

INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE SISTEMAS ENERGÉTICOS,
ECONÓMICOS Y MEDIOAMBIENTALES: DESCRIPCIÓN Y
APLICACIONES DEL MODELO POLES

*INTRODUCTION TO THE ENERGY-ECONOMY-ENVIRONMENT MODELS:
DESCRIPTION AND APPLICATIONS OF THE POLES MODEL*

Ignacio Hidalgo González

Institute for Prospective Technological Studies (IPTS)

Centro Común de Investigación, Comisión Europea

ignacio.hidalgo@cec.eu.int

RESUMEN

La necesidad de analizar cuestiones sobre sostenibilidad económica y ambiental ha motivado el desarrollo y empleo de los llamados modelos E3 (*energy-economy-environment*). El objetivo de estos modelos es intentar anticipar posibles problemas en el futuro, facilitando en el presente la búsqueda y el análisis de soluciones mediante el estudio de las interacciones entre los sistemas energético, económico y medioambiental. Este artículo introduce los modelos E3, explicando su evolución, sus características, su clasificación, y los resultados que pueden ofrecer. Como ilustración se describe el modelo POLES, uno de los más importantes usados por la Comisión Europea, y se muestra una aplicación de dicho modelo para el proyecto WETO (*World Energy Technology Outlook*).

Palabras clave: modelado, métodos matemáticos y cuantitativos, recursos no renovables, economía de la energía, economía ambiental, modelo POLES, protocolo de Kyoto, comercio de emisiones.

ABSTRACT

The need to analyze issues of economic and environmental sustainability has encouraged the development and use of so-called E3 models (*energy-economy-environment*). These models aim to anticipate possible problems in the future, facilitating the search for and analysis of solutions by studying interactions between the energy, economic and environmental sectors. This article introduces these E3 models, explaining their evolution, features, classification, and possible outcomes. As an illustration, the POLES model, one of the most important models used by the European Commission, is described; also, an application of this model within the WETO project (*World Energy Technology Outlook*) is shown.

Keywords: modelling, mathematical and quantitative methods, non-renewable resources, energy economics, environmental economics, POLES model, Kyoto protocol, emission trading.

Clasificación JEL: C00, Q30, Q40, Q50.

1. INTRODUCCIÓN¹

La amenaza del cambio climático inducido por las emisiones antropógenas de CO₂ ha provocado un gran interés por modelar las interacciones entre los sistemas energético, económico y medioambiental. Los primeros modelos que permitían estudiar estas relaciones, también conocidos como modelos E3 (*energy-economy-environment*), se remontan a los años setenta, cuando se intentaban representar dichas interacciones en el contexto de la crisis del petróleo. En este periodo se desarrollaron las técnicas de modelado que dieron lugar a los modelos de equilibrio general y a los modelos de optimización de sistemas energéticos.

Posteriormente, la creciente preocupación sobre el estado del medioambiente condujo a la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992². Bajo esta convención, los países signatarios llegaron a unos compromisos para lograr “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero³ en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”. El establecimiento de dichos compromisos ha hecho evolucionar los modelos originales de manera que ahora integran cada vez más las interacciones de los sistemas económicos y energéticos con el medio ambiente y el clima.

En 1997 se adoptó el Protocolo de Kyoto⁴ a la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En dicho protocolo se establece que para ciertos países, enumerados en el Anexo B del protocolo, las “emisiones antropógenas agregadas, expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero... no excedan de las cantidades atribuidas a

¹ Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad del autor y no representan necesariamente puntos de vista de la Comisión Europea.

² <http://unfccc.int>

³ Los gases de efecto invernadero son los gases responsables del calentamiento de la atmósfera: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF₆).

⁴ <http://unfccc.int/resource/convkp.html>

ellas, calculadas en función de los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones consignados para ellas en el Anexo B... con miras a reducir el total de sus emisiones de esos gases a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990 en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012”.

El Protocolo de Kyoto, que acaba de entrar en vigor recientemente, define una serie de instrumentos⁵ para lograr sus objetivos, y ha dado lugar a la elaboración de nuevas regulaciones medioambientales como la Directiva 2003/87/CE por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la UE⁶. Esta y otras normas que puedan aparecer afectarán principalmente a los sectores económicos con mayor consumo de energía, al ser las mayores fuentes de emisión de gases de efecto invernadero. El análisis del posible impacto de la implantación de nuevas regulaciones y políticas sobre estos sectores es una cuestión de gran relevancia que también puede ser estudiada mediante el uso de modelos matemáticos.

Entre los modelos utilizados por la Comisión Europea para el estudio de las cuestiones mencionadas anteriormente, y como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, se encuentra el modelo POLES (*Prospective Outlook on Long-term Energy Systems*). POLES permite analizar la evolución a largo plazo de los mercados internacionales de la energía, los equilibrios energéticos regionales, y las demandas nacionales de energía, representando con gran detalle el funcionamiento de los sistemas de producción de electricidad y de energía primaria. Algunos de los sectores económicos considerados en POLES se encuentran entre los que posiblemente se verán más afectados por nuevas legislaciones medioambientales más rigurosas.

El resto del documento se estructura en dos partes de la siguiente forma:

- En la sección 2 se introducen los modelos E3, explicando brevemente su evolución (2.1), sus características (2.2), su clasificación (2.3), y los resultados que pueden ofrecer (2.4).
- La sección 3 describe brevemente el modelo POLES (3.1), y, por último (3.2), muestra una aplicación del modelo POLES para el proyecto WETO (*World Energy Technology Outlook*).

2. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS E3

2.1. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS E3

Los modelos E3 se usan para intentar anticipar posibles problemas en el futuro, facilitando en el presente la búsqueda y el análisis de soluciones. Con este tipo de modelos es posible analizar a largo plazo cuestiones fundamentales sobre la sostenibilidad económica y medioambiental tales como:

⁵ El comercio de derechos de emisiones, los mecanismos de desarrollo limpio, y los proyectos de implementación conjunta.

⁶ http://europa.eu.int/eur-lex/pri/es/oj/dat/2003/l_275/l_27520031025es00320046.pdf, modificada por http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/es/oj/2004/l_338/l_33820041113es00180023.pdf

- ¿qué efecto pueden tener el agotamiento de los recursos energéticos fósiles y la evolución de las tecnologías energéticas sobre el crecimiento económico?
- ¿cuáles son los efectos medioambientales a largo plazo de los patrones actuales de producción y consumo de energía?
- ¿cómo pueden afectar las políticas energéticas y ambientales al crecimiento económico?

La literatura científica que ha revisado este tipo de modelos es muy extensa (Barnett et al., 2004; Beaver, 1993; Beaver y Huntington, 1992; Bunn y Larsen, 1997; Huntington et al., 1982; IPCC, 1996; Kydes et al., 1995; Mohnen et al., 1991; Stratton, 1979; Varios, 1990), pero no es fácil encontrar referencias que resuman la evolución de los modelos E3 desde su aparición hasta la actualidad. Los modelos E3 pueden verse como el resultado de la integración de modelos basados en disciplinas muy diferentes: la investigación operativa, la econometría, la teoría del equilibrio general, la teoría del crecimiento económico, y las ciencias del clima y del medioambiente.

Las técnicas de la investigación operativa desarrolladas a partir de la Segunda Guerra Mundial fueron aplicadas durante los años 50 y 60 a la optimización del funcionamiento de todo tipo de sistemas industriales. Las primeras aplicaciones relacionadas con los modelos analizados en este trabajo se hicieron en la industria de generación de electricidad para resolver problemas de planificación (Anderson, 1972; Meier, 1982; Samouilidis et al., 1984), de producción (Feltenmark, 1997), y de evaluación de políticas sectoriales (Alexander, 1979). Enseguida surgieron aplicaciones en otros campos 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).

La crisis del petróleo de 1973 provocó la aparición de modelos de los sistemas energéticos a escala nacional. Estos modelos se utilizaban para estudiar los problemas de dependencia de los combustibles fósiles (Barhen et al., 1983; Manne, 1976), y 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). También se desarrollaron modelos con los mismos objetivos y aplicaciones a escala internacional (Schulz y Stehfest, 1984; Van der Voort, 1982). Todos estos modelos caracterizaban muy bien las tecnologías pero asumían que los mercados eran perfectos, y con ellos no era posible representar adecuadamente el funcionamiento de los mercados ni el comportamiento individual de los agentes económicos.

La crisis del petróleo fue el motivo de la aparición de los primeros modelos capaces de representar los vínculos entre los sistemas energéticos y económicos, basados en técnicas econométricas y en la teoría del equilibrio general (Hudson y Jorgenson, 1974; Hudson y Jorgenson, 1977). Estos modelos estaban pensados para estudiar las relaciones entre las políticas energéticas

y los sectores de actividad económica más directamente relacionados con el sector energético, así como, de manera más agregada, con el crecimiento económico. Estos modelos fueron pensados a partir de generalizaciones de la metodología *input-output* que permite estudiar las relaciones entre los sectores de una economía (cerrada o abierta) expuesta a perturbaciones (de política sectorial o exógenas) concentradas en un número limitado de sectores. También surgieron en estos años modelos concebidos para estudiar problemas más específicos como la evaluación de los efectos económicos de los embargos petrolíferos (Hubbard y Weiner, 1983).

Una extensión natural de los modelos dedicados a estudiar las interacciones entre el sistema energético y el económico consistía en la incorporación de las relaciones con el medio ambiente. Los primeros modelos que analizaban la relación entre economía y medio ambiente se fundamentaban en la teoría del crecimiento económico, e intentaban estudiar las implicaciones del cambio tecnológico y de las opciones de reducción de emisiones de CO₂ sobre el crecimiento a largo plazo. Estos modelos no eran adecuados para representar los mercados y sus agentes.

El atractivo de los modelos de equilibrio general hizo que se usaran cada vez más para considerar la dimensión medioambiental (Kavrakoglu, 1983; Lesuis et al., 1980). Esto se lograba teniendo en cuenta por un lado los efectos contaminantes del uso de la energía sobre el medio ambiente, y por otro el impacto de los costes de reducción de la contaminación y de los costes de sus efectos (las externalidades) sobre la economía. Al hacer esto la complejidad de los modelos aumentó enormemente puesto que las nuevas interacciones que se estudiaban:

- Afectaban a los sistemas energético, económico y medioambiental a *escala mundial*.
- Tenían una *gran incertidumbre* porque sus efectos se manifiestan a largo plazo, lo cual además requería la consideración de los cambios tecnológicos.
- Había que representarlas considerando que los mecanismos de *mercado* son cada vez más utilizados en los sistemas económicos y energéticos.

La complejidad de los modelos E3 se traduce en problemas matemáticos y computacionales de gran envergadura. Hasta hace unos años, lo más habitual era omitir el tratamiento de la incertidumbre, centrándose en uno de los dos puntos restantes (analizando escala o mercado) para reducir la carga computacional.

Con el paso del tiempo han surgido los modelos de evaluación integrada del cambio climático (*integrated assessment models of climate change*) como CETA (Peck y Teisberg, 1992), IMAGE (Alcamo, 1994), o MERGE (Manne et al., 1995). Estos modelos analizan el efecto que tiene el aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero sobre los patrones climáticos, y los impactos derivados sobre el medio ambiente y el sistema económico. La mayoría de estos modelos tienen un grado de detalle sectorial relativamente reducido, y concentran el análisis en la variable temporal.

2.2. ATRIBUTOS DE LOS MODELOS

2.2.1. COBERTURA GEOGRÁFICA

Los modelos E3 pueden tener una cobertura geográfica global, regional, o nacional. Los globales pueden considerar 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.

Los modelos no globales pueden ser muy diferentes entre sí, y además difieren en las hipótesis sobre las características del resto del mundo no cubierto por el modelo. Algunos modelos son genéricos y pueden ser adaptados a diferentes regiones. Los modelos nacionales o regionales pueden ser suficientes para analizar la efectividad y el impacto económico de las políticas de reducción de emisiones.

2.2.2. HORIZONTE TEMPORAL

Los modelos E3 representan la evolución de los sistemas energético, económico y medioambiental durante un periodo de tiempo. La longitud de dicho periodo es lo que se conoce como horizonte de simulación. Normalmente se distinguen tres tipos de horizonte: a corto (menor de 2 años), medio (hasta 25 o 30 años), o largo plazo. En un instante dado del tiempo la estructura de la economía se puede considerar como fija, pero el paso del tiempo produce cambios estructurales graduales y permite la aparición de innovaciones. A corto plazo el stock de capital es fijo, pero a medio y largo plazo la tecnología cambia, el stock de capital se modifica, y la asignación de recursos a los sectores productivos evoluciona.

El horizonte temporal de un modelo define el punto de vista que se tiene del sistema representado, influyendo sobre el tipo de relaciones que se consideran (Energy Information Administration, 1991). También influye sobre la relevancia de las variables exógenas, en función de la variabilidad de estas entradas en el horizonte temporal considerado. De esta forma, a corto plazo el clima es relevante, mientras que puede considerarse que la tecnología es fija y que la población es constante o varía conforme a un patrón conocido. A medio plazo los cambios en la tecnología, el stock de capital, y 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. En el largo plazo hay que considerar cambios estructurales como la evolución demográfica y económica, el impacto del agotamiento de los recursos energéticos no renovables, la aparición de energías alternativas y la penetración de nuevas tecnologías.

2.2.3. NIVEL DE DETALLE

Los modelos se diferencian también en su capacidad para analizar sectores y tecnologías específicas. En el sector energético, algunos modelos con bajo nivel de detalle permiten el estudio de unas pocas fuentes de energía, como el petróleo o la electricidad, mientras los modelos con un nivel de detalle alto pueden considerar cientos de formas de energía. En muchos casos el usuario puede elegir el nivel de agregación. El mismo rango de posibilidades de desagregación existe fuera del sector energético. Algunos modelos distinguen entre unas pocas categorías de demanda de energía, como transporte o fabricación, y otros permiten la consideración de cientos de procesos industriales o de usos finales.

Al igual que para el sector energético y la economía, el tratamiento de los impactos medioambientales varía mucho. Hay modelos que sólo calculan las emisiones de un gas de efecto invernadero a partir del consumo agregado de energía. Otros analizan las emisiones de varios gases, consideran el efecto de las emisiones sobre el comportamiento de la atmósfera, y además tienen en cuenta multitud de impactos ambientales (deforestación, calentamiento global, acidificación, efectos sobre zonas costeras, usos del suelo, etc.).

Cuanto mayor es la desagregación mayor es la necesidad de datos, y mayor es la capacidad de analizar una tecnología, un sector o un ecosistema determinado.

2.2.4. HIPÓTESIS DE PREVISIÓN DE PRECIOS

Las expectativas sobre la evolución de los precios son un factor muy importante en cualquier decisión económica en la que intervenga el tiempo. Los modelos E3 utilizan dos hipótesis opuestas para el cálculo de precios.

La hipótesis de previsión miope (*myopic foresight*) consiste en que los agentes económicos esperan que los precios del presente se mantengan o varíen de una manera 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.

Por el contrario, la hipótesis de previsión perfecta (*perfect foresight*) 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.

2.2.5. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

Los modelos actuales son enormemente complejos en su formulación. Además, su tamaño suele ser grande, debido a que tienen muchas ecuaciones y variables (en ocasiones miles), y manejan una cantidad ingente de datos. El

código de la mayoría de los modelos se escribe utilizando lenguajes de alto nivel como GAMS⁷, TROLL⁸ o Vensim⁹.

Los modelos pueden ser de optimización o de simulación. En los primeros se usan funciones objetivo que buscan minimizar los costes energéticos o maximizar la utilidad de los consumidores, sujetas a restricciones muy diversas (sobre emisiones, capacidades, etc.). La solución que proporcionan es la óptima entre todas las alternativas posibles. Los modelos de optimización dicen cuál es el mejor camino a seguir para resolver un problema dado. Identifican qué es lo mejor que puede pasar y permiten definir el escenario para llegar a ese punto, por eso son los indicados para el diseño de políticas. En definitiva, estos modelos suponen que los agentes económicos operan racionalmente y con información perfecta.

En los modelos de simulación las variables evolucionan en función de unas ecuaciones de comportamiento, tratando de representar cómo funciona el sistema real que representan bajo unas condiciones dadas. Estos modelos se usan para ver qué pasará en un escenario determinado. Son los modelos más adecuados para ensayar el efecto de la aplicación de una política o una estrategia determinada.

2.2.6. TRATAMIENTO DE LAS TECNOLOGÍAS

Los modelos E3 difieren en el tratamiento de las tecnologías energéticas. 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 o se refieren a alguna 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. Estas proyecciones suelen fundamentarse en la evolución de los costes relativos de las tecnologías, por tanto, una de las informaciones más importantes sobre una tecnología son sus costes. 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 además el ciclo de vida completo de la tecnología, es decir, incluyen 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

⁷ <http://www.gams.com>

⁸ <http://www.intex.com/homepage/Troll.htm>

⁹ <http://www.vensim.com>

importantes como las descripciones de las tecnologías son las restricciones que se imponen para evitar resultados absurdos 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.

Los métodos para modelar los atributos futuros de las tecnologías varían desde el uso de parámetros exógenos hasta el uso de ecuaciones de comportamiento que dependen de otras variables. Un ejemplo de esto en los modelos E3 es el uso de curvas de aprendizaje (Isoard y Soria, 1999; Isoard y Soria, 2001; Kouvaritakis et al., 2000a; Kouvaritakis et al., 2000b). Las curvas de aprendizaje representan la bajada de costes de una tecnología a lo largo del tiempo a medida que aumenta su producción acumulada. La bajada de costes y el incremento en la eficiencia y en la productividad de una tecnología pueden modelarse también como funciones del gasto en I+D.

Los modelos a largo plazo tienen que considerar los efectos de la aparición de tecnologías que todavía se encuentran en sus primeras fases de desarrollo, como la fusión nuclear. Los costes, los rendimientos y las fechas de aparición de dichas tecnologías son informaciones altamente especulativas, así que lo que suele hacerse en estos casos es tratar las tecnologías de una manera muy agregada de modo que los resultados del modelo representen mejoras muy generales de la tecnología. En los modelos a largo plazo se tienen en cuenta restricciones sobre el agotamiento de los recursos naturales y restricciones ambientales, y por esta razón la mayoría de ellos consideran hipótesis sobre la introducción de tecnologías futuras basadas en combustibles fósiles (como las que usan alquitranes o esquistos bituminosos, las técnicas de licuefacción del carbón o del gas natural, las células de combustible basadas en gasolina y gas natural, etc.) y tecnologías de "último recurso" (*backstop technologies*) no basadas en combustibles fósiles (como la energía solar, la eólica, la geotérmica, etc.). Las tecnologías de "último recurso" son aquellas cuyas materias primas no están restringidas en el periodo de simulación. Su importancia aumenta a medida que suben los precios de los recursos energéticos agotables. Las restricciones sobre los recursos o el uso de combustibles fósiles favorecen a estas tecnologías.

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.

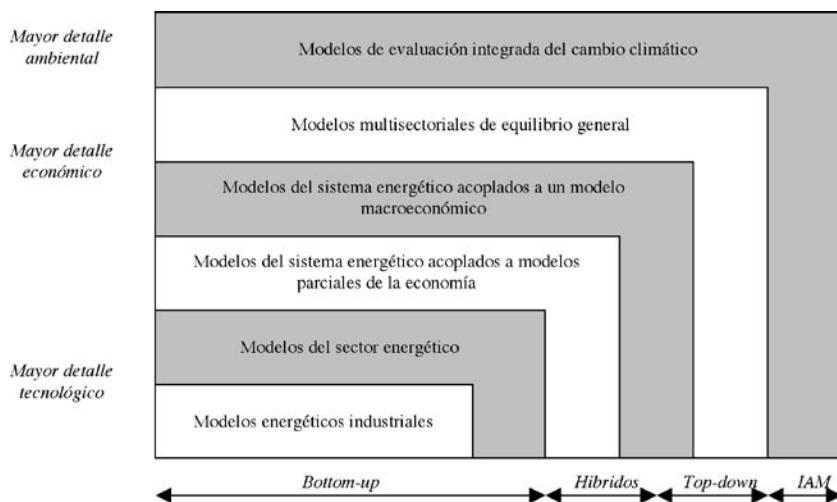
2.3. TIPOS DE MODELOS

Pueden distinguirse cuatro grandes grupos de modelos en función de su cobertura sectorial (o de cómo se ve el sector energético en comparación con el resto de la economía):

- Los modelos ingenieriles (*bottom-up*) del sector energético o de un sector industrial específico.
- Los modelos híbridos con un enfoque mixto económico-ingenieril, que acoplan un modelo del sector energético a uno global o parcial de la economía.
- Los modelos de enfoque económico (*top-down*) que representan a todos los sectores de la economía.
- Los modelos de evaluación integrada del cambio climático (IAM: *integrated assessment models of climate change*) que acoplan un modelo económico a modelos climáticos, ecológicos, e incluso sociales.

La Figura 1 ilustra muestra un esquema de esta clasificación.

FIGURA 1: TIPOS DE MODELOS E3

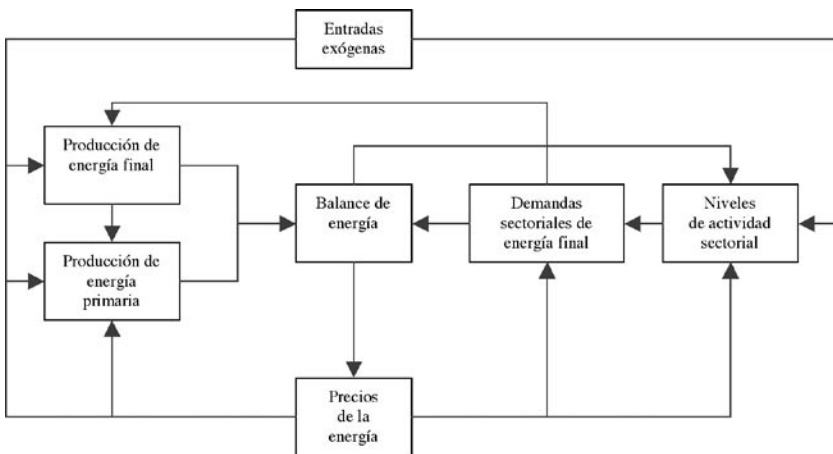


2.3.1. MODELOS INGENIERILES

Los modelos ingenieriles (*bottom-up*) representan con detalle un sistema energético, considerándolo como un conjunto de tecnologías de producción, distribución y demanda final de energía que compiten entre sí. A lo largo del tiempo las tecnologías sufren cambios en su uso, eficiencia, coste y necesidades de energía. La demanda de energía de los sectores no energéticos y la evolución de la población se definen exógenamente, mientras que los precios del sector energético se calculan en el modelo. Estos modelos permiten una mayor desagregación por regiones y por fuentes de energía de la que es posible con otros tipos. Un subtipo de estos modelos serían los modelos energéticos específicos de sectores industriales.

La Figura 2 muestra la estructura genérica de un modelo ingenieril. A partir de unas entradas exógenas (como pueden ser el PIB o la población), de los precios de la energía, y de su oferta, se determinan los niveles de actividad en los sectores que se consideren en el modelo (i.e., la producción industrial, la demanda de transporte, etc.). Con estos niveles de actividad se calculan las demandas de las diferentes formas de energía secundaria (electricidad, gasolina, diesel, etc.). La producción de energía primaria (combustibles fósiles primarios) 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. Los precios se calculan en base a precios históricos, y como resultado de las variaciones de la oferta y la demanda.

FIGURA 2: ESTRUCTURA GENÉRICA DE UN MODELO INGENIERIL



La investigación operativa ha sido muy utilizada para el modelado de sistemas energéticos desde un punto de vista ingenieril (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).

Lo más habitual es encontrar referencias sobre modelos específicos del sector eléctrico (Alexander, 1979; Amagai, 1991; Baughman et al., 1984; Frankel, 1971; Hillsman et al., 1988; Hoster, 1998; Neubauer et al., 1997; Parikh y Deshmukh, 1992; Soloveitchik et al., 2002; Thompson et al., 1976; Uri, 1976; Uri, 1977; Xie Zhijun y Kuby, 1997).

También hay referencias sobre modelos de procesos industriales (McLaren et al., 2000; Pilati y Sparrow, 1980), o de industrias específicas como la industria manufacturera (Newton, 1985), la del acero (Ackerman y de Almeida, 1990; Anandalingam y Bhattacharya, 1985; Hidalgo et al., 2005; Polenske y McMichael, 2002; Sparrow et al., 1979), la del cemento (Szabo et al., 2006) la del aluminio (Charpie y MacAvoy, 1978), la del cobre (Hu y Zandi, 1979), la del papel (Bloemhof-Ruwaard et al., 1996; Bystrom y Lonnstedt, 1997; Jaccard y Roop, 1990; Lehtila y Pirila, 1996; Nystrom y Cornland, 2003), la petroquímica (Calloway y Thompson, 1976; Cervantes et al., 2002; Chambers, 1985), o las industrias extractivas (Beladi y Zuberi, 1988; Gunton, 2004; Limaye y Sharko, 1974; Lin, 1988; Longwell et al., 1995; Plackett et al., 1982; Rapoport, 1975; Xie Zhijun y Kuby, 1997). Otros modelos representan los usos energéticos del sector agrícola (Painuly et al., 1995; Parikh, 1985; Parikh y Ramanathan, 1999; Pokharel y Chandrashekar, 1998).

La Tabla 1 resume las características principales de los modelos ingenieriles más importantes.

TABLA 1: MODELOS INGENIERILES

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (n° de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de previsión de precios	Técnica de resolución
				Producción de energía	Demanda de energía	Sectores no energéticos		
ERM	(Barns et al., 1992)	Global (9)	Largo (2095)	Medio	Medio	Bajo	Miope	Simulación
ENPEP	(Buehring et al., 1991)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Miope	Simulación
ETA	(Manne, 1976)	Nacional (USA)	Medio (2050)	Medio	Medio	Bajo	Perfecto	Optimización
Global-Macro	(Environmental Protection Agency, 1990)	Global (9)	Largo (2100)	Medio	Medio	Bajo	Miope	Simulación
GEMINI	(Scheraga, 1990)	Nacional (USA)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Perfecto	Simulación
IDEAS	(AES Corporation, 1993)	Nacional (USA)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Miope	Simulación
MARKAL	(Rath-Nagel y Stocks, 1982)	Nacional (plantilla)	Medio (2050)	Alto	Alto	Nulo	Perfecto	Optimización
POLES	(Criqui, 1996)	Global (38)	Medio (2030)	Medio	Medio	Bajo	Miope	Simulación
CO2DB	(Messner y Nakicenovic, 1992)	Nacional (plantilla)	Corto	Alto	Alto	Bajo	No aplicable	Simulación
DECADES	(IAEA, 1995)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	No aplicable	Simulación
Energy 2020	(Backus et al., 1993)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Perfecta	Simulación
DNE21	(Fujii y Yamaji, 1998)	Global (10)	Largo (2100)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
MIDAS	(Capros et al., 1991)	Regional (UE)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Miope	Simulación
MESAP	(Voss, 1998)	Nacional (plantilla)	Variable	Alto	Alto	Bajo	Miope	Simulación
LEAP	(Stockholm Environment Institute, 2002)	Nacional (plantilla)	Medio	Medio	Medio	Bajo	No aplicable	Simulación
ISIM	(Hidalgo et al., 2005)	Global (47)	Medio (2050)	Bajo	Medio	Alto	Miope	Simulación
CEMSIM	(Szabo et al., 2006)	Global (47)	Medio (2050)	Bajo	Medio	Alto	Miope	Simulación

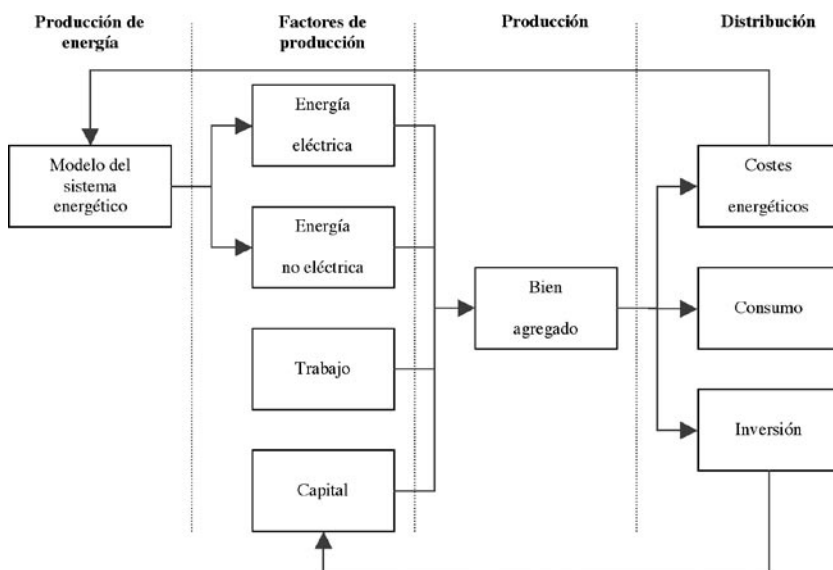


2.3.2. MODELOS HÍBRIDOS

Los modelos híbridos son aquellos que permiten representar las interacciones entre el sistema energético y el resto de la economía. El crecimiento económico se describe mediante una función agregada de producción en la que las diferentes formas de energía se agregan como un factor primario de producción más. 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.

La Figura 3 muestra el esquema genérico de un modelo híbrido.

FIGURA 3: ESTRUCTURA GENÉRICA DE UN MODELO HÍBRIDO



La literatura científica proporciona algunas revisiones y comparaciones de este tipo de modelos (Boyd et al., 1990; Laitner et al., 2003; Lakhani, 1980; Pandey, 2002; Samouilidis y Mitropoulos, 1982; Tessmer et al., 1975; Viguier et al., 2003).

TABLA 2: MODELOS HÍBRIDOS

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (nº de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de previsión de precios	Técnica de resolución
				Producción de energía	Demanda de energía	Sectores no energéticos		
CRTM	(Rutherford, 1992)	Global (5)	Largo (2100)	Medio	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
Global 2100	(Manne et al., 1990)	Global (5)	Largo (2100)	Medio	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización
MARKAL-Macro	(Hamilton et al., 1992)	Nacional (USA)	Medio (2030)	Alto	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización
NEMS	(Energy Information Administration, 2003)	Nacional (USA)	Medio (2020)	Alto	Alto	Medio	Miope	Simulación
IKARUS	(Markewitz et al., 1996)	Nacional (Alemania)	Medio (2020)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
European Energy to 2020 (MIDAS, MEDEE)	(Leydon et al., 1996)	Global (15)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	No aplicable	Simulación
Global Energy Perspectives (Global 2100, MESSAGE)	(Nakicenovic y Jefferson, 1995)	Global (1)	Largo (2100)	Medio	Medio	Bajo	No aplicable	Simulación Optimización
SYRENE (MARKAL)	(Ybema et al., 1995)	Nacional (Holanda)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización

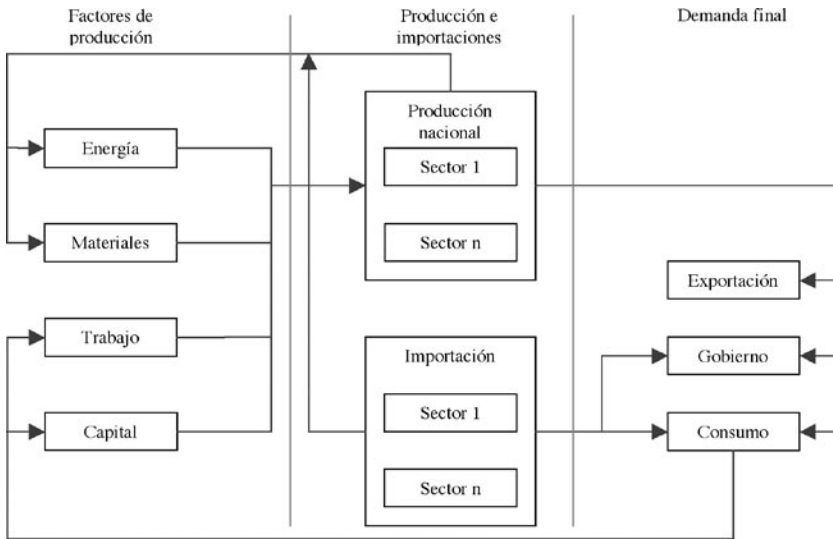
2.3.3. MODELOS DE EQUILIBRIO GENERAL COMPUTABLE

La necesidad de mejorar la representación de la economía provocó la aparición de los primeros modelos con un enfoque económico explícito (*top-down*) basados en la teoría del equilibrio general. 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). Un enfoque complementario a este, que permite análisis más detallados, es el de los modelos de equilibrio parcial. En estos sólo se tiene en cuenta el equilibrio de un único mercado mientras el comportamiento del resto de la economía es dado (European Commission, 1995b).

En estos modelos las empresas y los consumidores optimizan su comportamiento. Las empresas minimizan sus costes y los consumidores maximizan su utilidad. 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 el uso de factores primarios y de bienes intermedios.

La Figura 4 muestra la estructura típica de un modelo de equilibrio general. 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 en los precios. 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.

FIGURA 4: ESTRUCTURA GENÉRICA DE UN MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL



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 precios se ajustan de modo que la demanda total de cada bien es igual a su oferta.
- Los salarios se ajustan de manera que la demanda total de trabajo de los sectores productivos iguala a la oferta de trabajo generada por los consumidores.

- Los tipos de interés alcanzan un nivel donde el capital usado por el sector productivo (la inversión) se iguala con el capital ofertado por los consumidores (el ahorro).
- La demanda final del gobierno se determina equilibrando los ingresos y los gastos del sector público (los ingresos más el déficit son iguales al gasto).

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).

TABLA 3: MODELOS DE EQUILIBRIO GENERAL

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (nº de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de previsión de precios	Técnica de resolución
				Producción de energía	Demanda de energía	Sectores no energéticos		
DGEM	(Jorgenson y Wilcoxon, 1990)	Nacional (USA)	Largo (2050)	Bajo	Medio	Alto	Perfecta	Optimización
Coulder	(Coulder, 1995)	Nacional (USA)	Largo (2070)	Bajo	Bajo	Medio	Perfecta	Optimización
GREEN	(Burniaux et al., 1991)	Global (12)	Largo (2050)	Medio	Medio	Medio	Miope	Optimización
PNL SCM	(Edmonds et al., 1992)	Global (20)	Largo (2100)	Medio	Bajo	Bajo	Intermedio	Optimización
Whalley-Wigle	(Whalley y Wigle, 1992)	Global (6)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Medio	Miope	Optimización
GEM-E3	(European Commission, 1995a)	EU (11)	Medio (2010)	Medio	Alto	Alto	Perfecta	Optimización
PRIMES	(European Commission, 1995b)	Regional (UE)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
E3ME	(Barber, 1998)	EU (14)	Medio (2010)	Medio	Medio	Medio	Miope	Optimización
EPPA	(Babiker et al., 2001)	Global (112)	Largo (2100)	Medio	Medio	Medio	Perfecta	Optimización
G-Cubed	(McKibbin y Wilcoxon, 1998)	Global (112)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización

2.3.4. MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRADA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Como ponen de manifiesto diversos estudios, (IPCC, 1996; Nierenberg, 1995; US National Research Council, 1983), el desarrollo económico influye sobre el clima, mediante la contaminación, y viceversa, a través del coste de reducción de la contaminación y de los efectos de los cambios de los patrones climáticos. (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.

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 puede evaluarse desde una perspectiva sinóptica que tiene dos características;*

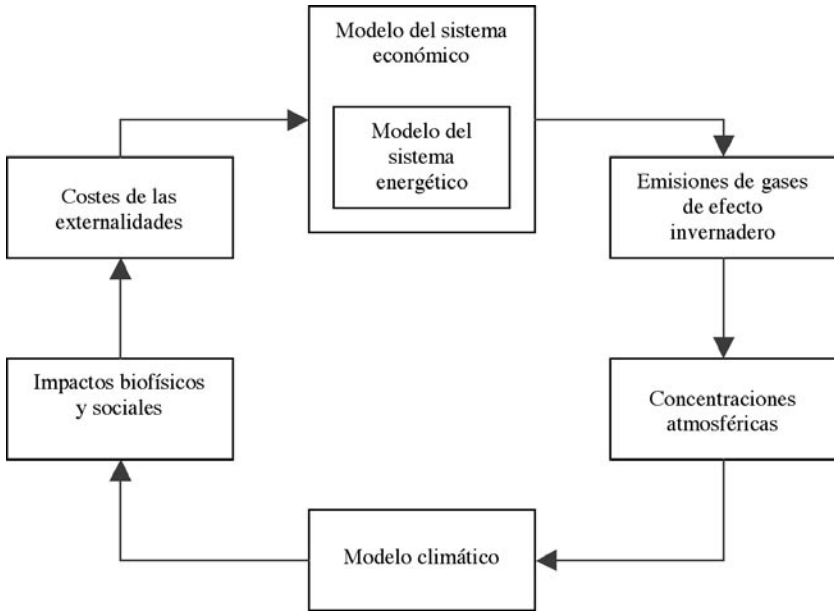
- *Debe tener un valor añadido en comparación con una evaluación unidisciplinaria,*
- *Debe proporcionar información útil como apoyo para la toma de decisiones*

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: *integrated assessment models of climate change*) son por tanto los que combinan modelos del sistema económico y energético con modelos climáticos, ecológicos, oceanográficos y, en algunos casos, sociológicos. Los modelos IAM pueden usarse para evaluar políticas o para optimizarlas (IPCC, 1996). 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.

La Figura 5 muestra la estructura genérica de un modelo de evaluación integrada. 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 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.

FIGURA 5: ESTRUCTURA GENÉRICA DE UN MODELO DE EVALUACIÓN INTEGRADA



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

La Tabla 5 resume las características generales, los determinantes fundamentales de la oferta y demanda de energía, y los mecanismos para representar el cambio tecnológico de cada grupo de modelos.



TABLA 4: MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRADA

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (n° de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de previsión de precios	Técnica de resolución
				Clima	Economía	Atmósfera		
CETA	(Peck y Teisberg, 1992)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
MERGE	(Manne et al., 1995)	Global (5)	Largo (2250)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
IMAGE	(Alcamo, 1994)	Global (13)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
TARGETS	(Rotmans et al., 1994)	Global (2)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
AIM	(Kainuma et al., 2000)	Regional (Pacífico)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
Connecticut	(Nohe y Wallace, 1995)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
CRAPS	(Hammit y Adams, 1996)	Global (2)	Medio (2020)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
CSERGE	(Maddison, 1995)	Global (1)	Largo (2250)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
DICE	(Nordhaus, 1994)	Global (1)	Largo (2105)	Bajo	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización
CFUND	(Tol et al., 1995)	Global (9)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
DIAM	(Chapuis et al., 1995)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
ICAM	(Dowlatabadi y Morgan, 1993)	Global (7)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
IGSM	(Prinn et al., 1998)	Global (12)	Largo (2100)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación
MARIA	(Mori, 1995)	Global (7)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
ProCAM/ MintCAM	(Edmonds et al., 1997)	Global (11, 16)	Largo (2200)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación
PAGE	(Hope et al., 1993)	Global (2)	Largo (2100)	Alto	Alto	Bajo	Miope	Simulación
PEF	(Cohan et al., 1994)	Global (12)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Bajo	Miope	Simulación
RICE	(Nordhaus y Yang, 1996)	Global (6, 10)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
SLICE	(Kolstad, 1996)	Global (1)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
FUGI	(Onishi, 2001)	Regional (200,80)	Medio (2015)	Medio	Bajo	Medio	Miope	Simulación
MAGICC	(Wigley, 1994)	Global (1)	Largo (2100)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación

TABLA 5: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CADA TIPO DE MODELO

Tipo de modelo	Características generales		Demanda de energía		Producción de energía		Medio ambiente		Impactos y externalidades
			Factores determinantes	Eficiencia energética	Combinación de oferta	Cambio tecnológico	Atmósfera y clima		
Sector energético	No se modelan explícitamente bienes no energéticos. El PIB es exógeno. Las tecnologías de producción y demanda de energía se representan con detalle.		La demanda se calcula en función de las proyecciones económicas y demográficas, y es sensible a los precios de la energía.	Hay una rotación explícita del capital y una mejora implícita en los patrones de demanda.	Las ofertas compiten en función de los costos y de otros factores dependientes del uso final.	Los agentes expanden su capacidad y modifican su tecnología optimizando su comportamiento.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	No se consideran.	
Híbridos	El PIB es endógeno, pero la economía produce un único bien agregado. Se calcula equilibrio para el bien agregado, los factores primarios y los bienes energéticos agregados. La producción de energía se modela con detalle.		A partir de una función agregada de producción, la sustitución de una utilidad determina la evolución del consumo.	La intensidad energética baja por una mejora exógena de la eficiencia energética, y por mecanismos de sustitución entre combustibles y factores inducidos por cambios en los precios.	Se escoge la combinación de costo mínimo para maximizar la utilidad del consumo.	Determinado por los límites de penetración en el mercado, el agotamiento de los recursos, y por costos específicos.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	No se consideran.	
Equilibrio general	El PIB es endógeno, y se distingue la producción de cada sector. Se calcula el equilibrio del mercado energético de los demás factores primarios de producción y todos los bienes considerados. La tecnología no se representa explícitamente.		Las empresas minimizan sus costos para satisfacer la demanda. Los consumidores se comportan de modo que maximizan una utilidad.	El crecimiento de la productividad viene dado por los precios y la sustitución entre factores.	Los agentes optimizan una demanda endógena a precios endógenos.	Se representa implícitamente las funciones de costo estimadas para el sector energético.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	En algunos modelos se tienen en cuenta los costos de algunas externalidades, y los costos de las medidas de reducción de emisiones.	
Evaluación integrada	La economía se modela mediante un modelo de equilibrio general, o bien se usan proyecciones exógenas de la evolución económica y demográfica.		No se considera explícitamente en los modelos parciales. En los demás depende de las especificaciones del módulo económico.	Depende de las especificaciones del módulo económico.	Depende de las especificaciones del módulo económico.	Depende de las especificaciones del módulo económico.	Se calculan la variación de la composición atmosférica y los cambios climáticos derivados de las actividades económicas.	Se valoran todos los impactos: derivados de los daños provocados por la alteración del clima y por las medidas de reducción de la contaminación.	

2.4. RESULTADOS DE LOS MODELOS

Los resultados de los modelos E3 que se basan en un conjunto dado de datos e hipótesis conforman un escenario. Normalmente cada modelo tiene asociado un escenario de referencia o BAU (*business as usual*) que considera que las tendencias actuales se mantienen durante todo el periodo de simulación del modelo. Este escenario de referencia suele acompañarse de un conjunto de escenarios alternativos basados en datos o hipótesis diferentes. El escenario BAU se usa frecuentemente, más que como proyección más probable, como referencia con el que comparar los escenarios alternativos. El IPCC hace uso extensivo de este tipo de comparaciones (IPCC, 2000).

Entre las variables de mayor interés de un modelo energético se encuentran el consumo total de energía, los precios y las cantidades de cada fuente de energía, y la asignación de recursos entre las diferentes demandas de energía que compiten entre sí. Otros resultados típicos de los modelos E3 son las emisiones de gases de efecto invernadero, y los costes de control y reducción de las emisiones. En cuanto a las tecnologías, se obtiene la evolución de sus costes, sus cuotas de mercado y su grado de difusión. Los resultados específicos de un modelo dependen mucho de su estructura. Un ejemplo de los resultados que puede proporcionar un modelo E3 como POLES puede encontrarse en el informe *World energy, technology and climate policy Outlook 2030* (European Commission, 2003)¹⁰.

El grado de incertidumbre en los resultados es muy difícil de cuantificar puesto que proviene de una combinación muy compleja de datos, hipótesis y ecuaciones (Cocks et al., 1998; Craig et al., 1980; Shlyakhter et al., 1994). El hecho de que un modelo sea capaz de reproducir muy bien la evolución pasada de un sistema no implica que sus proyecciones sean menos inciertas que las de otros modelos que no replican tan bien el pasado. Puesto que los métodos de modelado y los datos disponibles son limitados, los resultados de los modelos E3 deben ser vistos más bien como indicadores de hacia dónde pueden conducir las hipótesis que los fundamentan, en vez de ser interpretados como predicciones exactas del futuro.

3. EL MODELO POLES

3.1. DESCRIPCIÓN

El modelo POLES (*Prospective Outlook for the Long-term Energy System*) ha sido desarrollado conjuntamente por el Instituto de Estudios de Política Energética (LEPII-EPE) del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia, y por el Instituto de Estudios de Prospectiva Tecnológica (IPTS), del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea. POLES es un modelo de simulación concebido para desarrollar escenarios a largo plazo (2050) que

¹⁰ El informe puede obtenerse en <http://energy.jrc.es/Pages/EnergyOutlooks.htm>

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 escala 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 modulo 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 OCDE las regiones con mayor nivel de detalle geográfico.

Para cada región el modelo consiste en cuatro módulos que se centran en:

- la demanda de energía final por sectores,
- las tecnologías energéticas emergentes o basadas en recursos renovables,
- el sistema de producción de electricidad y el de transformación de energía primaria y,
- el suministro de energía primaria.

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.

3.1.1. 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.

3.1.2. 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.

3.1.3. 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.

3.1.4. 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 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.

3.1.5. 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 refinación 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 CO₂, 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.

3.2. 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.

3.2.1. ESCENARIO DE REFERENCIA

WETO describe un escenario de referencia que proporciona una descripción del sistema energético mundial futuro, que sería el resultado de la combinación de las tendencias actuales del sector y de los cambios estructurales en la economía mundial. Los resultados de este escenario deberían verse como un patrón de referencia para la evaluación de políticas alternativas en el ámbito de los recursos, la tecnología y el medioambiente. Una buena comprensión de las implicaciones a largo plazo es un elemento clave para establecer prioridades de investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la energía y el medio ambiente. El escenario de referencia representa una evolución esperable que puede ser mejorada si se implementan las políticas apropiadas.

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 CO₂ aumentarían más rápidamente que el consumo de energía, al 2.1% anual. En 2030 las emisiones de CO₂ 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 €/barril¹¹ 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

¹¹ Los precios se expresan en € de 1999 por barril de petróleo equivalente.

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 bajaría 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.

3.2.2. 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 CO₂ 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 CO₂ 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.

3.2.3. EL MERCADO DE GAS DE LA UE DESDE UNA PERSPECTIVA MUNDIAL

El mercado de la UE se está expandiendo rápidamente y se espera continúe haciéndolo durante los próximos 20 años, como consecuencia del creciente uso del gas para la generación de electricidad. No obstante, también se prevé que la contribución de la UE al consumo mundial de gas disminuya.

Las reservas mundiales de gas son abundantes pero se concentran en la antigua Unión Soviética y el Oriente Medio, donde la producción de gas crecerá considerablemente durante los próximos 30 años. Por el contrario, las reservas europeas son limitadas y la producción de gas bajará después de 2010, aumentando la dependencia de los proveedores externos.

La demanda de gas natural aumentará también en el resto del mundo. Algunas regiones con recursos limitados o en declive se convertirán en importadores netos dando lugar a importantes cambios en el comercio mundial de gas. Por ejemplo, el rápido crecimiento de la demanda de gas en Asia influirá en el suministro de gas a la UE en 2030. Mientras que se prevé que Asia importe gas de Oriente Medio, la UE importarán cada vez más gas de la antigua Unión Soviética.

Este resultado puede traducirse en mayores riesgos para el suministro de la UE, que podrían verse limitados por las diversas acciones perfiladas en el Libro Verde sobre Seguridad del Abastecimiento Energético¹², tales como la multiplicación de las rutas de transporte de gas, una mayor integración de las redes europeas de transporte de gas, y un diálogo continuado con los países productores. Se espera que el número de contratos de suministro a largo plazo de gas natural licuado aumenten más moderadamente y provengan de fuentes más diversas en África y Oriente Medio.

3.2.4. IMPACTO DE LAS POLÍTICAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

Por medio de la asignación de un valor al carbono al usar combustibles fósiles, las emisiones de CO₂ de la UE en 2030 serían un 26% inferiores 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

¹² <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l27037.htm>

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. Finalmente, las energías eólica y solar crecerían un factor 20.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerman, F., y de Almeida, P.E.F. (1990): "Iron and Charcoal the Industrial Fuelwood Crisis in Minas Gerais", *Energy Policy*, 18, 7, 661-668.
- 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.
- Alcamo, J. (1994): *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Press, Dordrecht/Boston.
- 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.
- 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.
- 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.
- Anderson, D. (1972): "Models for Determining Least-Cost Investments in Electricity Supply", *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 3, 1, 267-299.
- 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.
- Backus, G., Amlin, J., y Kleeman, S. (1993): "Introduction to Energy 2020", Systematic Solutions, Inc., Fairborn, OH.
- 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 Policy Analysis", *Energy*, 8, 3, 169-197.
- Barker, T. (1998): "The Effects on Competitiveness of Coordinated versus Unilateral Fiscal Policies Reducing GHG Emissions in the EU: An Assessment of a 10% Reduction by 2010 Using the E3ME Model", *Energy Policy*, 26, 14, 1083-1098.
- Barnett, J., Dessai, S. y Webber, M. (2004): "Will OPEC Lose from the Kyoto Protocol?" *Energy Policy*, 32, 18, 2077-2088.
- 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 N° 113, OECD Economics Department, Paris.

- 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.
- Beaver, R. (1993): "Structural Comparison of the Models in EMF 12", *Energy Policy*, 21, 3, 238-248.
- 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.
- Beladi, H. y Zuberi, H.A. (1988): "Environmental Constraints and a Dynamic Model for Energy Development", *Energy Economics*, 10, 1, 18-28.
- Bergman, L. (1988): "Energy Policy Modeling: A survey of General Equilibrium Approaches", *Journal of Policy Modeling*, 10, 3, 377-399.
- Bhattacharyya, S.C. (1996): "Applied General Equilibrium Models for Energy Studies: a Survey", *Energy Economics*, 18, 3, 145-164.
- 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.
- Boyd, G., Fox, J. y Hanson, D. (1990): "3.4. Set of models", *Energy*, 15, 3-4, 345-362.
- 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.
- Bunn, D.W. y Larsen, E.R. (1997): "Systems Modelling for Energy Policy", John Wiley and Sons, Ltd.
- 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 CO₂ Emissions: A Technical Manual", Working Paper N° 104, OECD Department of Economics and Statistics, Paris.
- Bystrom, S. y Lonnstedt, L. (1997): "Paper Recycling: Environmental and Economic Impact", *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 2, 109-127.
- 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.
- Capros, P., Karadeloglou, L., Mantzos, L. y Mentzas, G. (1991): "MIDAS Energy System Model for EU", National Technical University of Athens, Athens.
- 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.

- 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.
- 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.
- Charpie, R.A. y MacAvoy, P.W. (1978): "Conserving Energy in the Production of Aluminum", *Resources and Energy*, 1, 1, 21-42.
- 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.
- 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.
- Craig, P.P., Levine, M.D. y Mass, J. (1980): "Uncertainty-an Argument for more Stringent Energy Conservation", *Energy*, 5, 10, 1073-1083.
- Criqui, P. (1996): "Prospective Outlook on Long-term Energy Systems", EUR 17358 EN, European Commission, Brussels.
- Diesendorf, M. (1998): "Australian Economic Models of Greenhouse Abatement", *Environmental Science & Policy*, 1, 1, 1-12.
- 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.
- Dowlatabadi, H. y Morgan, M.G. (1993): "A Model Framework for Integrated Studies of the Climate Problem", *Energy Policy*, 21, 3, 209-221.
- 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.
- 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.
- Energy Information Administration (1991): "Near-Term, Midterm and Long-Term Forecasting in the National Energy Modeling System", NEMS Project Office, Washington DC.
- Energy Information Administration (2003): "The National Energy Modeling System: an Overview", DOE/EIA-0581(2003), Washington DC.

- Environmental Protection Agency (1990): "Policy Options for Stabilizing Global Climate", Report to the Congress, Technical Appendices, Washington DC.
- European Commission (1995a): "GEM-E3 Computable General Equilibrium Model for Studying Economy-Energy-Environment Interactions", EUR 16714 EN, DG XII, Brussels.
- European Commission (1995b): "The PRIMES Energy System Model: Reference Manual", DG XII, Brussels.
- European Commission (2003): "World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030 - WETO", EUR 20366, DG Research, Brussels.
- Feltenmark, S. (1997): "On Optimization of Power Production", Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Fernández-Armesto, F. (2002): *Civilizaciones - La lucha del hombre por controlar la naturaleza*, Taurus.
- Foell, W.K. (1980): "A Systems Approach to Regional Energy/Environment Management", *Regional Science and Urban Economics*, 10, 3, 303-324.
- Frankel, R.J. (1971): "Environmental Quality Considerations in Planning the Future of the Coal-Electric Power Industry", *Atmospheric Environment (1967)*, 5, 12, 1051-1056.
- Fujii, Y. y Yamaji, K. (1998): "Assessment of Technological Options in the Global Energy System for Limiting the Atmospheric CO₂ Concentration", *Environmental Economics and Policy Studies*, 1, 113-139.
- 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.
- Grubb, M. (1993): "Policy Modelling for Climate Change: The Missing Models", *Energy Policy*, 21, 3, 203-208.
- Gunton, T. (2004): "Energy Rent and Public Policy: An Analysis of the Canadian Coal Industry", *Energy Policy*, 32, 2, 151-163.
- 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.
- Hammitt, J.K. y Adams, J.L. (1996): "The Value of International Cooperation for Abating Global Climate Change", *Resource and Energy Economics*, 18, 3, 219-241.
- Hidalgo, I., Szabo, L., Carlos Ciscar, J. y Soria, A. (2005): "Technological Prospects and CO₂ Emission Trading Analyses in the Iron and Steel Industry: A Global Model", *Energy*, 30, 5, 583-610.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Hubbard, R. y Weiner, R. (1983): "The 'SubTrigger' Crisis: An Economic Analysis of Flexible Stock Policies", *Energy Economics*, 5, 3, 178-189.
- 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.
- 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.
- 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.
- IAEA (1995): "The DECADES Project Outline and General Overview", International Atomic Energy Agency, Viena.
- Idso, S.B. (1984): "Shortcomings of CO₂-Climate Models Raise Questions about the Wisdom of Energy Policy Implications", *Applied Energy*, 16, 1, 53-57.
- 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.
- 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.
- Isoard, S. y Soria, A. (1999): "Flexible Returns and the Diffusion of Innovation Policy", *International Journal of Technology Management*, 18, 5/6/7/8.
- Isoard, S. y Soria, A. (2001): "Technical Change Dynamics: Evidence from the Emerging Renewable Energy Technologies", *Energy Economics*, 23, 6, 619-636.
- 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.
- Jorgenson, D.W. y Wilcoxon, P.J. (1990): "Environmental Regulation and U.S. Economic Growth", *The RAND Journal of Economics*, 21, 2, 314-340.

- 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.
- Kavrakoglu, I. (1980): "Models for National Energy Policy Analysis and Planning", *Automatica*, 16, 4, 379-392.
- Kavrakoglu, I. (1982): "OR and Energy: Problems of Modelling", *European Journal of Operational Research*, 11, 3, 285-294.
- Kavrakoglu, I. (1983): "Modelling Energy- Economy Interactions", *European Journal of Operational Research*, 13, 1, 29-40.
- 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.
- 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.
- Koreisha, S. (1980): "The limitations of energy policy models", *Energy Economics*, 2, 2, 96-110.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- Leydon, K., Decker, M., Waterlow, J., Benville, M. y Gray, D. (1996): "European Energy to 2020: A Scenario Approach", European Commission, DG XVII, Brussels.
- Limaye, D.R. y Sharko, J.R. (1974): "US Energy Policy Evaluation: Some Analytical Approaches", *Energy Policy*, 2, 1, 3-17.
- Lin, W.T. (1988): "The Dynamic Behavior of Production in the Extractive Industry", *Resources and Energy*, 10, 3, 225-246.
- 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.
- Loschel, A. (2002): "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey", *Ecological Economics*, 43, 2-3, 105-126.
- Lyness, F.K. (1978): "O.R. and U.K. Natural Gas Depletion Strategy", *European Journal of Operational Research*, 2, 3, 160-167.
- Maddison, D. (1995): "A Cost-Benefit Analysis of Slowing Climate Change", *Energy Policy*, 23, 4-5, 337-346.
- Manne, A.S. (1976): "ETA: A Model for Energy Technology Assessment", *The Bell Journal of Economics*, 7, 2, 379-406.
- 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.
- Manne, A.S., Richels, R.G. y Hogan, W.W. (1990): "CO₂ Emission Limits: An Economic Cost Analysis for the USA", *The Energy Journal*, 11, 2, 51-86.
- 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.
- McKibbin, W.J. y Wilcoxon, P. (1998): "The Theoretical and Empirical Structure of the G-Cubed Model", *Economic Modelling*, 16, 1, 123-148.
- 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.
- Meier, P.M. (1982): "Energy Modelling in Practice: An Application of Spatial Programming", *Omega*, 10, 5, 483-491.
- Messner, S. y Nakicenovic, N. (1992): "A Comparative Assessment of Different Options to Reduce CO₂ Emissions", *Energy Conversion and Management*, 33, 5-8, 763-771.
- 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.

- Moore, C.L. y Zoltners, A.A. (1976): "Optimal Regional Distribution of Petroleum Products", *Omega*, 4, 3, 301-311.
- 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.
- Nakicenovic, N. y Jefferson, M. (1995): "Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond", WP-95-127, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg.
- 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.
- Newton, J.K. (1985): "Modelling Energy Consumption in Manufacturing Industry", *European Journal of Operational Research*, 19, 2, 163-169.
- Nierenberg, W.A. (1995): "Looking Back 10 Years", *Energy Policy*, 23, 4-5, 283-288.
- Nordhaus, W.D. (1994): "Managing the Commons: The Economics of Climate Change", The MIT Press, 213.
- Nordhaus, W.D. (1995): "The Ghosts of Climates Past and the Specters of Climate Change Future", *Energy Policy*, 23, 4-5, 269-282.
- 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.
- Nystrom, I. y Cornland, D. W. (2003): "Strategic Choices: Swedish Climate Intervention Policies and the Forest Industry's Role in Reducing CO₂ Emissions", *Energy Policy*, 31, 10, 937-950.
- Onishi, A. (2001): "The World Economy to 2015: Policy Simulations on Sustainable Development", *Journal of Policy Modeling*, 23, 2, 217-234.
- Painuly, J.P., Rao, H. y Parikh, J. (1995): "A Rural Energy-Agriculture Interaction Model Applied to Karnataka State", *Energy*, 20, 3, 219-233.
- Pandey, R. (2002): "Energy Policy Modelling: Agenda for Developing Countries", *Energy Policy*, 30, 2, 97-106.
- Parikh, J. (1985): "Modeling Energy and Agriculture Interactions-I: A Rural Energy Systems Model", *Energy*, 10, 7, 793-804.
- Parikh, J. y Deshmukh, S.G. (1992): "Policy Alternatives for Western and Southern Power Systems in India", *Utilities Policy*, 2, 3, 240-247.
- Parikh, J.K. y Ramanathan, R. (1999): "Linkages among Energy, Agriculture and Environment in Rural India", *Energy Economics*, 21, 6, 559-583.
- Peck, S.C. y Teisberg, T.J. (1992): "CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment", *The Energy Journal*, 13, 1, 55-78.

- Pilati, D. y Sparrow, F.T. (1980): "The Brookhaven Process Optimization Models", *Energy*, 5, 5, 417-428.
- 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.
- Pokharel, S. y Chandrashekar, M. (1998): "A Multiobjective Approach to Rural Energy Policy Analysis", *Energy*, 23, 4, 325-336.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rath-Nagel, S. y Stocks, K. (1982): "Energy Modelling for Technology Assessment: the MARKAL Approach", *Omega*, 10, 5, 493-505.
- Rath-Nagel, S. y Voss, A. (1981): "Energy Models for Planning and Policy Assessment", *European Journal of Operational Research*, 8, 2, 99-114.
- 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.
- 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).
- Rowse, J.G. y Copithorne, L.W. (1982): "Natural Resource Programming Models and Scarcity Rents", *Resources and Energy*, 4, 1, 59-85.
- Rutherford, T.F. (1992): "The Welfare Effects of Fossil Carbon Restrictions: Results from a Recursively Dynamic Trade Model", Working Paper N° 112, OECD Economics Department, Paris.
- Samouilidis, J.E. (1980): "Energy Modelling: A New Challenge for Management Science", *Omega*, 8, 6, 609-621.
- Samouilidis, J.E. y Berahas, A. (1983): "Energy Policy Modelling in Developing and Industrializing Countries", *European Journal of Operational Research*, 13, 1, 2-11.

- Samouilidis, J.E. y Mitropoulos, C.S. (1982): "Energy-Economy Models: A Survey", *European Journal of Operational Research*, 11, 3, 222-232.
- Samouilidis, J.E. y Pappas, I.A. (1980): "A Goal Programming Approach to Energy Forecasting", *European Journal of Operational Research*, 5, 5, 321-331.
- Samouilidis, J.E., Psarras, J. y Papaconstantinou, D. (1984): "Electricity Planning vs Energy Planning: A Modelling Approach", *Omega*, 12, 4, 341-346.
- Scheraga, J.D. (1990): "GEMINI: An Energy-Environmental Model of the United States", U.S. Environmental Protection Agency.
- Schulz, V. y Stehfest, H. (1984): "Regional Energy Supply Optimization with Multiple Objectives", *European Journal of Operational Research*, 17, 3, 302-312.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Stockholm Environment Institute (2002): "Long-range Energy Alternatives Planning System, User Guide", Stockholm Environment Institute (SEI), Tellus Institute, Boston, MA.
- Stratton, A. (1979): "Energy Forecasting", *Omega*, 7, 6, 493-502.
- Szabo, L., Hidalgo, I., Ciscar, J.C. y Soria, A. (2006): "CO₂ Emission Trading within the European Union and Annex B Countries: The Cement Industry Case", *Energy Policy*, 34, 1, 72-87.
- 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.
- 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.
- 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.

- Ulph, A.M. (1980): "World Energy Models-A Survey and Critique", *Energy Economics*, 2, 1, 46-59.
- Uri, N.D. (1976): "Optimal Investment, Pricing and Allocation of Electrical Energy in the USA", *Applied Mathematical Modelling*, 1, 3, 114-118.
- Uri, N.D. (1977): "An Assessment of Interfuel Substitution by Electric Utilities", *Applied Mathematical Modelling*, 1, 5, 253-256.
- 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.
- Van der Voort, E. (1982): "The EFOM 12C Energy Supply Model within the EC Modelling System", *Omega*, 10, 5, 507-523.
- Varios (1990): "Special Issue", *Energy*, 15, 3-4.
- 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.
- Voss, A. (1998): "MESAP Manual", Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- 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.