

LOS COSTES DE LA POLÍTICA DE CAMBIO CLIMÁTICO: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA

Cristina García Fernández

Universidad Complutense de Madrid

Resumen.- En este trabajo se presenta un modelo matemático aplicado a la vertiente económica del cambio climático. La perspectiva que se adopta apunta a la necesidad de que la aplicación de medidas mitigadoras se haga de forma gradual, teniendo en cuenta que la ejecución de las políticas económicas de cambio climático y la evolución de ciertas variables de tipo económico y social conllevan una serie de costes, esto es, los costes de reducir las emisiones de carbono. La aplicación efectiva de las políticas de cambio climático –cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases invernadero- así como el control de las variables más influyentes en la expulsión de emisiones requieren que se incurra en un coste mínimo durante su ejecución y una estricta coordinación entre las distintas medidas para que la evolución desde el estado inicial hasta el estado final deseado sea de la forma más eficiente posible. El modelo optimiza la trayectoria que deben seguir estas variables desde la situación inicial hasta la final deseada minimizando el coste de este cambio.

Palabras clave.- *políticas de cambio climático, coste de reducir las emisiones de carbono*

Abstract.- This paper presents a mathematical model applied to the problem of climate change. We believe in the necessity of applying gradual mitigating policies and we know that the performance of climate change policies and the evolution of certain economic and social variables give way to some economic cost, that is, the cost of reducing carbon emissions. The effective performance of economic climate change policies –that have the goal of reducing greenhouse gases- and the control of the most influential variables in the expulsion of the emissions cause a minimum cost and a very strict coordination between the different policies so that the evolution from the initial state to the final required would be most efficient. The model optimizes the trajectory these variables should take from the initial point to the final required, minimizing the cost of this change.

Keywords.- *climate change policies, cost of reducing carbon emissions*

1. La política de cambio climático y la reducción de emisiones

Hoy en día, disponemos de diversas políticas económicas de tipo preventivo que pueden contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La literatura existente suele definir a estas políticas como coste-eficientes ya que pueden lograr una reducción importante de emisiones sin tener que incurrir en un coste muy alto. Del mismo modo, estas políticas también pueden ser coste efectivas siempre que no sólo consigan recortes importantes de emisiones de CO_2 , el gas mayormente emitido a la atmósfera, sino también de

otros gases de efecto invernadero. Por ejemplo, aumentar la eficiencia energética¹ no solo reduce las emisiones de dióxido de carbono sino también de otros gases que contribuyen altamente al calentamiento global. Pero además, una mayor eficiencia puede hacer que las industrias y los países se tornen más competitivos en los mercados internacionales. Ahora bien, las políticas económicas destinadas a mejorar la eficiencia energética, para que sean efectivas, necesitan el apoyo del público y de los grupos de interés, esto es, los gobiernos no pueden ser los únicos que tomen partido en el recorte de las emisiones, también es necesaria la colaboración de los individuos, comunidades, empresas y países. La educación y la concienciación de los ciudadanos favorecen el consumo eficiente de energía y, por tanto, la sustitución de combustibles fósiles por otros que eviten la excesiva explotación de los recursos.

En definitiva, la respuesta prudente al cambio climático estaría compuesta por una combinación de políticas económicas de tipo preventivo que tuvieran la finalidad de conseguir mejoras en la eficiencia energética. Dicha prevención constituye una alternativa eficiente para adaptarse al cambio climático incurriendo en menores riesgos y propiciando el desarrollo sostenible.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la adopción de medidas preventivas no sólo está justificada por el riesgo que se evita, sino que también es necesario que estas tengan un punto de partida efectivo. La adopción de medidas graduales es importante, ya que de otro modo podríamos incurrir en costes prematuros (de transición o ajuste) excesivamente altos o innecesarios. Así pues, las políticas deben ser efectivas desde su puesta en marcha a la vez que adaptables a las necesidades del momento. Por ejemplo, si establecemos un impuesto sobre el carbono, este no debe partir de una tasa excesivamente alta, ya que no dejaríamos tiempo para que los mercados y los equipos se adaptaran a los nuevos cambios de los precios -o tendrían que hacerlo incurriendo en un coste excesivo-. Pero tampoco es conveniente mantener la misma tasa a largo plazo, ya que, factores como el aumento de la población y, en consecuencia, la mayor demanda de energía pueden requerir tasas impositivas mayores con el fin de evitar emisiones más cuantiosas. También puede ocurrir que el desarrollo y puesta en marcha de las tecnologías energéticas eficientes sea más rápido de lo previsto, por lo que ello facilitaría la reducción del impuesto. La disponibilidad de nuevas tecnologías que no emitan carbono es un prerequisite, aunque no una garantía, para reducir las emisiones de carbono a un coste razonable. El recorte de las emisiones depende también de que se reduzcan las barreras que existen en la actualidad para la difusión y transferencia de tecnología, de la movilización de recursos financieros, del apoyo a los países en desarrollo, etc. Además, la combinación óptima de políticas puede variar de un país a otro, dependiendo de factores como la estructura de los mercados de energía, de la configuración política, de la receptividad de la sociedad, etc. En definitiva, es necesaria que la aplicación

¹ La producción, consumo y utilización de la energía constituyen la fuente antropogénica principal de emisiones de gases invernadero.

de una política económica reductora de emisiones sea implementada de forma gradual, acorde con las necesidades del momento, que tenga en cuenta los factores de índole interno y externo del país o grupo de países donde se aplique y, que tenga como finalidad, alcanzar una mayor eficiencia energética².

Esta argumentación nos lleva al terreno de la valoración de los costes. En esta línea, y a la hora de calcular y valorar los costes de las políticas económicas destinadas a frenar el cambio climático, debemos considerar diversas variables. Entre las más importantes se encuentran las metas y calendarios de emisiones determinados internacionalmente, la tendencia de la población y de la economía - las expectativas son de crecimiento y con este una mayor demanda energética-, el desarrollo de nuevas tecnologías -cuanto más alta sea su disponibilidad y su tasa de incorporación menores tasas impositivas sobre el carbono serán necesarias lo cual reducirá los costes-, la tasa de reposición del capital referida al período de vida natural de los equipos en funcionamiento - cambios abruptos en el *stock* de capital existente pueden acarrear grandes costes si este no ha sido amortizado-, la tasa de descuento³ que se utilice para calcular el valor actual de la corriente de beneficios ambientales futuros, las posibles acciones que adopten los consumidores y las industrias en respuesta a las políticas adoptadas, al consumo de combustibles fósiles, al ritmo de avance del cambio climático, etc.

Las estimaciones sobre la cuantía de los costes de reducir las emisiones de dióxido de carbono varían de unos estudios a otros⁴. Algunos analistas piensan que estos costes serían negativos porque las emisiones podrían eliminarse simplemente acabando con las distorsiones que tienen los mercados de energía (Bueno *et al*, 1991). Otros creen que si fuera posible reducir el consumo de energía a un coste negativo ya se habría hecho hace tiempo. Existen también distintos puntos de vista respecto a la evolución de otras variables: con qué rapidez aumentarán las emisiones en ausencia de políticas de cambio climático, qué mejoras de eficiencia energética pueden darse independientemente de los cambios en los precios, con qué facilidad podrán sustituirse los combustibles fósiles por otros menos contaminantes y por otras fuentes de energía y la disponibilidad y coste de nuevas tecnologías energéticas que no emiten CO_2 . En definitiva, y dado el rango tan amplio de incertidumbres que rodean a la evolución de las variables y a los modelos económicos que existen en este ámbito, no es de extrañar que existan puntos

² Los instrumentos económicos destinados a mejorar dicha eficiencia son numerosos y de diversa índole. A modo de ejemplo podemos citar los impuestos sobre el carbono (alteran los precios en los mercados de energía), los permisos de emisiones, las regulaciones y estándares, la eliminación de subsidios sobre los combustibles fósiles, los programas de reforestación, los programas de información pública sobre eficiencia energética, las medidas específicas sobre los distintos sectores económicos, en particular industria y transporte, etc.

³ El valor que tome la tasa de descuento es crucial para que las estimaciones sean positivas o negativas. Para una mayor aproximación ver Nordhaus, 2002.

⁴ Un análisis riguroso se encuentra en Krause *et al.*, (1993)

de vista diversos acerca de los costes que resultarán del recorte de las emisiones de CO_2 .

De acuerdo con estas consideraciones, parece evidente que una política destinada a reducir las emisiones debería lograr su objetivo con el mínimo coste posible. Como decíamos al principio, para que una política reductora de emisiones sea coste-efectiva, esta debe cubrir un rango muy amplio, esto es, no sólo debe conseguir recortes en las emisiones de CO_2 sino también en las emisiones de otros gases invernadero. Además, la reducción de cada gas individual debería lograrse al menor coste posible. Por ejemplo, las emisiones de CO_2 pueden reducirse aplicando distintos instrumentos económicos: prohibiendo el uso del carbón, estableciendo estándares de eficiencia obligatorios, estableciendo impuestos sobre los combustibles fósiles, creando mercados de derechos de emisiones, etc. Todas estas políticas son capaces de limitar el uso de los combustibles fósiles pero algunas lo harán con una eficiencia mayor.

Por tanto, cualquiera que sea el tipo de política económica preventiva que pongamos en marcha esta debe ser coste-eficiente. De acuerdo con esto, los esfuerzos modestos que se lleven a cabo con el fin de reducir las emisiones de gases invernadero están económicamente justificados.

El análisis económico realizado por diversos autores a través de distintos modelos -unos utilizando el método coste-beneficio, otros calculando metas y fechas de estabilización de las emisiones y observando cuál será la pérdida de bienestar a través de la pérdida de producto nacional observada, otros calculando los costes de la aplicación de algún instrumento económico como el impuesto sobre el carbono, etc.- sugiere que pequeñas reducciones de las emisiones y pequeñas mejoras de los sumideros pueden conseguirse a un coste nulo o muy reducido. No obstante, a medida que aumentan los recortes de las emisiones también pueden hacerlo los costes, a no ser que se desarrollen simultáneamente tecnologías más eficientes. Hasta el momento, dado el alto grado de incertidumbre y la relativa expansión de estas tecnologías parece que las pequeñas reducciones de emisiones y de aumento de los sumideros están ampliamente justificadas. Ahora bien, si queremos que esos costes sean cada vez menores debemos aplicar instrumentos económicamente eficientes y llevar a cabo una seria coordinación internacional de los mismos. Las políticas económicas preventivas deben complementarse con una mayor investigación sobre nuevas tecnologías y fuentes de energía alternativas que ayuden a reducir los costes y a reducir el avance del cambio climático en el largo plazo. Además, una vez que dichas tecnologías se vayan adaptando con eficiencia a los sistemas productivos estaremos en disposición de ir prescindiendo progresivamente de la utilización de los instrumentos económicos. Si esta trayectoria se va cumpliendo, en el largo plazo, los costes de reducir las emisiones serían mínimos.

A continuación se presenta un modelo de optimización cuyo objetivo es minimizar el coste de reducir las emisiones. El modelo concluye con la

determinación de las funciones que indicarían la evolución exacta en el tiempo de los distintos componentes del coste de reducir las emisiones (CRE) siguiendo la trayectoria óptima.

2. Cuestiones previas

Previamente a la determinación del coste de reducir las emisiones es necesario establecer una meta para estas, de tal forma que el objetivo inicial consistirá en fijar un nivel de emisiones deseado en una fecha determinada.

Adicionalmente, para alcanzar un objetivo determinado de emisiones hay que tener presente que el coste global de reducir las emisiones dependerá del período de tiempo establecido para la consecución de dicho objetivo. Por tanto, habrá que especificar el período inicial (a partir del cual comenzamos a limitar las emisiones) y el final (en el que debería haberse alcanzado la meta de emisiones prevista).

Por último, la mayoría de las previsiones (estudios) realizados sobre los costes de reducir las emisiones otorgan un papel importante al carbón dentro de las futuras fuentes de energía. Este supuesto se basa en que el carbón es una fuente de energía abundante, lo que limitaría aumentos futuros del precio de la energía. Ello nos permite excluir a los precios de la energía del modelo, pudiendo relacionar directamente el nivel de emisiones y el coste de su reducción con variables tales como la tasa de crecimiento económico prevista, la evolución de la población, el consumo de energía primaria, la elasticidad renta de la demanda de energía, los cambios en la eficiencia energética, la política reductora de emisiones y el grado de compromiso internacional que exista en torno al cambio climático.

3. Planteamiento inicial

- Seleccionamos unas variables económicas que influyen en la emisión de gases invernadero $EG = EG (PCC, P, PIB, CCF, GCI)$

Es decir:

PCC: Políticas de Cambio Climático (la política a combinación de estas)

P: Población

PIB: Actividad Económica

CCF: Consumo de Combustibles Fósiles

GCI: Grado de Cooperación Internacional

Donde EG = emisiones de gases invernadero

- Se establece, de forma exógena, una meta de emisiones (Acuerdo internacional) $EG(T) = EG^*$
- Queremos observar y controlar la evolución de dichas variables para que cumplan con la meta de emisiones.
- Establecemos que esto se realice con un coste mínimo.

VARIABLES ECONOMICAS----- EG (T) = EG*
COSTE MIN

Por tanto:

- Existe una dependencia:

$$EG = EG(PCC, P, PIB, CCF, GCI)$$

Ecuación simbólica que expresa las emisiones globales en función de estas variables.

- Dado que las variables dependen del tiempo:

$$PCC(t), P(t), PIB(t), CCF(t), GCI(t)$$

Tendremos que $EG = EG(t)$

$$EG = f(t)$$

- Deberá cumplir $EG(T) = EG^*$

Donde EG^* son las emisiones finales objetivo. Por lo que las emisiones globales en el instante final deberán ser las emisiones objetivo.

4. El modelo

Como apuntábamos en la introducción de este trabajo, la aplicación de las políticas de cambio climático y la evolución de ciertas variables de tipo económico y social conllevan una serie de costes. Los más relevantes para cualquier estudio de tipo económico son los costes de reducir las emisiones de carbono (CRE), ya que pueden materializarse en pérdidas de producción o bienestar.

Las políticas de cambio climático –cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases invernadero- así como el control de las variables más influyentes en la expulsión de emisiones requieren que se incurra en un coste mínimo durante su ejecución y una estricta coordinación entre las distintas medidas para que la

evolución desde el estado inicial hasta el estado final deseado sea de la forma más eficiente posible. El modelo que se presenta en este trabajo optimiza la evolución que deben seguir estas variables desde la situación inicial hasta la final deseada minimizando el coste de este cambio.

Optimización de los Costes de Reducir las Emisiones : una aproximación

Objetivo del Modelo:

- Encontrar la Trayectoria Óptima que debe seguir cada Variable para que el Coste de Reducir las Emisiones (CRE) sea Mínimo.

Expresión Matemática del Modelo:

$$\min CRE = \min \int_0^T f(y_i, y_i') \cdot e^{-rt} dt$$

donde $f(y_i, y_i')$ es el Coste Instantáneo de Reducir las Emisiones (CIRE) que dependerá de ciertas variables y de sus tasas de cambios y , donde r es la tasa de descuento.

Las variables seleccionadas para el estudio son:

$y_1 = PCC$	Políticas de Cambio Climático
$y_2 = P$	Población
$y_3 = PIB$	Actividad Económica
$y_4 = CCF$	Consumo de Combustibles Fósiles
$y_5 = GCI$	Grado de Cooperación Internacional en el Cambio Climático

Por tanto la expresión matemática quedará:

$$\min CRE = \min \int_0^T f(PCC, P, PIB, CCF, GCI, PCC', P', PIB', CCF', GCI') \cdot e^{-rt} dt$$

Que deben cumplir las condiciones:

~ Iniciales: $PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$
 ~ Objetivo: $PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$
 que a su vez cumplen $EG(T) = EG^*$ (Emisiones Objetivo Deseadas).

Solución Analítica

Expresión Matemática del Modelo. Extremo de una Funcional:

$$\min CRE = \min \int_0^T F(PCC, P, PIB, CCF, GCI, PCC', P', PIB', CCF', GCI', t) dt$$

$PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$
 $PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$

Solución del Extremo de una Funcional. Ecuaciones de Euler:

$$\frac{\partial F}{\partial PCC} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial PCC'} \right) = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial P} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial P'} \right) = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial PIB} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial PIB'} \right) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial CCF} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial CCF'} \right) = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial GCI} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial GCI'} \right) = 0$$

$PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$
 $PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$

Una Aproximación

□ Suponiendo un Coste Instantáneo de Reducir las Emisiones⁵:

$$CIRE = - \left[U - (C_{PCC} PCC' + C_P P' + C_{PIB} PIB' + C_{CCF} CCF' + C_{GCI} GCI') \right]$$

□ La expresión del problema es:

$$\min CRE = \min \left[- \int_0^T \left[U - (C_{PCC} PCC' + C_P P' + C_{PIB} PIB' + C_{CCF} CCF' + C_{GCI} GCI') \right] \cdot e^{-rt} dt \right]$$

$PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$
 $PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$

□ Aplicando las ecuaciones de Euler, resulta:

$$\frac{\partial U}{\partial PCC} = C_{PCC} r - \frac{dC_{PCC}}{dt} \quad \frac{\partial U}{\partial P} = C_P r - \frac{dC_P}{dt} \quad \frac{\partial U}{\partial PIB} = C_{PIB} r - \frac{dC_{PIB}}{dt}$$

$$\frac{\partial U}{\partial CCF} = C_{CCF} r - \frac{dC_{CCF}}{dt} \quad \frac{\partial U}{\partial GCI} = C_{GCI} r - \frac{dC_{GCI}}{dt}$$

$PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$
 $PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$

Expresiones que indican la trayectoria óptima que cada variable debe cumplir en cada instante para que el coste de reducir las emisiones sea mínimo. De acuerdo con lo anterior, la trayectoria óptima que debe seguir cada variable seleccionada en el modelo será aquella en la que su utilidad marginal cumpla dicha expresión en función de los costes y de su variación.

⁵ Los C_i son los costes nominales de las distintas variables que se han considerado influyentes y, donde la utilidad $U = U(PCC, P, PIB, CCF, CGI)$.

Expresión General

De la Expresión Matemática del Modelo:

$$\min CRE = \min \int_0^T F(PCC, P, PIB, CCF, GCI, PCC', P', PIB', CCF', GCI', t) dt$$

$$PCC(0), P(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$$

$$PCC(T), P(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$$

Considerando que algunas variables no son modificables, ej. : población⁶

$$P(t) = P(0) + \alpha t ;$$

Y que existen interrelaciones entre otras variables y el tiempo⁷:

$$g_1(t, PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$$

$$g_2(PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$$

El modelo se convierte en:

$$\min CRE = \min \int_0^T F(PCC, PIB, CCF, GCI, PCC', PIB', CCF', GCI', t) dt$$

$$PCC(0), PIB(0), CCF(0), GCI(0)$$

$$PCC(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$$

$$g_1(t, PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$$

$$g_2(PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$$

Solución General

Nuestro modelo se transforma, utilizando los Multiplicadores de Lagrange, en resolver⁸ :

$$\min \int_0^T Z(t, y_i, y_i', \lambda_1, \lambda_2) dt ;$$

Siendo:

$$Z(t, y_i, y_i', \lambda_1, \lambda_2) = F(t, y_i, y_i') + \lambda_1 \cdot g_1(y_i, t) + \lambda_2 \cdot g_2(y_i)$$

6 Donde $\alpha = \frac{dP}{dt}$

7 Seguramente existirán relaciones de dependencia entre el resto de las variables. Por ejemplo si existe: $EG = EG^*(t)$; donde $EG^*(t)$ son las emisiones deseadas en cada instante. Entonces $EG(PCC, PIB, CCF, GCI) = EG^*(t)$ es la condición objetivo, que se puede expresar como:
 $g_1(t, PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$
 Igualmente la fuerte interdependencia entre PCC, PIB, CCF y GCI se puede expresar como:
 $g_2(PCC, PIB, CCF, GCI) = 0$

8 Siendo $\mathcal{Y}_1 = PCC$; $\mathcal{Y}_2 = PIB$; $\mathcal{Y}_3 = CCF$; $\mathcal{Y}_4 = GCI$

Aplicando las Condiciones Necesarias de Extremo (Euler-Lagrange) resultará el Sistema:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial PCC} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial PCC'} \right) + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial PCC} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial PCC} = 0 & \quad \frac{\partial F}{\partial PIB} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial PIB'} \right) + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial PIB} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial PIB} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial CCF} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial CCF'} \right) + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial CCF} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial CCF} = 0 & \quad \frac{\partial F}{\partial GCI} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial GCI'} \right) + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial GCI} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial GCI} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_1(t, PCC, PIB, CCF, GCI) &= 0 \\ g_2(PCC, PIB, CCF, GCI) &= 0 \end{aligned}$$

que nos permitirá hallar:

$$PCC(T), PIB(T), CCF(T), GCI(T)$$

Funciones que determinan cual debe ser la evolución óptima en el tiempo de las distintas variables que influyen en el coste de reducir las emisiones (CRE).

5. Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos podido comprobar cómo las políticas económicas destinadas a ralentizar el cambio climático conllevan unos costes. Lo costes de reducir las emisiones de carbono, tal como ilustra el modelo presentado, dependen de una serie de variables y de su evolución en el tiempo. También hemos obtenido las funciones que determinan cuál debe ser la evolución óptima en el tiempo de las distintas variables (seleccionadas para el modelo) que influyen en el coste de reducir las emisiones (CRE). A continuación se muestran las conclusiones más relevantes sobre dichas variables y sobre su repercusión en los costes.

La Políticas de Cambio Climático. Cualquiera que sea la medida que se adopte para reducir las emisiones de carbono conllevará un coste de aplicación. Este será mayor o menor en función de la rigidez de la política adoptada. No obstante -y esto es lo que asumimos en el modelo- si se utilizara un impuesto gradual sobre el carbono, la forma en que los ingresos del impuesto fueran utilizados (reciclaje del impuesto) sería determinante a la hora de calcular la pérdida de producción estimada.

Las Metas prefijadas de emisiones. Cuanto más próxima esté la meta o fecha establecida para el control de emisiones más alto será el coste de reducirlas ya que esto introduce una mayor rigidez en la política de cambio climático aplicada.

La tendencia de la Población. Si suponemos que la evolución de la población es creciente debemos tener en cuenta que las emisiones de gases invernadero pueden aumentar –caso más probable de un aumento de la demanda de energía- ya que las medidas que mejoran la eficiencia energética son costosas y su efecto se materializará en el largo plazo. Si el objetivo es reducir las emisiones la política de cambio climático tendrá que endurecerse acarreado un aumento de los costes.

La tendencia de la Actividad Económica. Las expectativas mundiales de crecimiento económico conllevan una mayor demanda de energía, hecho ante el que numerosos países incrementarán la tasa de explotación de los combustibles fósiles. A medio plazo las políticas de cambio climático tendrán que extenderse a esos países lo cual aumentará los costes de reducir las emisiones. Obviamente, diferentes previsiones sobre crecimiento económico pueden conducir a diferentes estimaciones sobre costes de control del carbono. En general, menores tasas de crecimiento dan lugar a menores impuestos sobre el carbono utilizados para hacer frente a alguna meta de emisiones en particular.

Desarrollo de Nuevas Tecnologías. A medida que la disponibilidad y el desarrollo de nuevas tecnologías va siendo mayor se hace menos necesario la aplicación de políticas estrictas de cambio climático tales como el establecimiento de altas tasas impositivas o medidas de regulación de la actividad económica. Esto conlleva, en general, unos menores costes asociados a la política de cambio climático⁹.

Tasa de Reposición del Capital Instalado. La tasa a la que debe ir reponiéndose el capital instalado por otro más eficiente energéticamente no debe ser demasiado alta, ya que, cambios abruptos pueden acarrear mayores costes de transición hacia una economía más eficiente y limpia. No obstante, el stock de capital no es muy flexible. Tanto el capital como las nuevas opciones tecnológicas dependen de los cambios esperados de los precios de la energía. Cuando estos precios cambian de forma inesperada los propietarios del capital instalado puede que no sean capaces de responder de forma inmediata a los nuevos precios. El ajuste económico impone costes a medida que precios y mercados reaccionan ante los precios más altos de los combustibles basados en el consumo de carbono. De aquí se deduce que los costes de ajuste

⁹ El modelo de Jorgenson y Wilcoxon (1991) es uno de los pocos que han estimado el impacto potencial que producen los cambios en los precios sobre el progreso tecnológico a lo largo del tiempo. El modelo concluye que los mercados de energía responden rápidamente a las señales de precios. Este es un punto clave, ya que, en general, la disponibilidad de mayores opciones tecnológicas significa que se necesitan menores impuestos sobre el carbono para reducir las emisiones de CO_2 a un nivel determinado.

dependen en gran medida de que los cambios en los precios sean o no anticipados.¹⁰

Elasticidades. En general, en el corto plazo no conocemos la respuesta de los agentes económicos ante un cambio en los precios de la energía, ya que no se dispone del tiempo suficiente para captar toda la información sobre los mismos y reaccionar ante estos. No obstante, en el largo plazo, los agentes pueden reaccionar comprando productos más eficientes energéticamente. De esta forma, podemos conocer la respuesta de la demanda ante cambios en los precios (elasticidad demanda-precio) por lo que estaremos en disposición de poder calcular la reducción de emisiones asociada a la política de cambio climático de tipo impositivo (impuesto sobre el carbono).

Llegado a este punto es importante señalar que la variable “elasticidad” no se ha incluido en el modelo debido a la complejidad que ello supondría para el análisis. No obstante, se pensó en incluir dos variables adicionales en las funciones g_1 y g_2 . Las variables eran la elasticidad de la demanda de energía primaria (fósil) respecto a la renta y la elasticidad de la demanda de energía primaria respecto al precio. Su importancia radica en que la demanda de energía primaria depende de la respuesta que tengan los agentes económicos ante cambios en los precios de los combustibles fósiles y de la evolución del nivel de producción y renta de los países.

Facilidad en sustituir los Combustibles Fósiles (Disponibilidad de Fuentes de Energía Alternativas y Elasticidades Cruzadas de los combustibles fósiles). Las reducciones de carbono a través de la sustitución de combustibles fósiles por otros menos contaminantes no disminuyen la disponibilidad de la energía sino que únicamente reducen la intensidad de carbono que ésta contiene, mejorando la eficiencia energética. Según Cline (1992), este ajuste debería poder reducir a la mitad el recorte porcentual necesario de la energía que se requiere para reducir las emisiones de carbono. Es decir, un recorte, por ejemplo del 70 por ciento en las emisiones de carbono debería lograrse con solamente una reducción de un 35 por ciento de la energía utilizada. La cantidad de esta disminución viene indicada por la elasticidad de la producción respecto a la energía. Si esta elasticidad fuese la sugerida por Cline (0,06), entonces el recorte del 35 por ciento en la energía iría acompañado de una reducción aproximada de un 2 por ciento del PNB.

Grado de Cooperación Internacional. Dado que el cambio climático antropogénico es un problema transfronterizo, los costes de reducir las emisiones serán menores a medida que aumente la cooperación entre países. Teniendo en cuenta que los costes de reducir las emisiones crecen con el nivel de recorte, los costes globales de lograr una determinada meta global de

¹⁰ Un estudio de Jorgenson y Wilcoxon (1990) muestra que una parte importante de la pérdida de productividad asociada al aumento de los precios energéticos de 1970 fue debido al inesperado repunte de los mismos y no al aumento gradual de los precios reales del petróleo.

emisiones declinarían a medida que mayor número de países se comprometieran a cumplir con dichas metas¹¹.

Bibliografía

- BROOME, J. (1992). *Counting the Cost of Global Warming*. White Horse Press. Cambridge, U.K.
- BUERO, G., CLARKE, R., y WINTERS, L.A. (1991). *Controlling Greenhouse Gases: A Survey of Global Macroeconomic Studies*. Working Paper. Department of the Environment, Environmental Economics Research Series. University of Nottingham, U.K.
- BURNIAUX, J.M., MARTIN, J.D., 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". Informe Técnico nº 104, OCDE, Departamento de Economía y Estadística, División de Asignación de Recursos. París. También el informe anterior (103), "The Costs of Policies to reduce Global Emissions of CO₂: Initial Simulations Results with GREEN.
- GARCIA, C. (2006). "El análisis coste-beneficio y la dificultad de su aplicación al cambio climático". En *Estudios de Economía Aplicada*, vol 24-2, pags 751-762.
- CLINE, W.R. (1992). *The Economics of Global Warming*. Institute for International Economics. Washinton DC.
- CLARKE, R., BOERO, G., y WINTERS, L.A. (1996). "Controlling Greenhouse Gases: A Survey of Global Macroeconomic Studies". *Bull. Econ. Res.*, Octubre, 48 (4), pp. 269-308.
- JORGENSON, D.W., y WILCOXEN, P.J. (1990). "The Cost of Controlling US Carbon Dioxide Emissions". Harvard University, Cambridge, MA.
- (1991). "Reducing US Carbon Emissions: The Cost of Different Goals". En Moroney, John, R., ed., *Energy, Growth and the Environment*. Greenwich. JAI Press, pp. 125-38.
- KRAUSE, F., HAITES, W., HOWARTH, R. y KOOMEY, J. (1993). *Energy Policy in the Greenhouse, Vol II, Parte I: Cutting Carbon Emissions: Burden or Benefit? The Economics of Energy-Tax and Nonprice Policies*. International Project for Sustainable Energy Paths. El Cerrito, CA.

¹¹ Los estudios sobre el coste de control de las emisiones de carbono muestran que las reducciones crecientes de las emisiones permitidas cuestan más a medida que se reduce el nivel absoluto de las emisiones permitidas en cualquier año.

- MANNE, A., y RICHELIS, R. (1990). "CO2 Emission Limits: An Economic Cost Analysis for the USA". *Energy Journal*, 11 (2): pp. 51-74.
- (1992). "The Impact of Timing on the Cost of Achieving Carbon Emission Targets". EMF Documento de Trabajo 12.23, Energy Modeling Forum. Stanford, CA.

- MORRIS, S.C., *et al.* (1990). "A Least Cost Energy Analysis of U.S. CO₂ Reduction Options". Documento presentado en la conferencia *Energy and the Environment in the 21st Century*, MIT (Marzo 26-28). Cambridge.

- NORDHAUS, W. (1990). *Contribution of Different Greenhouse Gases to Global Warming: A New Technique for Measuring Impact*.
- (1990). "An Intertemporal General-Equilibrium Model of Economic Growth and Climate Change". Documento de trabajo; Seminario de Modelización Medioambiental celebrado en octubre (22-23) de 1990. Universidad de Yale. Washington, D.C.
- (1991). "Economic Approaches to Global Warming". En *Global Warming: Economic Policy Approaches*. Editado por Dornbush, R.D. y Poterba, J.M, pp. 33-68. Cambridge, MA:MIT Press.
- (1993). "Optimal Greenhouse Gas Reductions and Tax Policy in the Dice Model. *American Economic Review Papers and Proceedings*, 83 (2), pp.313-17.
- (1993). "Survey on Uncertainties Associated with Future Climate Change". Universidad de Yale. Mimeo, abril.
- (2002). "After Kyoto: Alternative Mechanisms to Control Global Warming". Yale University.

- PETERSEN, E., BELANGER, S., COHAN, D., DIENER, A., DROZD, J.M., y GJERDE, A. (1992). "The Transition to Reduced Levels of Carbon Emissions". Documento de Trabajo 12.6, Energy Modeling Forum. Stanford, CA.

- WHALLEY, J. y WIGLE, R. (2002). "Cutting CO2 Emissions: The Effects of Alternative Policy Approaches" en *International Trade and Environment*, Judith Dean (ed). Ashgate Publishers.