 8, 6, 609-621.
- [164] Samouilidis, J.E. y Berahas, A. (1983): "Energy Policy Modelling in Developing and Industrializing Countries", *European Journal of Operational Research*, 13, 1, 2-11.
- [165] Samouilidis, J.E. y Mitropoulos, C.S. (1982): "Energy-Economy Models: A Survey", *European Journal of Operational Research*, 11, 3, 222-232.
- [166] Samouilidis, J.E. y Pappas, I.A. (1980): "A Goal Programming Approach to Energy Forecasting", *European Journal of Operational Research*, 5, 5, 321-331.
- [167] Samouilidis, J.E., Psarras, J. y Papaconstantinou, D. (1984): "Electricity Planning vs Energy Planning: A Modelling Approach", *Omega*, 12, 4, 341-346.
- [168] Scheraga, J.D. (1990): "GEMINI: An Energy-Environmental Model of the United States", U.S. Environmental Protection Agency.
- [169] Schulz, V. y Stehfest, H. (1984): "Regional Energy Supply Optimization with Multiple Objectives", *European Journal of Operational Research*, 17, 3, 302-312.
- [170] Shlyakhter, A.I., Kammen, D.M., Broido, C.L. y Wilson, R. (1994): "Quantifying the Credibility of Energy Projections from Trends in Past Data: The US Energy Sector", *Energy Policy*, 22, 2, 119-130.
- [171] Smith, V.K. y Hill, L.J. (1982): "The Role of Allocation Functions in Energy Modeling: A Review", *Resources and Energy*, 4, 4, 307-328.
- [172] Soloveitchik, D., Ben-Aderet, N., Grinman, M. y Lotov, A. (2002): "Multiobjective Optimization and Marginal Pollution Abatement Cost in the Electricity Sector - An Israeli Case Study", *European Journal of Operational Research*, 140, 3, 571-583.

- [175] Sparrow, F.T., Pilati, D. y Marcuse, W. (1979): "A Programming Model for Industrial Energy Conservation Policy", *Resources and Energy*, 2, 2-3, 179-199.
- [176] Stockholm Environment Institute (2002): "Long-range Energy Alternatives Planning System, User Guide", Stockholm Environment Institute (SEI), Tellus Institute, Boston, MA.
- [177] Stratton, A. (1979): "Energy Forecasting", *Omega*, 7, 6, 493-502.
- [178] Szabo, L., Hidalgo, I., Ciscar, J.C. y Soria, A. (2006): "CO<sub>2</sub> Emission Trading within the European Union and Annex B Countries: The Cement Industry Case", *Energy Policy*, 34, 1, 72-87.
- [179] Tessmer, R.G., Hoffman, K.C., Marcuse, W. y Behling, D.J. (1975): "Coupled Energy System-Economic Models and Strategic Planning", *Computers & Operations Research*, 2, 3-4, 213-224.
- [180] Thompson, R.G., Moore, L.T., Calloway, J.A., Young, H.P., Lievano, R.J. y Nawalanic, L.A. (1976): "Environment, Energy, and Capital in the Fossil Fueled Electric Power Industry", *Computers & Operations Research*, 3, 2-3, 241-257.
- [181] Tol, R.S.J., Van der Burg, T., Jansen, H.M.A. y Verbruggen, H. (1995): "The Climate Fund - Some Notions on the Socio-Economic Impacts of Greenhouse Gas Emissions and Emission Reductions in an International Context", R95/03, Intitute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- [182] Ulph, A.M. (1980): "World Energy Models-A Survey and Critique", *Energy Economics*, 2, 1, 46-59.
- [183] Uri, N.D. (1976): "Optimal Investment, Pricing and Allocation of Electrical Energy in the USA", *Applied Mathematical Modelling*, 1, 3, 114-118.
- [184] Uri, N.D. (1977): "An Assessment of Interfuel Substitution by Electric Utilities", *Applied Mathematical Modelling*, 1, 5, 253-256.
- [185] US National Research Council (1983): "Changing Climate", Carbon Dioxide Assessment Committee/Board on Atmospheric Sciences and Climate, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources, Washington, DC.
- [186] Van der Voort, E. (1982): "The EFOM 12C Energy Supply Model within the EC Modelling System", *Omega*, 10, 5, 507-523.
- [187] Varios (1990): "Special Issue", *Energy*, 15, 3-4.
- [188] Viguier, L.L., Babiker, M.H. y Reilly, J.M. (2003): "The Costs of the Kyoto Protocol in the European Union", *Energy Policy*, 31, 5, 459-481.
- [189] Voss, A. (1998): "MESAP Manual", Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart.
- [190] Whalley, J. y Wigle, R.M. (1992): "Results for the OECD Comparative Modelling Project from the Whalley-Wigle Model", Working Paper N° 121, OECD Economics Department, Paris.
- [191] Wigley, T.M.L. (1994): "MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change): User's Guide and Scientific Reference Manual", National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- [192] Xie Z. y Kuby, M. (1997): "Supply-Side/Demand-Side Optimization and Cost- Environment Tradeoffs for China's Coal and Electricity System", *Energy Policy*, 25, 3, 313-326.
- [193] Ybema, J.R., Lako, P., Gielen, D.J., Oosterheert, R.J. y Kram, T. (1995): "Prospects for Energy Technology in the Netherlands, Vol. 1: Evaluation of the Cost-Effectiveness of Energy Technologies under a Range of Long Term Future Conditions", ECN-C--95-002, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- [194] Yohe, G. y Wallace, R. (1995): "Near Term Mitigation Policy for Global Change under Uncertainty: Minimizing the Expected Cost of Meeting Unknown Concentration Thresholds", Department of Economics, Wesleyan University.