

IKERLANAK

DANTE: UN MEGA DINÁMICO PARA EL CONTROL DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

by

Mikel González

2006

Working Paper Series: IL. 22/06

Departamento de Fundamentos del Análisis Económico I

Ekonomi Analisiaren Oinarriak I Saila



University of the Basque Country

DANTE: Un MEGA dinámico para el control del cambio climático en España

Mikel González*

Fundamentos del Análisis Económico I, Universidad del País Vasco, Bilbao, España

RESUMEN

El estudio de los impactos económicos de las políticas de control del cambio climático requiere del uso de modelos adecuados. Este artículo presenta un Modelo Dinámico de Equilibrio General Aplicado tipo Ramsey. El modelo implementa un mercado de permisos de emisión perfecto que se garantiza una reducción de emisiones eficiente y efectiva, permitiéndonos calcular los costes económicos mínimos asociados al control de las emisiones de efecto invernadero. Además aprovecha al máximo la disponibilidad de datos existentes en España 1) utilizando una matriz de contabilidad social (o SAM) energética mediante la integración de la información económica de la Tablas Input-Output y la información energética de los Balances Energéticos y 2) considerando todas las emisiones sujetas a control además del CO₂. Los MEGAs dinámicos son inéditos en cuanto a su elaboración y aplicación en España y permiten investigar *ex-ante* los efectos de políticas públicas en el medio y en largo plazo.

Palabras Clave: Políticas Públicas, Equilibrio General Dinámico; Cambio Climático;

Clasificación JEL: H20, D58, Q20,

* Universidad del País Vasco, *e-mail*: mgonzalez070@ikasle.ehu.es. El autor agradece a Rob Dellink su apoyo en la elaboración del modelo DANTE durante su estancia en la Universidad de Wagenigen y al Ministerio de Educación por la financiación recibida para este proyecto (FPU-2002-1001).

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se están estudiado extensamente las relaciones entre la acción del hombre, la acumulación de gases de efecto invernadero (GEIs) y el cambio climático. Uno de los debates internacionales de mayor actualidad es precisamente alcanzar un acuerdo sobre los niveles de reducciones de GEIs adecuados para prevenirnos de los efectos adversos de un posible cambio climático. Una decisión racional al respecto requiere conocer no solo los beneficios de dichas políticas, sino también los costes económicos asociados a dichas reducciones. La literatura que estudia este tipo de impactos se ha ido desarrollando a partir de algunos estudios pioneros como Nordhaus (1978) y especialmente durante los años noventa a raíz del acuerdo del Protocolo de Kyoto (UN 1997) para el controlar las emisiones globales. Un buen resumen de estas aportaciones puede encontrarse en Weyant (1993) y Springer (2003).

Los programas de investigación encargados de estudiar los impactos económicos de ciertas políticas públicas, como la climática, requieren de una mejora paulatina en el uso de metodologías. Este artículo hace un repaso a la evolución reciente de los modelos más utilizados para el caso particular del control del cambio climático y presenta un avance interesante en la materia; un Modelo Económico-Ambiental Dinámico de Equilibrio General Aplicado que llamaremos modelo DANTE.

Los Modelos de Equilibrio General Aplicado (MEGAs) son modelos con una importante complejidad técnica e intensivos en cuanto a datos, pero son necesarios para el análisis de aquellas políticas que afectan de una general al sistema económico. La mayoría de los MEGAs existentes a nivel internacional son estáticos (i.e. GEM-E3, Capros *et al.* 1998) existiendo pocos ejemplos de modelos dinámicos. Por lo demás, la mayoría de los modelos dinámicos existentes son recursivos (i.e. MIT-EPPA, Babiker *et al.* 2001); es decir, se resuelven periodo a periodos sin que exista una maximización real en todo el horizonte temporal. Esta limitación es importante ya que no nos permite considerar comportamientos intertemporales.

DANTE es un MEGA dinámico tipo Ramsey basado en expectativas perfectas en donde los agentes deciden de manera endógena aquella relación de ahorro y consumo que

maximiza la utilidad en todo el horizonte temporal. Esta característica nos va a permitir investigar convenientemente los efectos de políticas que se extienden en el largo plazo. La dinámica comparativa es una forma usual de hacer experimentos controlados en economía (c.f Chiang 1988): se compara un escenario sin restricción en las emisiones con otro en el que sí están restringidas; la diferencia entre ambos será atribuible, *caeteris paribus*, al efecto inducido por el control de la contaminación. Este tipo de modelos son inéditos en cuanto a su elaboración y aplicación en España

El modelo ha sido construido para analizar el problema del cambio climático para el caso particular de España. Por ello cuenta con una estructura teórica específica para relacionar el sistema económico y el medio ambiente, particularmente, de los flujos energéticos y de las emisiones de efecto invernadero. Una de sus características novedosas es que para ello hemos elaborado una Matriz de Contabilidad Social (o SAM) energética a partir de la información económica de la Tabla Input-Output y de la información energética de los Balances Energéticos Físicos. Esta integración otorga al análisis un valor añadido importante por la mayor precisión en los resultados. Otra aportación interesante es que el modelo permite considerar todas las emisiones de GEIs sujetas a control además del CO₂, algo inusual pero importante (c.f Reilly et Al., 2004) y que en España supone cerca del 25% de las emisiones totales.

La estructura básica del modelo DANTE podría ser utilizada por otros investigadores y para otras aplicaciones a la hora de evaluar los impactos económicos *ex-ante* de otras políticas que, como la climática, afecten de una manera global en la economía; como las políticas fiscales, energéticas, comerciales o las medioambientales.

El artículo se organiza como sigue: en primer lugar hacemos un repaso de los modelos más utilizados en el cálculo de los impactos de la política contra el cambio climático. Posteriormente introducimos los Modelos de Equilibrio General Aplicados (MEGA) para finalmente hacer una presentación del modelo DANTE junto con su estructura teórica ecuación por ecuación.

2. MODELOS DE CONTROL CLIMÁTICO

La literatura muestra diferentes maneras de analizar los impactos económicos de la política contra el cambio climático. Los objetivos específicos de cada investigación deciden en gran medida las características del modelo a utilizar, ya que difícilmente puede existir un modelo que trate todos los aspectos en detalle. Por eso, existen diferentes tipos de modelos que han ido desarrollándose y que nos permiten obtener diferentes visiones de un mismo problema.

Siguiendo a Springer (2003) podemos clasificar estos modelos en cinco categorías fundamentales y complementarias. La figura 2.1 recoge una clasificación de estos tipos y que incluyen algunos de los nombre más reconocidos.

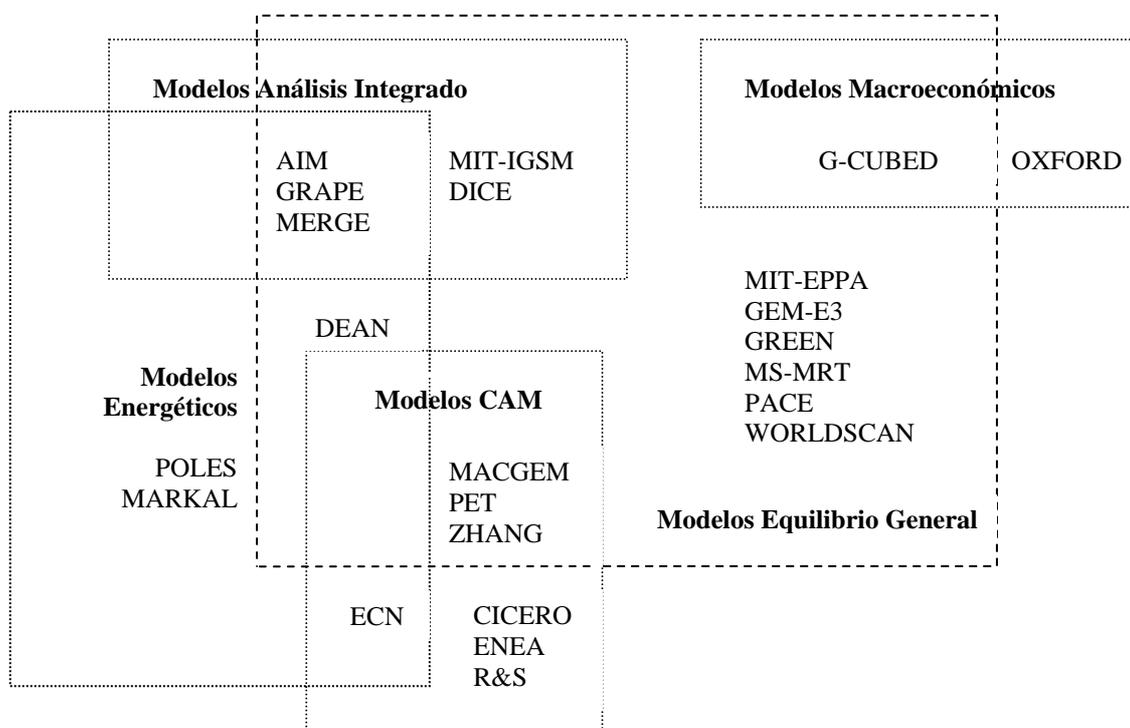


Figura 1: Tipos de Modelos. (Adaptado de Springer 2003)

2.1. Modelos Energéticos

Los modelos energéticos fueron los pioneros en el análisis de los impactos económicos de las políticas energéticas y medioambientales. En un inicio eran modelos de optimización o programación lineal, con un alto nivel de detalle tecnológico, y posteriormente fueron incluyendo funciones no lineales; ya que éstas representan mejor

la sustituibilidad entre factores y el comportamiento de los agentes. En la actualidad estos modelos son modelos de equilibrio parcial que centran su esfuerzo en una caracterización profunda de los sectores energéticos y eléctricos. Ejemplos conocidos son el modelo MARKAL (Seebregts *et al.* 2001) y el modelo POLES (Criqui P. 2001).

Estos modelos, también conocidos como modelos ingenieriles o modelos “bottom-up”, tienen dos inconvenientes principales; en primer lugar, en ellos la demanda energética es considera exógena e independiente de los precios, y en segundo lugar, sólo consideran los sectores energéticos por lo que las relaciones con el resto de la economía apenas son tenidas en cuenta.

2.2. Modelos de Equilibrio General Aplicado

Los modelos de equilibrio general se basan en la teoría neoclásica sobre el comportamiento de los agentes y el funcionamiento de los mercados. Estos modelos son también conocidos como modelos “top-down” ya que consideran la economía en su conjunto. Algunos ejemplos notables son el modelo EPPA (Babiker *et al.* 2001) del MIT y el modelo GEM-E3 de la Comisión Europea (Capros *et al.* 1998).

Los modelos de equilibrio general tienen la ventaja de presentar una sólida base microeconómica y de permitir capturar todas las interrelaciones económicas. Por ello se utilizan ampliamente en el análisis los impactos de muchos tipos de políticas como las relacionadas con el cambio climático y los combustibles fósiles. En el siguiente apartado analizaremos con más detalle este tipo de modelos.

Por otro lado, los modelos Input-Output podrían estar dentro de esta categoría ya que utilizan el concepto de equilibrio y consideran toda la economía. La diferencia estriba en su carácter lineal marcada por estructuras fijas de producción y consumo. Un modelo Input-Output es finalmente un MEGA con elasticidades de sustitución nulas. Esta simplificación es muy útil para investigar políticas en el corto plazo puesto que las posibilidades de sustitución son entonces limitadas.

Estos modelos también presentan algunas desventajas. La principal recae en el supuesto de equilibrio o mercados perfectos; algo difícilmente observable en el caso del mercado

de trabajo (c.f Blanchard y Fischer 1989). Otro problema es que esta metodología supone unos factores perfectamente transferibles entre sectores y agentes, quedando los costes de ajuste o transición generalmente obviados en el análisis.

En los últimos años están surgiendo un tipo de modelos llamados “híbridos” que combinan los modelos “bottom-up” y los modelos “top-down” aprovechando sus ventajas. Ejemplos notables son el modelo MERGE (Manne *et al.*1995) y el modelo GRAPE (Korosawa *et al.*1999). Dos aportaciones interesantes en esta dirección son Bohringer (1998) que realiza una síntesis teórica de la unión de estos dos aspectos para un número limitado de sectores y Dellink *et al.* (2004) que presenta un método práctico para integrar la información bottom-up en todos los sectores económicos de un MEGA.

2.3. Modelos Macroeconómicos Neo-Keynesianos

Los modelos macroeconómicos Neo-Keynesianos son una variedad de los modelos “top-down” o de equilibrio general. La diferencia principal estriba en que no se fundamentan enteramente en la teoría microeconómica neoclásica sino que también basan su análisis en tendencias históricas y series de datos. El componente principal de estos modelos es el lado de la demanda que generalmente suele ser bastante agregado. Otra de sus características es que no suponen necesariamente un equilibrio en los mercados y, por ello, son a veces llamados modelos de “desequilibrio”. Algunos ejemplos notables son el modelo G-CUBED (McKibbin *et al.* 1999) y el modelo OXFORD (Cooper *et al.*2005).

Estos modelos tienen una importante carga econométrica en el establecimiento de correlaciones. Su mejor ajuste a la realidad les hace útiles para las estimaciones en el corto plazo, mientras que en el largo plazo los modelos de equilibrio general están más indicados. En general el uso de este tipo de modelos es bastante raro en la literatura.

2.4. Modelos de Análisis Integrado

Los modelos de Análisis Integrado se caracterizan por incluir los procesos económicos y los climáticos de manera conjunta. Para ello integra los impactos de la actividad económica en el cambio climático (efectos hacia delante) y los impactos del cambio climático en la actividad económica (efectos hacia atrás).

Una de las principales ventajas de este tipo de modelos es que permiten integrar los costes y los beneficios de las políticas de reducción de las emisiones haciendo posible obtener soluciones óptimas. Uno de los trabajos pioneros en este tipo de análisis es el modelo DICE (Nordhaus 1993), a partir del cual se han inspirado otros como el modelo MIT-IGSM (Prinn *et al.*1999). Su principal traba reside en la complejidad de los sistemas climáticos y en la dificultad para valorar monetariamente muchos de los daños ambientales.

2.5. Modelos de Comercio de Emisiones

Algunos de los modelos más recientes utilizan las curvas de coste marginal de reducción de emisiones, procedentes habitualmente de los modelos de equilibrio general, para investigar aspectos relacionados con el futuro mercado de permisos de emisión. Algunos de los trabajos más recientes en esta línea de investigación son Ellerman y Deceaux (1998), Holtmark y Maestad (2002), Michaelowa y Jotzo (2005).

Una de las principales ventajas de este tipo de modelos es que permiten analizar aspectos estratégicos del nuevo mercado del CO₂ en combinación con información precisa de los costes de reducción directos e indirectos.

3. MODELOS DE EQUILIBRIO GENERAL APLICADOS

Los *MEGAs* se basan en la teoría neoclásica sobre el comportamiento de los agentes y el funcionamiento de los mercados, siendo su principal característica el que describen toda la economía en conjunto. Se definen por unos agentes económicos racionales que demandan y ofrecen ciertos bienes y que resuelven individualmente su propio problema de maximización. Los mercados son competitivos y se vacían mediante la determinación endógena de las cantidades a producir y los precios; en esta situación de equilibrio ningún agente puede mejorar su situación alterando su comportamiento. Estos modelos permiten investigar los mecanismos que determinan los precios relativos y las asignaciones óptimas de recursos en economías competitivas y descentralizadas.

La *teoría del equilibrio general* tiene su origen en el marco de análisis walrasiano formalizado a partir de trabajos pioneros como Arrow y Debreu (1959) y Arrow y Hahn (1971). Estas primeras investigaciones son teóricas y centran su análisis en las

propiedades matemáticas sobre la existencia, la convergencia y la unicidad de los equilibrios económicos. A partir aquí, comienzan a desarrollarse los primeros modelos de equilibrio general aplicados; estos modelos analizaban políticas a partir del signo de sus derivadas limitándose a un número reducido de bienes y servicios. Un ejemplo puede encontrarse en Shoven y Whalley (1984) donde se hace un análisis para dos productores, dos factores productivos y dos consumidores. Estos modelos estaban muy limitados por la dificultad que suponía encontrar las soluciones de sistemas con muchas variables. Sin embargo, con el desarrollo de las técnicas de punto fijo, como el algoritmo de Scarf (1973), y con las nuevas técnicas de computación, estas restricciones dejaron de ser un problema. Actualmente el uso de *modelos de equilibrio general aplicados* comienza a ser una práctica habitual en la investigación económica de políticas reales.

Simplificando, un MEGA no es más que la estructura teórica de un modelo Arrow-Debreu aplicado a un número extenso de agentes y resuelto mediante algoritmos matemáticos. Una buena introducción a estos modelos puede encontrarse en Ginsburgh y Keyzer (1997), Shoven y Whalley (1992) y de manera más sencilla en Gómez (2002).

3.1. Las tres condiciones básicas

Un MEGA se formula como un problema matemático que cumple ciertas condiciones teóricas y que tiene una solución bien definida. Una manera de presentar el problema es introducir el comportamiento optimizador de los agentes en las ecuaciones mediante las funciones de oferta y demanda. El problema se reduce entonces a buscar la solución de un sistema de n ecuaciones no lineales con n variables, en donde las variables endógenas son los precios, la producción, los factores productivos, etc., y los parámetros exógenos son las preferencias, la tecnología, las dotaciones iniciales, etc. Mathiensen (1985) mostró como un modelo Arrow-Debreu puede simplificarse en tres tipos únicos de condiciones básicas:

Condición 1: Condición de beneficio cero

Esta condición supone que el valor de todos los inputs debe ser igual al valor del output. Una economía con rendimientos constantes de escala y competencia perfecta no tendrá beneficios extras al margen de los retornos del capital; si existieran beneficios extras otras empresas entrarían en el mercado, reduciendo los precios y aumentando la

producción, hasta conseguir que el beneficio fuese cero. Además, el beneficio no puede ser negativo ya que esto supondría para la empresa el cese de su actividad.

Condición 2: Condición de vaciado de mercado

Esta condición supone que la demanda para cada bien o factor productivo debe ser igual a su oferta. En una economía perfecta los mercados se vacían, si existiera una mayor cantidad de demanda el precio de dicho bien aumentaría y la producción disminuiría hasta hacer que el exceso de demanda fuese cero y al revés.

Condición 3: Condición de equilibrio presupuestario

Esta condición supone que los agentes no pueden gastar por encima de su presupuesto. Suponiendo que los agentes prefieren siempre más a menos, toda la renta es gastada en consumo o ahorro.

En definitiva, en un MEGA es necesario añadir a las condiciones usuales de los modelos económicos (condición 1 y 2) la condición de restricción presupuestaria para todos los agentes (condición 3) cerrando así el flujo circular de la renta.

3.2. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas más relevantes de los MEGA se puede citar las siguientes:

- Consideran toda la economía al completo
- Los impactos directos y los indirectos de la política son tenidos en cuenta
- Tienen una sólida base microeconómica y teórica
- Permite representar problemas no lineales
- Los precios de la economía se obtienen de manera endógena
- Permiten incorporar múltiples sectores, factores y agentes económicos
- Permiten incluir imperfecciones y restricciones en los mercados

Sin embargo estos modelos tienen varias limitaciones:

- Necesitan de una gran cantidad de datos
- La falta de series estadísticas hace necesaria su calibración
- La incorporación de imperfecciones en los mercados es compleja
- Es difícil incorporar aspectos monetarios ni sectores financieros

- Es difícil considerar los costes de ajuste y transacción

3.3. MEGAS y crecimiento económico

Un MEGA dinámico no es más que un modelo de crecimiento neoclásico desagregado en sectores y agentes económicos (Barro y Sala-i-Martin 1995). Los MEGAs dinámicos suelen ser divididos entre modelos tipo Solow-Swan o modelos tipo Ramsey. En los modelos Solow-Swan los consumidores ahorran una parte fija de su renta consumiendo lo demás. Los agentes tienen un comportamiento miope, no consideran el futuro, y el modelo suele ser resuelto iterativamente para cada periodo mediante una *dinámica recursiva*. En los modelos tipo Ramsey, en cambio, los consumidores ajustan de manera flexible la mejor proporción de ahorro y consumo que maximiza la utilidad en todo el horizonte temporal. Es habitual considerar que los agentes tienen expectativas perfectas, esto es, que conocen el estado futuro de todas las variables.

Ambos tipos de comportamiento dinámico son casos extremos entre los que se sitúa el comportamiento real. Lo más posible es que los consumidores consideren el futuro, y que tengan algún conocimiento al respecto, pero que esto tenga un límite. En cualquier caso, la dinámica con expectativas tiene la ventaja de poder ofrecernos una mayor riqueza de análisis sobre los mecanismos que influyen en las decisiones intertemporales.

3.4. MEGAS y medio ambiente

La actividad económica influye en el medio ambiente mediante el consumo de recursos naturales y la generación de contaminación. La economía de los recursos naturales estudia el primer tipo de problemas mientras que la economía ambiental se ocupa del segundo tipo. Una manera habitual de proceder en los MEGAs, y también en otros modelos económico-ambientales, es relacionar la contaminación con la producción (outputs) o con el uso de ciertos bienes intermedios (inputs). Si bien es mejor asociar cada tipo de contaminación con un input concreto, el nivel de desagregación económica o las necesidades de simplificación del modelo pueden hacer que esto no sea siempre posible. Una buena introducción a las relaciones entre medio ambiente, economía y MEGAs puede encontrarse en Bergman (1988; 1991).

3.5. MEGAS y tecnología

El cambio climático es un problema extensamente estudiado por la economía ambiental siendo los MEGAs los modelos más adecuados para medir los impactos económicos en sus políticas. Este tipo de modelos comparten en general la siguiente hipótesis; en el periodo de análisis no se esperan cambios tecnológicos trascendentales en cuanto a las emisiones de GEIs. La mayoría de los MEGAs de cambio climático (c.f Bohringer y Rutherford 2002; Manne *et al.*1995; Nordhaus 1993;Whalley y Wigle 1991) comparten este supuesto básico. Esto no quiere decir que no consideren el cambio tecnológico sino que lo basan mejoras paulatinas según la evolución mostrada en el pasado.

En un MEGA el *estado actual de la tecnología* queda caracterizado por la estructura de las funciones de producción y el valor de las elasticidades de sustitución. La mayoría de los MEGA climáticos distinguen en sus funciones factores como el capital (K), el trabajo (L), los materiales y servicios (M) y la energía (E); que a su vez se suele descomponer entre combustibles fósiles (F) y electricidad (T). Las formas funcional $f_i(\cdot)$ de estas funciones de producción suelen definirse mediante una sucesión o anidamientos de funciones tipo CES, Cobb-Douglas o Leontief. La anidación permite dar mayor flexibilidad a la estructura y así adaptarse a la realidad de los análisis econométricos.

$$Y = f(K, L, M, E(F, T))$$

El *cambio tecnológico* en un MEGA ambiental suele ser considerado exógeno mediante un parámetro que engloba todas las mejoras en la eficiencia contaminadora. Este parámetro, que se sitúa generalmente entorno al 1% anual, refleja todos los factores que hacen que la intensidad de emisiones contaminantes cambien con los años. Algunos modelos incluyen tecnologías “*back-stop*”; tecnologías actualmente disponible y que podrían ser utilizadas si se dieran ciertos cambios en el mercado. También existen modelos que consideran el cambio tecnológico de manera *endógena*; dependiente de ciertas variables como la inversión en I+D, la transferencia tecnológica o el aprendizaje. En Loschel (2002) podemos encontrar un buen resumen de esta literatura de cambio tecnológico enfocado a los MEGAs ambientales.

4. DANTE: UN MODELO DINÁMICO DE EQUILIBRIO GENERAL APLICADO

4.1.Introducción

DANTE es un acrónimo que reconoce las aportaciones para su elaboración del modelo *DEAN*, y del modelo *MIT-EPPA* para su aplicación en *E*spaña. El modelo *DEAN* (Dellink 2005) es un MEGA “pequeño” construido por Rob Dellink en la Universidad de Wageningen. Se trata de un modelo aplicado a la política ambiental en Holanda, que incluye un sector de abatimiento de la contaminación y que recoge simultáneamente la mayoría de los problemas relacionados con la polución (cambio climático, acidificación, dispersión de partículas finas, contaminación de suelos, etc.). Una de sus características más notables es la integración del análisis top-down y bottom-up en un modelo de crecimiento tipo Ramsey. El modelo *MIT-EPPA* (Babiker et al. 2001), del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), es un modelo “grandes” puntero. Se trata de un MEGA multisectorial y multiregional. El modelo recoge distintas estructuras productivas para caracterizar la tecnología y es dinámico recursivo.

El modelo DANTE considera todo el sistema económico y esta desagregado en múltiples sectores económicos. La tecnología actual esta definida mediante funciones de producción específicas y el cambio tecnológico se caracteriza por un parámetro exógeno que mide las mejoras en la ecoeficiencia de manera conjunta.

DANTE es un modelo económico-ambiental porque relaciona convenientemente el sistema económico junto con los flujos energéticos y medioambientales. La política ambiental se implementa simulando un mercado de permisos perfecto que incluye todas las emisiones. En esta situación la reducción de las emisiones se realiza eficientemente; allí donde resulte más barato y, de manera efectiva, asegurando que los objetivos ambientales se alcanzan realmente. Esta perspectiva es novedosa ya que la mayoría de los estudios actúan vía precios introduciendo impuestos generalmente no óptimos.

La estructura general se resume en la figura 2.3¹. El flujo comienza a iniciativa de los consumidores, dueños de los factores productivos en una economía walrasiana. Los

¹ La figura 2.3 pretende únicamente ilustrar la estructura general del modelo; existen flujos no descritos para evitar su complejidad como los que tienen que ver con la inversión y la acumulación de capital.

productores alquilan los factores (inputs) para fabricar bienes y servicios (outputs) que son a su vez vendidos a los consumidores. La cantidad y el precio de los bienes y factores se determinan en el mercado mediante la interacción entre la oferta y la demanda. Cada transacción tiene una contraprestación en forma de renta o gasto, representada en líneas discontinuas, y que cierra el flujo circular de la renta. El gobierno actúa como intermediario de estas acciones cobrando impuestos, consumiendo bienes y servicios públicos y realizando/recibiendo transferencias de los consumidores. También se encarga de limitar los permisos de contaminación. Estos permisos son considerados como un input necesario en la producción y el consumo, que puede ser comprado/vendido en el mercado bajo los mismos mecanismos de oferta y demanda del resto de mercados. Por último, las relaciones con economías del entorno se establecen a través de los flujos de importaciones y exportaciones de bienes y servicios.

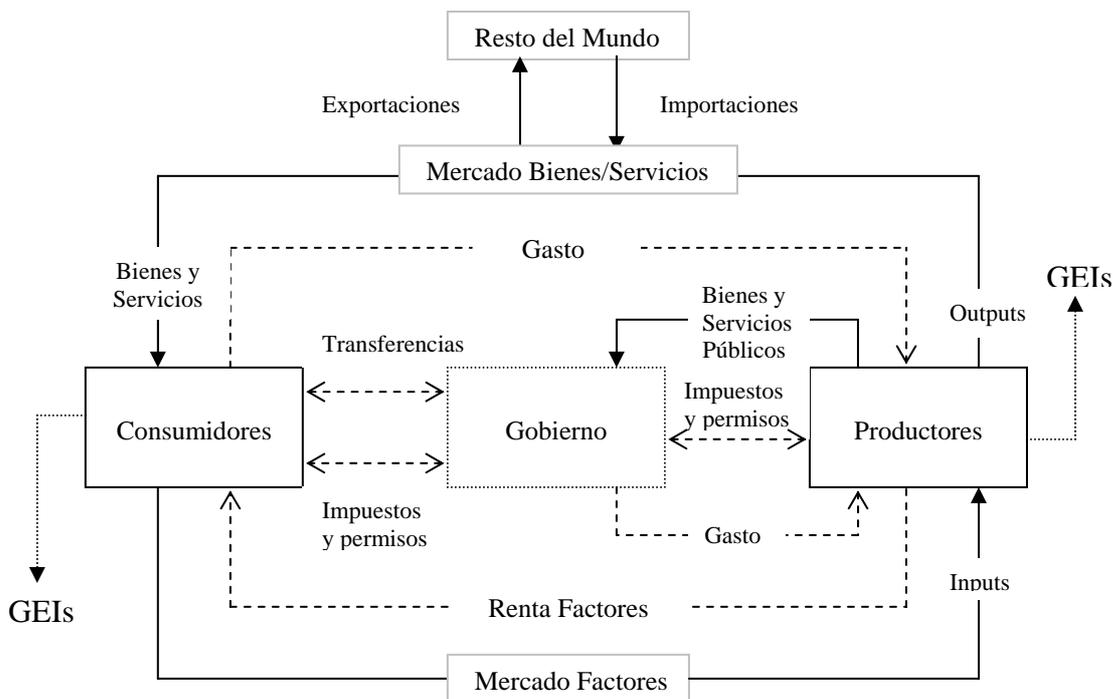


Figura 2: Estructura General modelo DANTE (Fuente: Elaboración Propia)

Todas la emisiones sujetas a control por el Protocolo de Kyoto están incluidas: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Monóxido de nitrógeno (N₂O), Hexafloruro de azufre (SF₆), Compuestos hidrogenofluorcarbonados (HFC) y Compuestos polifluorcarbonados(PFC). Para poder ser agregados se convierten a una unidad similar,

CO₂ equivalente, según su grado de contribución al cambio climático (GWP). Por razones de simplificación hemos agrupado las emisiones en dos bloques; emisiones de combustión y emisiones de proceso. Las emisiones de combustión son las emisiones originadas en el uso de combustibles fósiles y las de proceso concentran el resto de las emisiones.

El modelo considera un único consumidor representativo que posee los factores productivos (capital y trabajo) y un gobierno que recauda impuestos a la producción, al consumo y al trabajo, y que controla la política ambiental. El comercio internacional se realiza a través del agregado “Resto del Mundo” que engloba las economías del entorno.

Tabla .1. Desagregación del modelo DANTE

| 1. Sectores productivos | |
|---|-------------------------------|
| -Sectores No energéticos- | Transporte terrestre |
| Agricultura | Transporte marítimo |
| Extracción otros minerales | Transporte aéreo |
| Industria alimentos | Anexos del transporte |
| Industria textil y cuero | Servicios comerciales |
| Industria madera y papel | Servicios no comerciales |
| Industria química | -Sectores Energéticos- |
| Industria metálica | Extracción carbones |
| Industria maquinaria | Extracción crudo y gas |
| Otras industrias | Industria refino petróleo |
| Distribución agua | Gas Natural |
| Construcción | -Sector Electricidad- |
| 2. Inputs Productivos | 3. Agentes Económicos |
| Capital | Consumidor Representativo |
| Trabajo | Empresas |
| Permisos de emisión | Gobierno |
| 4. Emisiones | 5. Regiones |
| CO ₂ CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , HFC y PFC | Resto del Mundo |

A continuación explicaremos en detalle las partes que configuran el modelo DANTE y su notación matemática.

4.2. Productores

Los productores maximizan su beneficio sujetos a ciertas restricciones tecnológicas combinando de una manera óptima las necesidades de capital, trabajo, energía y otros inputs intermedios. Además pagan impuestos asociados a la producción y al trabajo. La producción tiene asociadas dos tipos de emisiones; 1) emisiones de combustión: asociadas mediante coeficientes a los usos de inputs de carbón, petróleo y gas natural, y las 2) emisiones de proceso: asociadas mediante coeficientes a los outputs. Puesto que los productores están obligados a tener permisos que respalden sus emisiones podemos considerar que los derechos de contaminación son para las empresas un factor productivo necesario más.

Las funciones de producción para cada sector están formadas por una anidamiento de funciones (CES, Cobb-Douglas y Leontief) que combinan los inputs de una manera más o menos flexible dependiendo de las elasticidades de sustitución. La estructura de estas funciones queda representada gráficamente en la figura 3, 4 y 5. La ecuación 1 recoge de una manera simplificada, sin desarrollar algebraicamente, los variables que interviene en estas funciones. La función producción del sector j en el momento t es una función dependiente de: los inputs intermedios i ($Y_{i,j,t}^{ID}$), el capital ($K_{j,t}$), el trabajo ($L_{j,t}$), los permisos de emisión ($E_{j,t}^P$) y también de las diferentes elasticidades de sustitución; como por ejemplo, la elasticidad entre Capital/Trabajo y Energía (σ^{KEL}).

$$Y_{j,t} = f\left(Y_{1,j,t}^{ID}, \dots, Y_{J,j,t}^{ID}; K_{j,t}; L_{j,t}; E_{j,t}^P; \sigma^Y, \sigma^{KEL}, \dots, \sigma^{E2}\right), \forall(j,t) \quad (\text{Ec.1})$$

La *condición de beneficio cero* establece que para cada productor el valor del output después de pagar impuestos debe ser igual al valor de todos sus inputs y queda recogido en la ecuación 2. El precio del output del sector j en el instante t viene representado por $P_{j,t}$, mientras que $P_{K,t}$ es el precio del capital, $P_{L,t}$ el precio de trabajo y $P_{E,t}$ el precio de los permisos de contaminación en el instante t. τ_j^P y τ_j^L son respectivamente las tasa impositivas a la producción y al trabajo para cada sector.

$$\left(P_{j,t} + \tau_j^P\right) \cdot Y_{j,t} - \left[P_{j,t} \cdot Y_{jj,j,t}^{ID} + P_{K,t} \cdot K_{j,t} + \left(P_{L,t} + \tau_j^L\right) \cdot L_{j,t} + P_{E,t} \cdot E_{j,t}^P \right] = 0, \forall(j,t) \quad (\text{Ec.2})$$

A partir de las ecuaciones 1 y 2 es posible derivar las funciones de producción o coste para cada uno de los sectores económicos. Las funciones que se utilizan en este tipo de modelos tienen una estructura compleja. Su desarrollo algebraico y su derivación es especialmente difícil y tedioso por lo que es necesaria la ayuda de un computador.

En este trabajo utilizamos las funciones de producción del modelo MIT-EPPA que considera convenientemente las alternativas de sustitución entre los inputs energéticos y las diferencias para cada tipo de sector. Las funciones de producción son tres; una para el sector eléctrico (figura 2), otra para los sectores energéticos; crudo, carbón, petróleo y gas (figura 3) y otra para el resto de los sectores (figura 4). Esta distinción nos permite capturar algunas diferencias importantes respecto a la tecnología y las posibilidades de sustitución entre estos tres tipos de sectores.

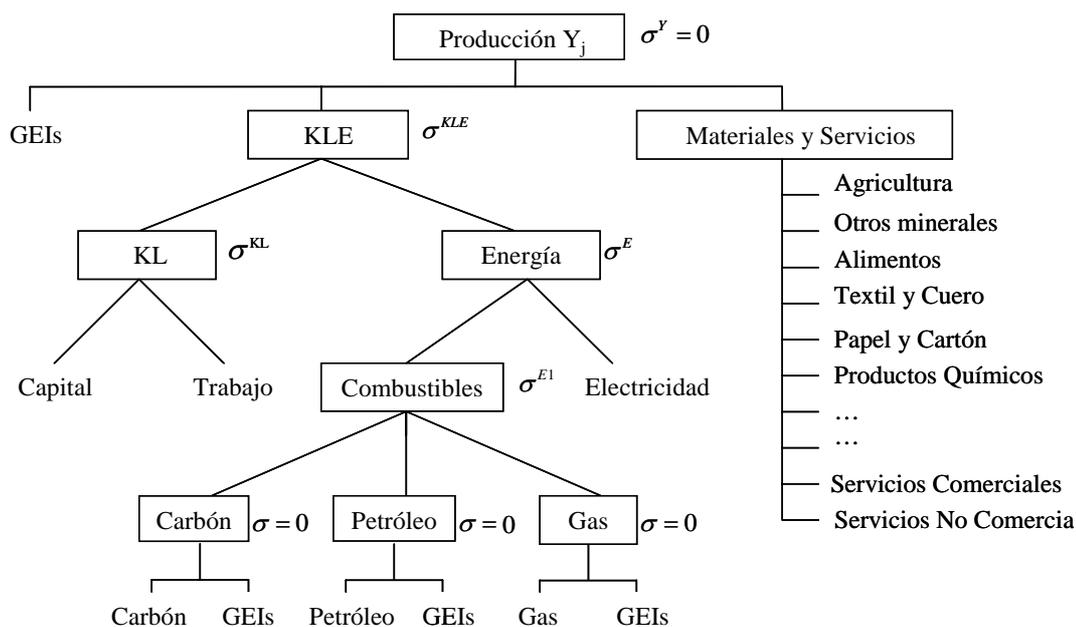


Figura 2: Estructura Producción Resto de Sectores

La figura 2 recoge la estructura de la producción de los *sectores no energéticos*. Para producir una unidad de output es necesario combinar Capital, Trabajo, Energía y Materiales y Servicios. La energía a su vez esta formada por la combinación de combustibles fósiles y electricidad, y los materiales y servicios agrupan al resto de bienes no energéticos. Para producir Energía existen diferentes combinaciones posibles

mediante la sustitución, primero, entre electricidad y combustibles fósiles, y segundo, entre el carbón, el petróleo y el gas natural. Los parámetros σ de la figura 2.4 representan las elasticidades de sustitución entre los inputs justo del nivel inferior. Por ejemplo, el grado de sustitución posible entre electricidad y combustibles fósiles para producir Energía es σ^E . Un valor de la elasticidad 0 representaría una función Leontief en el que los inputs se combinan de una manera proporcional y fija. Un valor de la elasticidad 1 representaría una función tipo Cobb-Douglas. En nuestra figura las estructuras Leontief aparecen representadas mediante líneas rectas o rígidas, que simbolizan la falta de flexibilidad de la función, mientras que el resto de estructuras se representan mediante líneas inclinadas o flexibles.

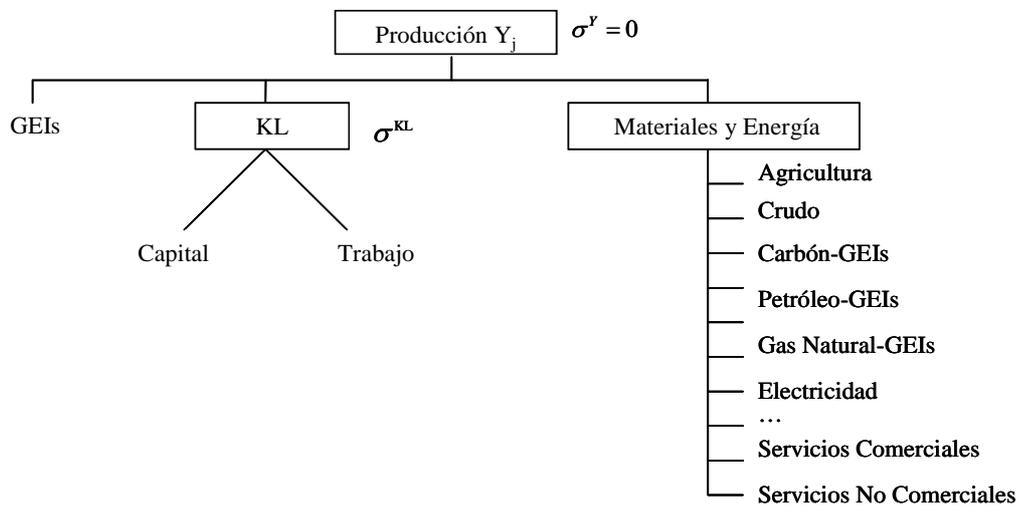


Figura 3: Estructura Producción Sectores Energía

La figura 3 recoge la estructura de producción de los sectores energéticos; crudo, carbón, petróleo y gas natural. En este caso las posibilidades de sustitución se dan únicamente en el intercambio entre trabajo y capital. Esta mayor rigidez en la producción nos permite representar las limitaciones de oferta habituales en el caso de las industrias extractivas y energética.

Por último, la figura 4 recoge la estructura de producción del sector eléctrico. Caracterizar correctamente este sector es importante ya que su consumo de combustibles fósiles es considerable. La estructura, que es muy parecida a la de la figura 2, cuenta en este caso con una mayor flexibilidad respecto a la sustitución entre los combustibles

fósiles. De esta forma se pretende capturar las oportunidades que ofrece en la actualidad la producción eléctrica de las tecnologías de ciclo combinado.

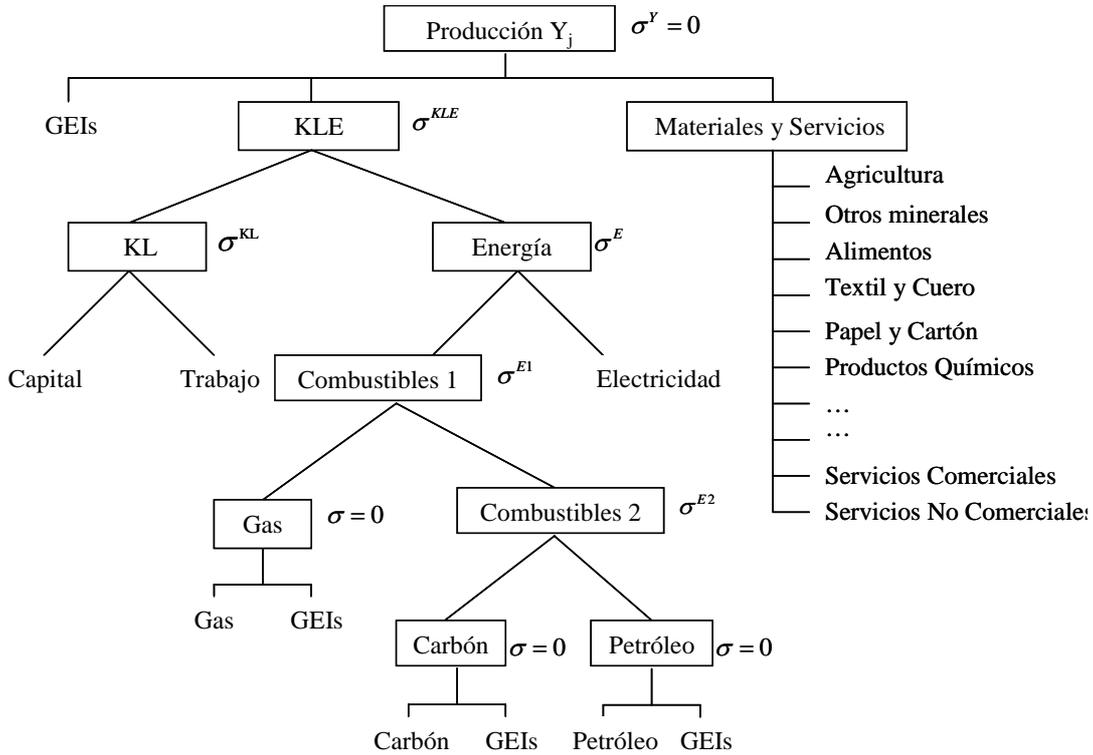


Figura 4: Estructura Producción Sector Eléctrico

4.3. Consumidores

El modelo considera un único consumidor que agrupa a todos los consumidores. Este consumidor representativo maximiza la utilidad total que obtiene del consumo sujeto a su limitación presupuestaria. La *utilidad total* es la agregación en el tiempo de la *utilidad* en cada uno de los periodos. La renta es obtenida a través del trabajo, el capital y las transferencias realizadas/recibidas por el gobierno. Los consumidores deciden cual es la tasa de ahorro óptima para cada periodo y son los encargados de financiar las inversiones.

La función de *utilidad total* U agrega mediante una función CES la utilidad en cada periodo U_t . Esta función y la elasticidad de sustitución intertemporal (σ^U) permiten modelizar las preferencias entre utilidad presentes y futura como recoge la ecuación 3.

$$U = CES(U_1, \dots, U_t : \sigma^U) \quad (\text{Ec.3})$$

La función de *utilidad de* cada periodo se construye también mediante una anidación de funciones que presentamos de forma genérica en la ecuación 4 y de forma gráfica en la figura 5. La función permite sustituir los diferentes bienes de consumo j en el instante t ($C_{j,t}$) según las posibilidades de su estructura y de sus elasticidades de sustitución.

$$U_t = f(C_{1,t}, \dots, C_{j,t} : \sigma^C, \sigma^F, \sigma^G) , \forall t \quad (\text{Ec. 4})$$

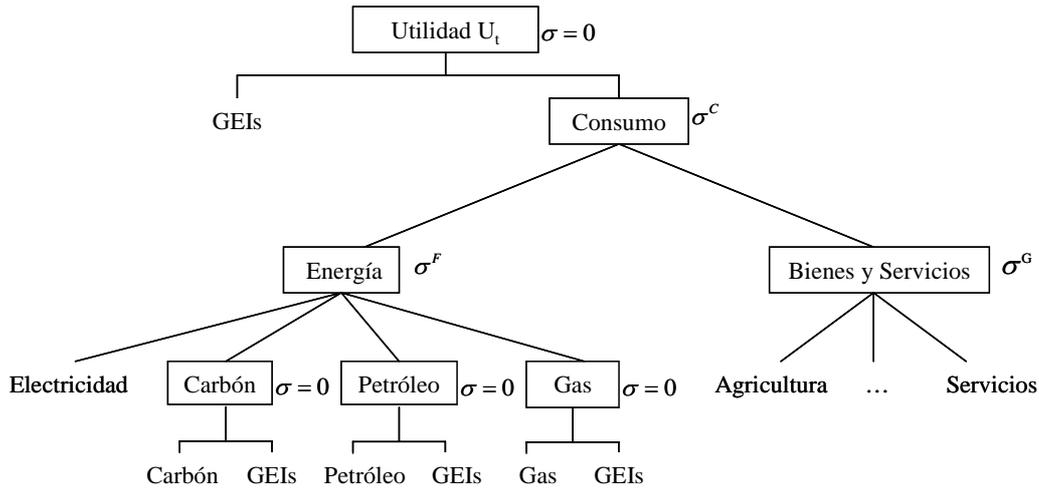


Figura 5: Estructura de la Función de Utilidad

La *condición de equilibrio presupuestario* establece que toda la renta es empleada tal y como recoge la ecuación 2.5. Esto es, los ingresos; trabajo, capital y transferencias del gobierno (T_t), y los gastos; consumo ($C_{j,t}$), impuestos (τ_j^C), compra de permisos de contaminación (E_t^C) y ahorro (S_t), son equivalentes en todos los instantes.

$$P_{K,t} \cdot K_t + P_{L,t} \cdot L_t + T_t = \sum_{j=1}^J (P_{j,t} + \tau_j^C) \cdot C_{j,t} + P_{E,t} \cdot E_t^C + S_t , \forall t \quad (\text{Ec.5})$$

4.4. Gobierno

El gobierno hace de intermediario en muchos flujos económicos mediante la recaudación de impuestos a la producción, al trabajo y al consumo. Estos recursos, *según la condición de balance presupuestario*, se emplean enteramente en proveer bienes públicos y en realizar transferencias a los consumidores (ec. 7). Suponemos (ad-hoc) que el déficit público es cero y que se mantiene constante a lo largo de todos los periodos. Además, las políticas ambientales simuladas son neutrales; es decir, los ingresos extras

recibidos por los permisos de contaminación se devuelven vía transferencias a los consumidores manteniendo siempre el nivel de gasto público constante \bar{G} (ec. 6).

$$\bar{G}_t = CES(G_{1,t}, \dots, G_{J,t}), \quad \forall t \quad (\text{Ec.6})$$

$$P_{E,t} \cdot \bar{E}_t + \sum_{j=1}^J (P_{L,t} \cdot \tau^L \cdot L_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^C \cdot C_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^P \cdot Y_{j,t}) = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot G_{j,t} + T, \quad \forall t \quad (\text{Ec.7})$$

4.5. Comercio internacional

Una economía actúa dentro de un entorno internacional más amplio. Para incluir estas relaciones hemos agrupado a las economías internacionales en un único agregado; el Resto del Mundo (RdM), y entre todos los posibles flujos posibles hemos considerado únicamente las importaciones y las exportaciones de bienes y servicios.

El comercio internacional se modela siguiendo dos supuestos habituales en los MEGA.

- *Supuesto de economía pequeña y abierta*; la economía doméstica es demasiado pequeña para influir en los precios mundiales y todas las necesidades de importación y exportación pueden ser satisfechas mediante el comercio con el Resto del Mundo.
- *Supuesto de Armington*; los bienes domésticos y los bienes extranjeros son considerados sustitutos imperfectos. Este enfoque (Armington 1969) permite admitir diferencias entre precios nacionales e internacionales limitando la especialización completa; lo que hace posible que existan bienes que son importados y exportados al mismo tiempo.

En la práctica, estos supuestos suponen modelar la oferta total como una función CES que agrega la producción doméstica y los bienes importados (ecuación 8). Posteriormente, este agregado se divide mediante una función CET entre demanda doméstica y exportaciones (ecuación 9). La figura 6 muestra la estructura de las funciones de comercio internacional gráficamente.

$$Y_{j,t}^{TS} = CES(Y_{j,t}, M_{j,t} : \sigma^A) \quad (\text{Ec.8})$$

$$Y_{j,t}^{TD} = CES(Y_{j,t}^D, X_{j,t} : \sigma^T) \quad (\text{Ec.9})$$

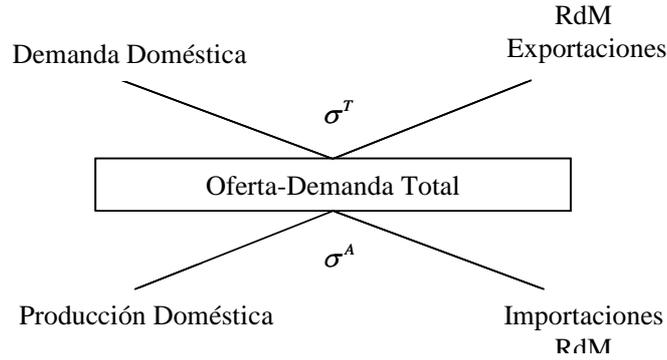


Figura 6: Estructura Comercio Internacional

Finalmente, para cerrar los flujos del modelo es necesario algún supuesto o *regla de cierre*. En nuestro caso suponemos que el déficit comercial; las importaciones menos las exportaciones, se financia con el presupuesto de los consumidores. Consideramos que el déficit comercial se ajusta flexiblemente para vaciar el mercado internacional mientras se mantiene una tasa de intercambio constante (ec.10). La tasa de intercambio debe ser vista como una variable que raciona el déficit en el mercado internacional del modelo y no como una variable monetaria.

$$\sum_{j=1}^J P_{X,t} (M_{j,t} - X_{j,t}) = \overline{XD}_t \quad (\text{Ec. 10})$$

4.6. Crecimiento y progreso tecnológico

La oferta de trabajo esta dada en el año de referencia inicial y crece a una tasa constante g (ec.11). Esta tasa de crecimiento recoge una combinación del crecimiento demográfico y de las mejoras en la productividad mostradas en el pasado.

$$\bar{L}_{t+1} = \bar{L}_t \cdot (1 + g) \quad (\text{Ec. 11})$$

El stock de capital también está dado en el año de referencia inicial pero su crecimiento depende de las decisiones de inversión I_t y de la tasa de depreciación del capital δ (ec.12). Para poder aproximar una modelo de horizonte infinito a uno de horizonte finito es necesario adoptar una condición de transversalidad en el capital. La literatura propone diversas condiciones siendo cada vez más utilizada la propuesta en Lau *et al* (2002).

Esta condición (ec.13) establece que en el último periodo el crecimiento de la inversión será idéntico a la tasa final de crecimiento del consumo (utilidad) total privado, esto nos asegura que la economía se mantiene en el estado estacionario también cerca del final del periodo del análisis.

$$K_{t+1} = K_t \cdot (1 - \delta) + I_t \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{U_{T, 'priv'}}{U_{T-1, 'priv'}} \quad (\text{Ec. 13})$$

El progreso de la ecoeficiencia φ , es decir, de las emisiones por unidad de input o output, aumentan gradualmente siguiendo una función logística (ec.14). Esta función permite representar fenómenos que parten de un valor inicial (1995), aumentan gradualmente y finalmente se estabilizan con el tiempo (2030). Los valores de este parámetro en el modelo distinguen entre ecoeficiencia de combustión (φ_t^C) y de proceso (φ_t^P) puesto que las perspectivas de futuro de estas tecnologías son bien distintas.

$$\varphi_t = \varphi_{2030} \cdot \frac{1}{1 + (\varphi_{2030} / \varphi_{1995} - 1) \cdot e^{-t}} \quad (\text{Ec. 14})$$

4.7. Emisiones y política ambiental

Las emisiones totales de GEIs se calculan como la suma de las emisiones de los productores (E_t^P) y de los consumidores (E_t^C) en cada periodo. Estas se obtienen a su vez, como agregación de las emisiones de combustión y de proceso. Las emisiones de combustión están asociadas mediante coeficientes (α_e, y_e) al uso de inputs de carbón, petróleo y gas y; las de proceso también están asociadas mediante coeficientes (x_j, z) pero a los outputs. Las emisiones esta corregidas en cada periodo por las mejoras producidas en los parámetros de ecoeficiencia (φ_t^C, φ_t^P).

$$E_t^P = \varphi_t^C \cdot \left(\sum_{e=1}^3 \alpha_e \cdot \sum_{j=1}^J Y_{e,j,t}^{ID} \right) + \varphi_t^P \cdot \left(\sum_{j=1}^J x_j \cdot Y_{j,t} \right), \forall t \quad (\text{Ec.15})$$

$$E_t^C = \varphi_t^C \cdot (y_e \cdot C_{e,t}) + \varphi_t^P \cdot (z \cdot \sum_{j=1}^J C_{j,t}) \quad \forall t \quad (\text{Ec.16})$$

La implementación de la política ambiental simula los resultados que se obtendrían en un sistema de permisos transferibles perfecto. En este sistema el gobierno fija las emisiones objetivo, subasta los permisos correspondientes en el mercado de forma que las emisiones totales sean iguales a las emisiones objetivo y permite posteriormente su intercambio. Teóricamente este instrumento económico tiene la ventaja de ser coste-eficiente y efectivo. Además se trata de una forma natural de introducir la política ambiental en un MEGA; ya que los permisos pueden ser tratados como otro factor más que se intercambia en el mercado a un precio de equilibrio concreto.

4.8. Equilibrio

La última condición para el equilibrio general es la *condición de vaciado de mercado*. Esta condición establece que la demanda para todos los bienes o factores productivos debe ser igual a su oferta. En nuestro caso, esto supone el equilibrio en el mercado de bienes y servicios (Ec. 17), capitales (Ec. 18), trabajo (Ec. 19), inversiones (Ec. 20) y también en el de permisos de contaminación (Ec. 21). El equilibrio se obtiene a través del ajuste iterativo de los precios relativos.

$$Y_{j,t}^{DD} = \sum_{jj=1}^J Y_{j,j,t}^{ID} + C_{j,t} + G_{j,t} + I_{j,t} \quad (\text{Ec.17})$$

$$\sum_{j=1}^J K_{j,t} = K_t \quad (\text{Ec.18})$$

$$\sum_{j=1}^J L_{j,t} = \bar{L}_t \quad (\text{Ec.19})$$

$$S_t = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot I_{j,t} + \overline{XD}_t \quad (\text{Ec.20})$$

$$\bar{E}_t = E_t^P + E_t^C \quad (\text{Ec.21})$$

4.9. Solución

Resolver el modelo DANTE supone buscar la solución a un sistema finito de ecuaciones no lineales. Las propiedades matemáticas del modelo garantizan la convergencia hacia una solución de equilibrio estable y única. Para la programación hemos utilizado el lenguaje GAMS, un paquete informático diseñado en el Banco Mundial y comercializado por GAMS Development Corporation (Brooke et al. 1998), que integra diferentes algoritmos para la resolución de variados problemas matemáticos y el metalenguaje MPSGE, un lenguaje de alto nivel que funciona sobre GAMS y que simplifica notablemente la programación de modelos de equilibrio general (Rutherford 1999). El uso de GAMS/MPSGE permite centrarnos menos en la programación y más en la economía detrás de cada modelo. Para encontrar las soluciones de equilibrio utilizamos el algoritmo PATH (Dirkse y Ferris 1995).

El modelo está resuelto en periodos de cinco años para simplificar el tiempo de cálculo de cada simulación. Esta especificación no tiene repercusiones en términos económicos, pero es necesario calibrar correctamente los flujos que se transfieren de un periodo a otro para que reflejen exactamente los crecimientos anuales. Como los periodos se componen de varios años lo único que hay que hacer es recalcular qué parte de la inversión por periodo es productivo en ese periodo y qué parte lo es en el periodo siguiente (ver Rutherford 2001)

5. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración consiste en ajustar el modelo a los datos reales iniciales. De manera más técnica, la calibración es el proceso mediante el cual asignamos valores a los parámetros del modelo de forma que, al ser éste resuelto, las variables que obtengamos inicialmente coincidan con los datos del equilibrio inicial. La información necesaria para caracterizar el equilibrio inicial y calibrar el modelo se dividen datos económicos y medioambientales.

El bloque económico comprende la descripción del equilibrio económico inicial en el año de referencia. Para ello utilizamos una matriz de datos que tiene una ordenación característica conocida como Matriz de Contabilidad Social o SAM. El modelo es dinámico por lo que también necesitamos datos sobre las variables que guían el crecimiento económico. Por último, es fundamental conocer la reacción de los agentes ante los posibles cambios, es decir, las elasticidades de sustitución.

El bloque del medio ambiente comprende los datos o coeficientes que nos permiten calcular las emisiones actuales y también estimar las futuras. Para estimar las futuras es necesario estimar el valor de parámetro exógeno llamado ecoeficiencia, y que mide el grado de desacople futuro entre las emisiones de GEIs y la producción o el consumo energético.

La SAM construida en esta tesis (ver apéndices) se ajusta a las necesidades de calibración del modelo y presenta las siguientes características específicas:

a) Integrar datos energéticos: Los sectores energéticos son esenciales en el modelo pero en la Tabla Input-Output aparece en algunos casos mezclados junto con otras actividades: por ejemplo; el gas natural aparece mezclado con el agua caliente y el vapor de agua o los derivados del petróleo con los productos de la energía nuclear. Además la TIO no permite desagregar entre cantidades y precios; algo importante para calcular la emisiones de GEIs. Por ello hemos obtenido unas nuevas filas de demanda del crudo, carbón, petróleo, gas natural y electricidad, a partir de los balances energéticos y de los precios de la energía, que ha sido integrado en la SAM junto con el resto de datos. Esta nueva información desajusta el equilibrio inicial por lo que es necesario reequilibrarla de la mejor manera posible. Para ello se han utilizado un método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) entre los antiguos y los nuevos coeficientes técnicos de la TIO.

b) Cerrar el flujo circular de la renta: Para ello suponemos que el déficit del gobierno es cero; esto es, que realiza transferencias a los consumidores por la diferencia entre el ingreso de los impuestos y el gasto público. La inversión y el déficit/superávit en el comercio con el Resto del Mundo son financiadas mediante el ahorro de los consumidores.

c) Ajustar al estado estacionario: Un hipótesis habitual en la calibración de MEGAs dinámicos es suponer que la economía se encuentra inicialmente en un estado estacionario. Para ello es necesario (ver Dellink 2005) recalcular las inversiones totales de la SAM siguiendo la ecuación (Ec. 22). La columna de inversión de la SAM seguirá manteniendo las proporciones de la SAM original.

$$I = \left(\frac{g + \delta}{r + \delta} \right) \cdot K_{SAM} \quad (\text{Ec.22})$$

d) Adaptar los coeficientes de combustión: Los coeficientes de emisiones de combustión físicos (tabla A3) de la combustión necesitan ser adaptados para su uso en el modelo. Los MEGAs normalmente suponen que los precios iniciales son iguales a 1 (Convención Harberger) por lo que es necesario multiplicar estos valores físicos por los precios de la energía tanto de los productores como de los consumidores (tabla A4). Además existen usos en los combustibles que no son energéticos (sector químico o plástico), no producen emisiones y que por su relevancia es necesario considerar mediante la introducción de coeficientes correctores (tabla A3).

6. CONCLUSIONES

Las políticas de cambio climático necesitan de modelos que garanticen un correcto análisis científico. En este artículo hemos contextualizado la evolución de los modelos más utilizados para poder presentar un avance novedoso en la materia.

El modelo DANTE es un Modelo Dinámico de Equilibrio General Aplicado tipo Ramsey que implementa un mercado de permisos de emisión perfecto, en el que se garantiza una reducción de emisiones eficiente y efectiva. Además el modelo aprovecha al máximo la disponibilidad de datos existentes en España i) utilizando una matriz de contabilidad social (o SAM) energética mediante la integración de la información económica de las Tablas Input-Output y la información energética de los Balances Energéticos y ii) considerando todas las emisiones sujetas a control además del CO₂.

Esta aportación es interesante ya que por un lado 1) permitirá investigar aspectos básicos de la política contra el cambio climático en España y por otro 2) abrirá una línea de investigación aplicada nueva en España. La estructura básica del modelo DANTE podrá ser utilizada por otros investigadores y para otras aplicaciones a la hora de a) evaluar los impactos económicos *ex-ante* de políticas que afecten de una manera global en la economía; como las políticas fiscales, energéticas, comerciales o las medioambientales y para b) evaluar políticas que, como la climática, se extienden durante largos años en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Armington, P., 1969, *A theory of demand for products distinguished by place of production*, IMF Staff papers, 16, 158-178.
- Arrow, K.J. y Debreu, G., 1954, "Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy", *Econometrica*, 22, 265-90.
- Arrow, K.J. y Hahn, F., 1971, *General Competitive Analysis*, Holden-Day, San Francisco.
- Babiker, M.H., Mayer M., Wieng I.S., Hyman, R. C. 2001, *The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results*, 71, MIT Global Change Joint Program, MIT, Cambridge.
- Barro, R.J, Sala-i-Martin, X., 1995, *Economic growth*, New York.
- Bergman, L., 1988, "Energy policy modelling: a survey of general equilibrium approaches", *Journal of Policy Modeling*, 12, 671-691.
- Bergman, L., 1991, "General equilibrium effects of environmental policy: a CGE-modelling approach", *Environmental and Resource Economics*, 1, 43-61.
- Blanchard, O.J, Fischer, s., 1989, *Lectures on macroeconomics*, MIT press, Cambridge.
- Bohringer, C., Rutherford, T., 2002, "Carbon abatement and international spillovers: a decomposition of general equilibrium effects", *Environmental and Resource Economics*, 22, nº 3, 391-417.
- Bohringer, C., 1998, "The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modelling", *Energy Economics*, 20, nº 3, 233-248.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., 1998, *GAMS: A user's guide*, GAMS Development Corporation.
- Capros P., Proost S., Conrad, K., Kotsomiti S., Atsaves, G., 1998, *The GEM-E3 model: Reference manual*, Report to European Commission.
- Chiang, A.C., 1988, "*Métodos fundamentales de economía matemática*", Ed. McGraw-Hill.
- Cooper, A., Livermore, S., Rossi, V., Wilson, V., Walker, J., 2005, "The economic implications of reducing carbon gas emissions: a cross-country quantitative investigation using the Oxford global macroeconomic and energy model", *Energy Journal*, Especial Issue: The cost of Kyoto Protocol: A multi-model evaluation, 367-390.
- Criqui, P., 2001, *POLES: Prospective outlook on long-term energy systems*, Unité mixte de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique, UFR DGES, France.
- Dellink, R.B, 2005, *Modelling the costs of environmental policy: a dynamic applied general equilibrium assessment* Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Dellink, R., Hofkes, M., van Ierland, E., Verbruggen, H., 2004, "Dynamic modelling of pollution abatement in a CGE framework", *Economic Modelling*, 21, nº 6, 965-989.
- Dirkse, S.P., Ferris, M.C., 1995, "The PATH solver: A non-monotone stabilization scheme for mixed complementarity problems", *Optimization Methods and Software*, 5, 123-156.
- Ellerman, A., Deceaux, A., 1998 *Analysis of Post-Kyoto CO2 emissions trading using marginal abatement curves*. Joint Program on the Science and Policy of Global Change. MIT, Cambridge.
- Eurostat 1991, *Environmental statistics*, European Statistic Office, Luxemburg.
- Eurostat 2005, *Energy and environment statistics*, European Statistic Office, Luxemburg.
- Ginsburgh, V., Keyzer, M.A., 1997, *The structure of applied general equilibrium models* MIT Press, Cambridge.
- Gómez, A, 2002 "Simulación de políticas económicas: los modelos de equilibrio general aplicado", Papeles de Trabajo, *Instituto de Estudios Fiscales*, 35.
- Grubb, M., Edmonds, J., Brink, P., Morrison, M., 1993, "The cost of limiting fossil-fuel CO2 emissions: A survey and analysis", *Annual Reviews*, 18, 397-478.
- Holtmark, B., Maestad, O., 2002, "Emission trading under the Kyoto Protocol effects on fossil fuel markets under alternative regimes", *Energy Policy*, 30, nº 3, 207-218.
- IEA, 1998, *Energy Statistics of OECD Countries 1995-1996*, International Energy Agency, Paris.
- INE, 2002a, *Contabilidad Nacional de España. Base 1995. Serie Contable 1995-2000. Marco Input-Output 1995-1996-1997*, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.

- INE, 2002b, *Estadísticas de Medio Ambiente*, Cuentas Ambientales, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- Korosawa, A., Yaguita, H., Zhou, W., Tokimatsu, K., Yanagisawa, Y., 1999, "Analysis of carbon emission stabilization targets and adaptation by integrated assessment model", *Energy Journal*, Special Issue, The cost of the Kyoto Protocol : A multi model evaluation, 157-175.
- Lau, M. I., Pahlke, A., Rutherford, T. F. 2002, "Approximating infinite-horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis", *Journal of Economic Dynamics & Control*, vol. 26, no. 4, 577-609.
- Loschel, A., 2002, "Technological change in economic models of environmental policy: a survey", *Ecological Economics*, 43, n° 2-3, 105-126.
- Manne, A., Mendelsohn, R., Richels, R., 1995, "MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies", *Energy Policy*, 23, n° 1, 17-34.
- Mathiensen, L., 1995, "Computational of economic equilibrium by a sequence of linear complementary problems", *Operation Research*, 33, n° 6, 1225-1250.
- Michaelowa, A., Jotzo, F., 2005, "Transaction costs, institutional rigidities and the size of the clean development mechanism", *Energy Policy*, 33, n° 4, 511-523.
- MITYC, 2001, *Libro de la energía en España 2001*, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.
- Nordhaus, W. D., 1978, "Economic growth and climate: The carbon dioxide problem", *The American Economic Review*, 1, n° 67, 341-346.
- Nordhaus, W. D., 1993, "Rolling the "DICE": An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Resource and Energy Economics*, 15, n° 1, 27-50.
- Prinn, R., Jacoby, H., Sokolov, A., Wang, C., Xiao, X., Yang, Z., Eckhaus, R., Stone, P., Ellerman, D., Melillo, J., Fitzmaurice, J., Kicklighter, D., Holian, G., Liu, Y., 1999, "Integrated Global System Model for climate policy assessment: feedbacks and sensitivity studies", *Climatic Change*, 41, n° 3 - 4, 469-546.
- Reilly, J., Sarofim, M., Paltsev, S., Prinn R., 2004, *The Role of Non-CO2 Greenhouse Gases in Climate Policy: Analysis Using the MIT IGSMJ*, 114, MIT Global Change Joint Program, MIT, Cambridge.
- Rutherford, T., 1999, "Applied General Equilibrium Modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax ", *Computational Economics*, 14, 1-46.
- Rutherford, T., 2001, *Calibration of models with multy-year period*, mimeo, University of Colorado.
- Rutherford, T., 2004, *Dynamic General Equilibrium with GAMS/MPSGE*, mimeo, University of Colorado.
- Scarf H.E 1973, *Computation of equilibrium prices* New Haven: Yale University Press.
- Seebregts, A. J., Goldstein, G., Smekens, K., 2001, "Energy/Environmental modelling using the MARKAL family of models", *Operations Research Proceedings n° Selected Papers of the International Conference on Operations Research*, 75-83.
- Shoven, J., Whalley, J., 1992, *Applying General Equilibrium* Cambridge University Press, Cambridge.
- Shoven, J., Whalley, J., 1984, "Applied General-Equilibrium Models of taxation and international trade: an introduction and survey", *Journal of Economic Literature*, 22, n° 1007, p. 1051.
- Springer, U., 2003, "The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies", *Energy Economics*, 25, n° 5, 527-551.
- UN, 1997, *Protocolo de Kyoto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*, Naciones Unidas.
- Weyant, J.P, 1993, "Cost of reducing global carbon emissions", *The Journal of Economic Perspectives*, 7, n° 4, 27-46.
- Whalley, J., Wigle, R., 1991, "Cutting CO2 emissions: The effects of alternative policy approaches", *Energy Journal*, 12, n° 1, 109-124.

Apéndice 1 Ecuaciones del modelo DANTE y notación científica

1. Productores

*Funciones de Producción por sectores*² $\forall(j,t)$

$$Y_{j,t} = f\left(Y_{1,j,t}^{ID}, \dots, Y_{J,j,t}^{ID}; K_{j,t}; L_{j,t}; E_{j,t}^P; \sigma^Y, \sigma^{KEL}, \dots, \sigma^{E2}\right) \quad (\text{Ec.1})$$

Condición de Beneficio Cero por sectores $\forall(j,t)$

$$\left(P_{j,t} + \tau_j^P\right) \cdot Y_{j,t} = P_{j,t} \cdot Y_{j,j,t}^{ID} + P_{K,t} \cdot K_{j,t} + \left(P_{L,t} + \tau_j^L\right) \cdot L_{j,t} + P_{E,t} \cdot E_{j,t}^P \quad (\text{Ec.2})$$

2. Consumidores

*Función de Utilidad Total Intertemporal*³

$$U = CES(U_1, \dots, U_t; \sigma^U) \quad (\text{Ec.3})$$

Función de Utilidad Instantánea $\forall t$

$$U_t = f(C_{1,t}, \dots, C_{J,t}; \sigma^C, \sigma^F, \sigma^G) \quad (\text{Ec.4})$$

Condición de Balance de Presupuesto $\forall t$

$$\left[P_{K,t} \cdot K_t + P_{L,t} \cdot L_t + T_t \right] - \left[\sum_{j=1}^J \left(P_{j,t} + \tau_j^C \right) \cdot C_{j,t} + P_{E,t} \cdot E_t^C + S_t \right] = 0 \quad (\text{Ec.5})$$

3. Gobierno

Consumo Público del Gobierno

$$\bar{G}_t = CES(G_{1,t}, \dots, G_{J,t}) \quad (\text{Ec.6})$$

Condición de Balance de Presupuesto

² La estructura anidada de producción se representa gráficamente en las figuras 2.4, 2.5 y 2.6. La ecuación 1 es una forma reducida de presentar dichas funciones mediante los inputs y las elasticidades para evitar su gran extensión algebraica. A modo de ejemplo; una función CES para el caso de dos niveles de anidamiento y dos inputs tiene la siguiente forma:

El primer nivel: $Y = CES(X_1, X_2; \sigma) = (a_1 X_1^{\sigma-1/\sigma} + a_2 X_2^{\sigma-1/\sigma})^{\sigma/\sigma-1}$ y el segundo nivel:

$X_2 = CES(X_3, X_4; \psi) = (a_3 X_3^{\psi-1/\psi} + a_4 X_4^{\psi-1/\psi})^{\psi/\psi-1}$, donde a_1, a_2, a_3, a_4 son parámetros y σ, ψ representan las elasticidades de sustitución entre los inputs.

³ La estructura anidad de la utilidad se representa gráficamente en la figura 2.7.

$$P_{E,t} \cdot (E_t^P + E_t^C) + \sum_{j=1}^J (P_{L,t} \cdot \tau^L \cdot L_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^C \cdot C_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^P \cdot Y_{j,t}) = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot \bar{G}_{j,t} + T \quad (\text{Ec.7})$$

4. Comercio Internacional

*Función Armington entre bienes importados y domésticos*⁴ $\forall(j,t)$

$$Y_{j,t}^{TS} = CES(Y_{j,t}, M_{j,t} : \sigma^A) \quad (\text{Ec.8})$$

Función Transformación entre bienes exportados y domésticos $\forall(j,t)$

$$Y_{j,t}^{TD} = CET(Y_{j,t}^D, X_{j,t} : \sigma^T) \quad (\text{Ec.9})$$

Cierre del modelo con el Resto del Mundo $\forall t$

$$\sum_{j=1}^J P_{X,t} (M_{j,t} - X_{j,t}) = \overline{XD}_t \quad (\text{Ec.10})$$

5. Crecimiento y Progreso tecnológico

Crecimiento oferta efectiva de trabajo $\forall t$

$$\bar{L}_{t+1} = \bar{L}_t \cdot (1 + g) \quad (\text{Ec.11})$$

Crecimiento stock de capital $\forall t$

$$K_{t+1} = K_t \cdot (1 - \delta) + I_t \quad (\text{Ec.12})$$

Condición de transversalidad para el stock final de capital $\forall t$

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{W_{T,'priv'}}{W_{T-1,'priv'}} \quad (\text{Ec.13})$$

Progreso ecoeficiencia de combustión y proceso

$$\varphi_t = \varphi_{2030} \cdot \frac{1}{1 + (\varphi_{2030} / \varphi_{1995} - 1) \cdot e^{-t}} \quad (\text{Ec.14})$$

6. Emisiones

Emisiones Productores

$$E^P = \varphi_t^C \cdot \left(\sum_{e=1}^3 \alpha_e \cdot \sum_{j=1}^J Y_{e,j,t}^{ID} \right) + \varphi_t^P \cdot \left(\sum_{j=1}^J x_j \cdot Y_{j,t} \right), \forall t \quad (\text{Ec.15})$$

⁴ La estructura anidada del comercio se representa gráficamente en la figura 2.8.

Emisiones Consumidores

$$E_t^C = \varphi_t^C \cdot (y_e \cdot C_{e,t}) + \varphi_t^C \cdot (z \cdot \sum_{j=1}^J C_{j,t}) \quad \forall t \quad (\text{Ec.16})$$

7. Condiciones de Vaciado de Mercado

Balance mercado bienes y servicios $\forall(j,t)$

$$Y_{j,t}^{DD} = \sum_{jj=1}^J Y_{j,j,t}^{ID} + C_{j,t} + G_{j,t} + I_{j,t} \quad (\text{Ec. 17})$$

Balance mercado de capital $\forall t$

$$\sum_{j=1}^J K_{j,t} = K_t \quad (\text{Ec.18})$$

Balance mercado de trabajo $\forall t$

$$\sum_{j=1}^J L_{j,t} = \bar{L}_t \quad (\text{Ec.19})$$

Balance mercado de Ahorro/Inversión $\forall t$

$$S_t = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot I_{j,t} + \overline{XD}_t \quad (\text{Ec.20})$$

Balance mercado de permisos de emisión $\forall t$

$$\bar{E}_t = E_t^P + E_t^C \quad (\text{Ec.21})$$

Símbolos

Índices

| <i>Nombre</i> | <i>Entradas</i> | <i>Descripción</i> |
|---------------|-----------------------|-------------------------------|
| j, jj | 1,...,J | Sectores / Bienes y servicios |
| t | 1,...,T | Periodos de tiempo |
| e | Carbón, Petróleo, Gas | Combustibles Fósiles |

Parámetros

| Nombre | Descripción |
|----------------|--|
| g | Tasa de crecimiento de la oferta efectiva de trabajo |
| δ | Tasa de depreciación del capital |
| r | Tasa de interés |
| σ^Y | Elasticidad de sustitución entre Energía-Capital-Trabajo y Materiales |
| σ^{KLE} | Elasticidad de sustitución entre Energía y Capital-Trabajo |
| σ^{KL} | Elasticidad de sustitución entre Capital y Trabajo |
| σ^E | Elasticidad de sustitución entre Electricidad y Combustibles Fósiles |
| σ^{E1} | Elasticidad de sustitución entre Carbón, Petróleo y Gas Natural |
| σ^{E2} | Elasticidad de sustitución entre Gas Natural y Carbón-Petróleo (sector eléctrico) |
| σ^U | Elasticidad de sustitución intertemporal de utilidad instantánea |
| σ^C | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos y no energéticos |
| σ^F | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos |
| σ^G | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos |
| σ^A | Elasticidad Armington de sustitución entre bienes importados y domésticos |
| σ^T | Elasticidad de Transformación entre bienes exportados y domésticos |
| τ_j^L | Tasa impositiva en el trabajo para el sector j |
| τ_j^P | Tasas impositiva neta en la producción para el sector j |
| τ_j^C | Tasa impositiva en el consumo del bien j |
| T_t | Transferencias entre consumidores y gobierno en el periodo t |
| α_e | Coefficientes de emisión de combustión para los productores del combustible e |
| γ_e | Coefficientes de emisión de combustión para los consumidores del combustible e |
| x_j | Coefficientes de emisión de proceso sector j |
| z | Coefficientes de emisión de proceso consumidor representativo |
| φ_t^C | Ecoeficiencia de combustión en el periodo t |
| φ_t^P | Ecoeficiencia de proceso en el periodo t |

Variables endógenas

| Nombre | Descripción |
|-----------|---|
| $Y_{j,t}$ | Producción del sector j en el periodo t |

| | |
|------------------|--|
| $Y_{j,j,t}^{ID}$ | Demanda Intermedia del input jj en el sector j y en el periodo t |
| $Y_{j,t}^D$ | Demanda Domestica del bien j en el periodo t |
| $Y_{j,t}^{TS}$ | Oferta Total del bien j en el periodo t |
| $Y_{j,t}^{TD}$ | Demanda Total del bien j en el periodo t |
| $M_{j,t}$ | Importaciones del bien j en el periodo t |
| $X_{j,t}$ | Exportaciones del bien j en el periodo t |
| $K_{j,t}$ | Demanda de capital del sector j en el periodo t |
| $L_{j,t}$ | Demanda de trabajo del sector j en el periodo t |
| U | Utilidad total consumidores |
| U_t | Utilidad consumidores en el periodo t |
| $C_{j,t}$ | Consumo privado del bien j en el periodo t |
| $G_{j,t}$ | Consumo público del bien j en el periodo t |
| S_t | Ahorro en el periodo t |
| $I_{j,t}$ | Inversión en el sector j en el periodo t |
| K_t | Demanda de capital en el periodo t |
| $P_{j,t}$ | Precio de equilibrio de bien j en el periodo t |
| $P_{k,t}$ | Precio de equilibrio del capital en el periodo t |
| $P_{L,t}$ | Precio de equilibrio del salario en el periodo t |
| $P_{E,t}$ | Precio de equilibrio de los permisos de emisión en el periodo t |
| $P_{X,t}$ | Tasa de intercambio o precio de equilibrio de bienes extranjeros en el periodo t |
| $P_{I,t}$ | Precio de equilibrio de la inversión en el periodo t |
| $E_{j,t}^P$ | Emisiones productores en el periodo t |
| E_t^C | Emisiones consumidores en el periodo t |

Variables exógenas

| Nombre | Descripción |
|-------------------|---|
| \overline{XD}_t | Déficit comercial en el periodo t |
| \overline{G}_t | Consumo público total en el periodo t |
| \overline{K}_o | Oferta de capital en el periodo inicial |
| \overline{L}_t | Oferta de trabajo en el periodo t |
| \overline{E}_t | Emisiones Totales ó Permisos de Emisión totales |

Apéndice 2 Datos para la calibración del modelo DANTE

Table A1: SAM 1995 España (mln. Euros)

| | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | Y10 | Y11 | Y12 | Y13 | Y14 |
|---------|--------|------|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|------|
| Y1 | 26758 | 0 | 0 | 0 | -19243 | -579 | -291 | 0 | -145 | -3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Y2 | 0 | 1542 | 0 | -3 | -2 | 0 | -1 | -4 | -24 | -132 | -4 | -47 | -780 | 0 |
| Y3 | 0 | 0 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4773 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -67 |
| Y4 | 0 | 0 | 0 | 1782 | 0 | -5 | 0 | 0 | 0 | -837 | 0 | -976 | 0 | 0 |
| Y5 | -4671 | 0 | 0 | 0 | 46260 | -415 | -37 | 0 | -206 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Y6 | -70 | -2 | -1 | 0 | -162 | 12554 | -70 | 0 | -404 | -100 | 0 | -689 | 0 | 0 |
| Y7 | -149 | -31 | 0 | -14 | -1409 | -248 | 13858 | -28 | -1040 | -255 | -358 | -1401 | 0 | 0 |
| Y8 | -387 | -6 | -4 | -4 | -175 | -37 | -92 | 7563 | -477 | -390 | -62 | -1756 | -179 | -22 |
| Y9 | -1504 | -55 | -4 | -116 | -1897 | -1681 | -807 | 0 | 21065 | -1374 | -1072 | -3808 | 0 | 0 |
| Y10 | -582 | 0 | 0 | -74 | -747 | -159 | -360 | -65 | -628 | 22913 | -5187 | -6320 | -339 | 0 |
| Y11 | -229 | -47 | -4 | -92 | -142 | -298 | -486 | -101 | -1023 | -1791 | 31104 | -2583 | 0 | 0 |
| Y12 | -113 | -9 | 0 | -25 | -678 | -16 | -81 | -9 | -215 | -656 | -273 | 48981 | 0 | -1 |
| Y13 | -323 | -4 | -2 | -43 | -406 | -217 | -301 | -174 | -588 | -660 | -413 | -794 | 11335 | -15 |
| Y14 | -2 | -7 | -2 | -4 | -83 | -49 | -97 | -26 | -250 | -155 | -49 | -277 | -239 | 861 |
| Y15 | -341 | 0 | 0 | -10 | -140 | -31 | -17 | 0 | -65 | -45 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| Y16 | -124 | -16 | 0 | -25 | -83 | -44 | -124 | -44 | -109 | -161 | -119 | 0 | 0 | 0 |
| Y17 | -542 | -40 | -1 | -159 | -2058 | -396 | -846 | 0 | -1030 | -1228 | -465 | -1919 | 0 | 0 |
| Y18 | -13 | -2 | -1 | -1 | -72 | -23 | -22 | -6 | -48 | -42 | -28 | -55 | 0 | 0 |
| Y19 | -4 | -2 | 0 | -2 | -83 | -34 | 0 | 0 | -133 | -71 | -130 | 0 | 0 | -1 |
| Y20 | -396 | -35 | 0 | -9 | -826 | -236 | -472 | -121 | -557 | -744 | -532 | -710 | 0 | 0 |
| Y21 | 0 | -63 | 0 | -168 | -4678 | -1816 | -2254 | -113 | -3672 | -2927 | -2806 | -4459 | -681 | 0 |
| Y22 | 0 | -3 | 0 | 0 | -24 | -72 | -56 | -68 | 0 | -108 | -321 | -513 | 0 | 0 |
| K | -15519 | -419 | -99 | -584 | -6114 | -1669 | -2882 | -1494 | -3719 | -3635 | -2873 | -5881 | -7871 | -671 |
| L | -2284 | -571 | -6 | -322 | -6643 | -3562 | -3486 | -295 | -4634 | -6258 | -14583 | -14003 | -1134 | -60 |
| Taxk | 850 | 11 | -4 | -25 | 946 | -94 | -78 | -119 | -598 | -15 | -210 | -297 | 227 | -7 |
| Taxl | -355 | -241 | -2 | -102 | -1541 | -873 | -998 | -123 | -1500 | -1326 | -1619 | -2493 | -339 | -16 |
| Taxc | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Taxls | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ahorro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Balance | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla A1: (Continua)

| | Y15 | Y16 | Y17 | Y18 | Y19 | Y20 | Y21 | Y22 | Import | Export | Private | Government | Investment | Total |
|---------|------|--------|-------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|------------|------------|-------|
| Y1 | -1 | -182 | 0 | -4 | 0 | 0 | -1159 | -142 | 5563 | -5973 | -4358 | 0 | -241 | 0 |
| Y2 | 0 | -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 | -5 | 213 | -706 | -40 | 0 | 0 | 0 |
| Y3 | 0 | -1 | -85 | 0 | 0 | -5 | 0 | 0 | 4809 | -8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Y4 | 0 | -575 | 0 | 0 | 0 | 0 | -8 | -15 | 971 | -319 | -18 | 0 | 0 | 0 |
| Y5 | 0 | 0 | 0 | -29 | 0 | 0 | -13439 | -456 | 6481 | -6050 | -27438 | 0 | 0 | 0 |
| Y6 | -8 | -51 | -9 | -9 | -17 | -23 | -653 | -386 | 4694 | -4781 | -9684 | 0 | -129 | 0 |
| Y7 | -28 | -1562 | -43 | -3 | -17 | -305 | -3573 | -1107 | 4056 | -2877 | -3415 | 0 | -51 | 0 |
| Y8 | -11 | -92 | -353 | -96 | -122 | -30 | -152 | -53 | 1715 | -1787 | -2991 | 0 | 0 | 0 |
| Y9 | -104 | -1972 | -62 | -7 | -1 | -248 | -1677 | -2466 | 13493 | -10081 | -2935 | -2612 | -75 | 0 |
| Y10 | -46 | -5330 | -21 | 0 | -3 | -131 | -408 | -175 | 7611 | -6739 | -41 | 0 | -3169 | 0 |
| Y11 | -63 | -2945 | -77 | -3 | -9 | -242 | -1370 | -1832 | 19000 | -11811 | -3744 | -69 | -21143 | 0 |
| Y12 | -22 | -9275 | -701 | -117 | -57 | -248 | -3083 | -941 | 16584 | -25791 | -10236 | -23 | -12995 | 0 |
| Y13 | -199 | -218 | -261 | -4 | -5 | -174 | -1583 | -771 | 130 | -23 | -4287 | 0 | 0 | 0 |
| Y14 | -1 | -1 | -3 | -1 | -1 | -3 | -34 | -19 | 855 | 0 | -413 | 0 | 0 | 0 |
| Y15 | 2457 | -14 | -8 | 0 | 0 | -10 | -469 | -210 | 0 | 0 | -1096 | 0 | 0 | 0 |
| Y16 | -82 | 100059 | -152 | -8 | -14 | -108 | -8408 | -1353 | 1 | -11 | -8186 | 0 | -80889 | 0 |
| Y17 | -10 | -1438 | 21818 | -16 | -53 | -882 | -2567 | -489 | 189 | -2001 | -5394 | -206 | -267 | 0 |
| Y18 | -8 | -17 | -19 | 1583 | -1 | -17 | -103 | -32 | 21 | -926 | -139 | -14 | -15 | 0 |
| Y19 | -4 | -96 | -5 | 0 | 3320 | -350 | -619 | -180 | 998 | -1863 | -646 | -95 | 0 | 0 |
| Y20 | -50 | -546 | -1160 | -417 | -923 | 20395 | -5092 | -1314 | 1502 | -1934 | -5752 | -71 | 0 | 0 |
| Y21 | -247 | -8794 | -2988 | -101 | -417 | -2049 | 219791 | -6429 | 7128 | -11010 | -145537 | -4117 | -21593 | 0 |
| Y22 | -20 | -165 | -39 | 0 | -6 | -235 | -790 | 91005 | 109 | -126 | -13888 | -74680 | 0 | 0 |
| K | -617 | -11181 | -7909 | -78 | -469 | -8494 | -87231 | -12501 | 0 | 0 | 181910 | 0 | 0 | 0 |
| L | -764 | -50667 | -5348 | -571 | -930 | -4992 | -68851 | -44308 | 0 | 0 | 234272 | 0 | 0 | 0 |
| Taxk | 2 | -1132 | -1085 | -2 | -6 | -231 | -6109 | -2783 | 0 | 0 | 0 | 10759 | 0 | 0 |
| Taxl | -174 | -3802 | -1490 | -117 | -269 | -1618 | -12409 | -13038 | 0 | 0 | 0 | 44445 | 0 | 0 |
| Taxc | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -23123 | 23123 | 0 | 0 |
| Taxls | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -3560 | 3560 | 0 | 0 |
| Savings | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -140567 | 0 | 140567 | 0 |
| Balance | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -96123 | 94817 | 1306 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Tabla Input-Output Simétrica España (INE 1995) y Balance Energético España (EUROSTAT 2000)

Tabla A2: Producción, Consumo y Emisiones

| | TIOS códigos (INE 1995) | Economía | | | | Emisiones GEIs | | | |
|-----|--------------------------------|----------------------------|----------------|-------------------------|---------------|----------------------------|--|-------------------------|--|
| | | Producción millones (%) | | Consumo millones (%) | | Combustión (Gg CO2) (%) | | Proceso (Gg CO2) (%) | |
| Y1 | Agriculture | 1,2,3 | 26758 (3,8%) | 4590 (1,3%) | 12727 (5,5%) | 47817 (51,4%) | | | |
| Y2 | Coal Extraction | 4 | 1542 (0,2%) | 46 (0,0%) | 315 (0,1%) | 1103 (1,2%) | | | |
| Y3 | Oil and Natural Gas Extraction | 5 | 130 (0,0%) | 0 (0,0%) | 165 (0,1%) | 15 (0,0%) | | | |
| Y4 | Other Product Extraction | 6,7 | 1782 (0,3%) | 19 (0,0%) | 364 (0,2%) | 18 (0,0%) | | | |
| Y5 | Food Industry | 12,13,14,15,16 | 46260 (6,5%) | 29026 (8,2%) | 5602 (2,4%) | 416 (0,4%) | | | |
| Y6 | Clothes industry | 17,18,19 | 12554 (1,8%) | 10617 (3,0%) | 1683 (0,7%) | 565 (0,6%) | | | |
| Y7 | Paper and Cardboard Industry | 20-22 | 13858 (2,0%) | 3797 (1,1%) | 3828 (1,6%) | 845 (0,9%) | | | |
| Y8 | Oil refinery industry | 8 | 7563 (1,1%) | 4483 (1,3%) | 655 (0,3%) | 10460 (11,2%) | | | |
| Y9 | Chemic Industry | 23,24 | 21065 (3,0%) | 6055 (1,7%) | 16089 (6,9%) | 3792 (4,1%) | | | |
| Y10 | Metallic Industry | 29-30 | 22913 (3,2%) | 42 (0,0%) | 19104 (8,2%) | 4353 (4,7%) | | | |
| Y11 | Machinery Industry | 31-35 | 31104 (4,4%) | 4429 (1,2%) | 2494 (1,1%) | 622 (0,7%) | | | |
| Y12 | Othes Industry | 25-28, 36-39 | 48981 (6,9%) | 12683 (3,6%) | 48487 (20,9%) | 392 (0,4%) | | | |
| Y13 | Electricity | 9 | 11335 (1,6%) | 4832 (1,4%) | 52732 (22,7%) | 7787 (8,4%) | | | |
| Y14 | Gas | 10 | 861 (0,1%) | 455 (0,1%) | 722 (0,3%) | 557 (0,6%) | | | |
| Y15 | Water distribution | 11 | 2457 (0,3%) | 1132 (0,3%) | 378 (0,2%) | 111 (0,1%) | | | |
| Y16 | Construction | 40 | 100059 (14,1%) | 8433 (2,4%) | 3199 (1,4%) | 500 (0,5%) | | | |
| Y17 | Transport by road | 45,46 | 21818 (3,1%) | 5913 (1,7%) | 11629 (5,0%) | 6 (0,0%) | | | |
| Y18 | Transport by air | 47 | 1583 (0,2%) | 173 (0,0%) | 3166 (1,4%) | 85 (0,1%) | | | |
| Y19 | Transport by water | 48 | 3320 (0,5%) | 782 (0,2%) | 4019 (1,7%) | 73 (0,1%) | | | |
| Y20 | Anexess to transport | 49, 50 | 20395 (2,9%) | 6214 (1,7%) | 1035 (0,4%) | 61 (0,1%) | | | |
| Y21 | Comercial services | 41-44,51-56,58,62,68-71 | 219791 (31,1%) | 162882 (45,9%) | 5780 (2,5%) | 1758 (1,9%) | | | |
| Y22 | Non Comercial services | 57,59-61,63-67 | 91005 (12,9%) | 88644 (25,0%) | 2334 (1,0%) | 7462 (8,0%) | | | |
| - | Privado | | | | 35678 (15,4%) | 4254 (4,6%) | | | |
| | Total | | 707134 100% | 355247 100% | 232181 (100%) | 93053 (100%) | | | |

Tabla A3: Coeficiente de emisión y uso de fósiles en combustión

| | Carbón | Petróleo | Gas |
|--|--------|----------|------|
| Ton CO ₂ Equivalente / Ktep | 4,1 | 2,85 | 2,18 |
| Industria Química ² | 69% | 65% | 38% |
| Industria ² | - | 75% | - |

Fuente: ¹(Eurostat 1991), ²(Eurostat 2005)

Tabla A4: Precio de la Energía (M€Ktep)

| | Crudo ¹ | Carbón ² | Petróleo ¹ | Gas ³ | Electricidad ³ |
|--------------|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| Productores | 0.108 | 0.105 | 0.265 | 0.219 | 0.763 |
| Consumidores | - | - | 1.062 | 0.472 | 1.135 |

Fuente: ¹(IEA 1998) ²(MITYC 2001) y ³(Eurostat 2005)

Tabla A5: Proyecciones crecimiento anual medio ecoeficiencia (Emisiones-PIB)

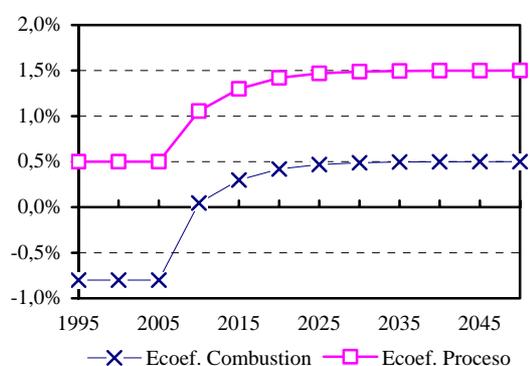


Tabla A6: Elasticidades de sustitución en las funciones de producción, intercambio y utilidad

| | | | | | |
|----------------|-----|---------------|-----|------------|---|
| σ^Y | 0 | σ^{E1} | 1 | σ^F | 1 |
| σ^{KEL} | 0.5 | σ^{E2} | 0.3 | σ^G | 1 |
| σ^{KL} | 1 | σ^U | 0.5 | σ^A | 3 |
| σ^E | 0.5 | σ^C | 0.5 | σ^T | 2 |

Fuente: Modelo MIT-EPPA (Babiker *et al.* 2001)

Tabla A7: Parámetros dinámica del modelo

| | |
|----------------------------------|------|
| Tasa de crecimiento | 2,5% |
| Tasa de depreciación del capital | 5,0% |
| Tipo de interes | 7,0% |

Fuente: INE (2002a)