

CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO₂ EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA

UNA PRIMERA APROXIMACIÓN A LA SITUACIÓN ACTUAL

VICENT ALCÁNTARA ESCOLANO (*)

Departamento de Economía Aplicada.
 Institut de Ciència y Tecnologia
 Ambiental (ICTA).
 Universidad Autónoma de Barcelona.

La firma del Protocolo de Kyoto a finales de 1997 comprometía a los países industrializados (Anexo B del mismo) a limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La Unión Europea (UE) estableció para sus países miembros un reparto de cargas, para cumplir el compromiso, que implicaba una reducción conjunta del 8% respecto de los niveles de 1990

para los seis gases siguientes: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ (dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, hidrofluorcarburos, compuestos perfluorinados y hexafluoruro de azufre). Para España, el Acuerdo de la Presidencia del Consejo de Medio Ambiente de Junio de 1998 permitía un incremento de las emisiones del 15% respecto a los niveles de 1990. Sin embargo, la evolución de las emisiones de GEI en España se ha distanciado notablemente del objetivo marcado por la Directiva Europea. En 2007 las emisiones de los seis gases considerados por el Protocolo fueron un 52,3% superiores a las de 1990 (Santamarta y Rodrigo, 2008) (1), lo que nos aleja considerablemente de los objetivos a alcanzar en 2008-2012.

Resulta evidente que las actuaciones realizadas en los últimos años no han sido suficientes para controlar el fuerte aumento experimentado en las emisiones. Entre las medidas llevadas a cabo, destaca el Plan

Nacional de Asignación de Emisiones, mediante el cual se ha dado cumplimiento a la directiva 2003/87/CE sobre el mercado de derechos de emisión, que obliga a determinados sectores a controlar sus emisiones de CO₂ desde el 1 de enero de 2005. No obstante, uno de los sectores más determinantes en el aumento de las emisiones en los últimos años, el sector servicios, no se ve afectado por la directiva. El transporte, el sector comercial y otros servicios, junto con el sector doméstico, suponen focos emisores difusos que no se ven regulados por ningún tipo de normativa o medida que limite su uso de energía ni sus emisiones (Alcántara y Padilla, en prensa). No existe un texto semejante en el que se desarrolle el mismo análisis. Con todo, podemos ver el comportamiento de las emisiones de CO₂ de la industria española, de forma sintética, en un contexto internacional y sectorial, con el fin de tener un marco de referencia global en el que situar los resultados posteriores. Para ello hemos elaborado el cuadro 1.

CUADRO 1
CRECIMIENTO MEDIO ANUAL ACUMULATIVO DE LAS EMISIONES DE CO₂ (1990-2005)
PORCENTAJES

| | OECD Norte América | OECD Pacífico | OECD Europa | España |
|----------------------------|--------------------|---------------|-------------|--------|
| Energía (sin electricidad) | -0,62 | 0,50 | -0,38 | 0,77 |
| Manufactura y construcción | -1,18 | 0,75 | -1,30 | 1,85 |
| Transporte | 0,42 | 1,38 | 0,95 | 2,93 |
| Carretera | 0,71 | 1,60 | 1,11 | 3,23 |
| Otros Sectores | 0,62 | 2,27 | -0,16 | 3,82 |
| TOTAL | 0,02 | 1,41 | -0,29 | 2,66 |

FUENTE: Agencia Internacional de la Energía (AIE). Base de datos digital OCDE.

La información del cuadro se refiere a emisiones de CO₂, el gas más importante de efecto invernadero, y las emisiones procedentes de la producción de electricidad están imputadas a los sectores consumidores. Resultan palpables las diferencias entre España y el resto de países pertenecientes a la OCDE. Las emisiones han estado creciendo a un ritmo medio anual cercano al 3 %. Sólo la industria y la otra transformación energética han crecido a un ritmo menor. Claramente, el transporte por carretera y los otros sectores –en los que están incluidos los servicios– aparecen como los principales responsables del crecimiento de las emisiones. Aún sin incluir las emisiones indirectas por ellos inducidas si tenemos en cuentas la producción industrial necesaria para su sostén material.

No obstante lo anterior, el sector industrial tampoco parece hacer los deberes, cuando comparamos el crecimiento de sus emisiones con el resto de países de nuestro entorno económico. Un crecimiento medio anual acumulativo del 1,85 % es muy importante si tenemos en cuenta los decrecimientos de los países industrializados de Norte América y Europa, así como el bajo incremento de los del Pacífico.

A la vista de lo anterior, la evolución de las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de energía se convierte en un aspecto relevante tanto para las políticas energéticas como ambientales. En este trabajo se aborda la evolución de las emisiones de dicho gas relacionadas con el consumo de energía por la industria. Para ello, después de plantear esta evolución desde una perspectiva de largo plazo y detectar los aspectos analíticos básicos, examinaremos con más detalle el período de 1990 a 2005, con una mayor relación con los objetivos de Kyoto.

Las fuentes estadísticas utilizadas en este trabajo son: «CO₂ Emissions from fuel combustion», edición 2007 para las emisiones de CO₂, y *Energy Balances of OECD Countries*, edición 2008, ambas disponi-

bles en la base de datos digital Sources OCDE, disponible en www.oecd.org. En cuanto a los datos sobre valor añadido proceden de la base de datos EUKLEMS, disponible en www.euklems.org. Al utilizar únicamente estas dos fuentes de datos no las volveremos a citar a lo largo del trabajo.

LAS EMISIONES DE CO₂: UNA PERSPECTIVA DE LARGO PLAZO ↓

En este apartado se aborda el proceso de desarrollo de la economía española, que se inicia a mediados de la década de los cincuenta del siglo XX, en cuanto a los vínculos existentes entre este proceso de crecimiento y las emisiones de CO₂. Entendemos que el diseño de políticas ambientales y económicas con consecuencias ambientales debe abordarse teniendo en cuenta la experiencia histórica en un doble sentido. Por una parte, porque es una forma de aprender de errores pasados, atendiendo a los hechos acaecidos desde una perspectiva de largo plazo, y, por otra, porque los procesos económicos requieren tiempo y están sujetos, muchas veces, a las inercias del pasado.

Se enfoca el análisis, pues, desde una perspectiva de largo plazo. Ello supone que se encara el problema, en una primera aproximación, desde un punto de vista histórico, abarcando el análisis un lapso temporal que va desde 1971 hasta 2005, último año para el que hay información detallada de las emisiones por ramas industriales.

El punto de partida es una identidad tipo IPAT (2), como la siguiente:

$$C(t) = \frac{C(t)}{E(t)} \times \frac{E(t)}{Y(t)} \times Y(t) \quad [1]$$

En la que C son las emisiones de CO₂ en miles de toneladas (kt) (3); E es el consumo energético secto-

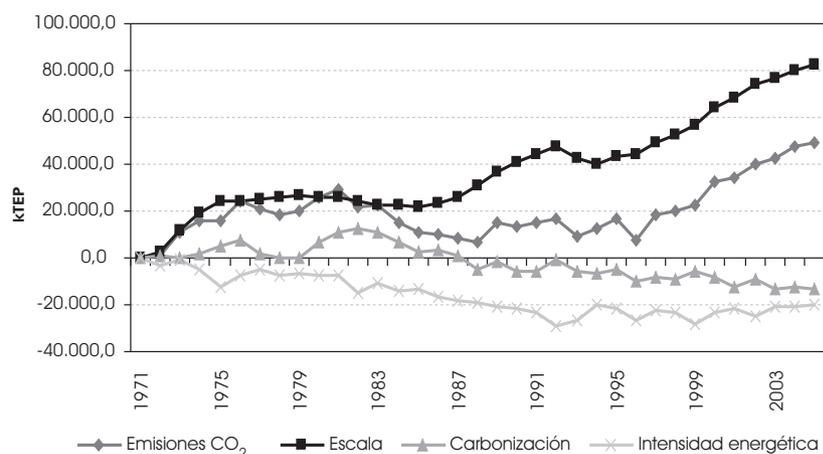


GRÁFICO 1
EVOLUCIÓN
DE LAS EMISIONES DE CO₂
A LARGO PLAZO

kTEP sobre el año
base 1971-2005

FUENTE:
Elaboración propia.

rial medido en miles de toneladas equivalentes de petróleo (kTEP); $Y(t)$ es la producción sectorial, en nuestro caso el valor añadido bruto en millones de euros constantes de 2000 y t es un año cualquiera.

En la expresión anterior, las emisiones contaminantes de un sector, en nuestro caso el industrial, en un momento t se hacen depender cuanto menos de tres factores, un primer factor dado por la relación entre emisiones de CO₂ y energía consumida por el sector y que llamaremos factor de carbonización; un segundo factor dado por la energía consumida por unidad de producto y que llamaremos intensidad energética y del volumen de producción sectorial que no es sino un factor de escala.

A partir de la expresión [1] es posible descomponer la evolución a lo largo del tiempo de las emisiones de CO₂, cuanto menos atendiendo a cada uno de los factores que conforman dicha expresión, y se obtendría utilizando la metodología expuesta en el Apéndice metodológico. De tal manera que

$$ET = EC + EI + EE \quad [2]$$

Siendo ET la variación total en un período de tiempo digamos $(0,t)$ y que llamaremos efecto total; EC es el efecto carbonización y proporciona la variación de las emisiones que corresponden al cambio en este factor; de la misma manera EI es el efecto intensidad y por último el efecto escala.

A partir de la información que proporciona la AIE, hemos operado la descomposición propuesta del crecimiento de las emisiones para el período 1971-2005. En el gráfico 1 se muestra la evolución de la emisión total así como la de los distintos componentes que la conforman.

La variación de cada año sobre 1971 se mide en kTEP, lo que permite leer el gráfico como se hace con los números índice.

Hasta 1981, las emisiones totales son crecientes, a pesar del poco impacto del efecto escala, ello es debido al recurso al carbón ante los altos precios de petróleo y a la nula ganancia en la eficiencia energética, la intensidad de la misma permanece constante hasta ese año. A partir del año 1982, las emisiones decrecerán de forma constante hasta 1988. Ello es debido al proceso de descarbonización que se da hasta estos momentos y a las ganancias de eficiencia en el uso de la energía, puesta de manifiesto por la disminución de las emisiones debido a la disminución de la intensidad energética. Esta disminución de la intensidad se mantiene hasta los primeros años noventa del siglo pasado. Desgraciadamente, entre 1995 y 2000 no se da ninguna disminución y a partir de 2000 encontraremos un repunte significativo de la intensidad energética.

Con el fin de respaldar las afirmaciones anteriores, hemos calculado la variación media de emisiones para el período 1980 a 2005, descomponiendo el mismo en tres etapas significativas, según lo apuntado anteriormente, y en los tres efectos señalados. Los resultados se dan en el cuadro 2 (en página siguiente).

Los resultados muestran el importante papel de la descarbonización en la disminución de las emisiones industriales de CO₂, así como el de la disminución de la intensidad energética. Disminución de la intensidad que se mantiene de forma sostenida hasta 1995, lo que pone de manifiesto las ganancias de eficiencia en el uso de la energía del sector industrial hasta ese año. Estos resultados confirman,

CUADRO 2
DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN MEDIA ANUAL DE LAS EMISIONES

| | Efectos | | | |
|-----------|---------------------------|----------|---------------|-----------------------|
| | Emisiones CO ₂ | Escala | Carbonización | Intensidad energética |
| 1980-1988 | -18.893,0 | 4.841,3 | -12.003,5 | -11.730,8 |
| 1988-1995 | 10.145,5 | 12.708,6 | 87,2 | -2.650,3 |
| 1995-2005 | 32.063,1 | 39.242,8 | -8.648,7 | 1.469,0 |
| 1980-2005 | 932,6 | 2.271,7 | -822,6 | -516,5 |

FUENTE: Elaboración propia.

aunque desde la perspectiva de otra metodología los ya obtenidos en Alcántara y Roca (1995) y (1996).

Preocupante resulta, entonces, el repunte de la intensidad energética que, a partir de 1995, contribuye al incremento de las emisiones. Analizaremos con más detalle en el próximo apartado la cuestión de la intensidad.

EVOLUCIÓN RECIENTE Y SITUACIÓN ACTUAL

El análisis llevado a cabo en el apartado anterior nos ha permitido ver desde una perspectiva de largo, y de forma agregada, los grandes rasgos el comportamiento del sector industrial respecto de las emisiones de CO₂. Sin embargo, de cara al diseño de políticas ambientales encaminadas a la reducción de dichas emisiones conviene, de una parte, abordar un análisis más desagregado que determine el papel jugado por las distintas ramas industriales en el problema que nos ocupa. De otra, redefinir el efecto clave detectado, la intensidad energética, en un sentido más fino, por las razones que a continuación veremos.

La intensidad energética tal como la hemos calculado presenta el problema de no capturar los cambios en la estructura productiva. Si tomamos como proxy de la estructura de la producción sectorial la participación de porcentual de las distintas ramas industriales en el total del sector, es evidente que los cambios en la estructura productiva pueden, de rebote y sin que los sectores productivos hagan ningún esfuerzo para reducir la energía utilizada por unidad de producto, dar lugar a una disminución global de la intensidad energética y, paralelamente, de las emisiones contaminantes vinculadas al consumo energético.

Centraremos nuestro examen ahora en el período que va de 1990 a 2005, y ello por dos razones. La primera se fundamenta en que el año base para las emisiones en el marco de los compromisos de Kyoto es 1990, por tanto conviene retener este año como referencia. No obstante esto, dividiremos el análisis

en dos períodos 1990-1995 y 1995-2005. La segunda se justifica por el despunte de la intensidad energética que comienza a convertirse en problema y hace necesaria la desagregación sectorial en su doble aspecto, redefinición de la intensidad energética y detección en primera instancia de las diferencias entre ramas productivas.

El punto de partida sigue siendo la identidad tipo IPAT, sólo que ahora debe considerarse que el volumen total de emisión es la agregación de las emisiones de cada uno de los sectores en que se divide la estructura productiva. El volumen de emisión en el momento t de un sector cualquiera i vendrá dado por la siguiente expresión:

$$C_i(t) = \frac{C_i(t)}{E_i(t)} \times \frac{E_i(t)}{Y_i(t)} \times \frac{Y_i(t)}{Y(t)} \times Y(t) \quad [3]$$

Esto es, las emisiones de CO₂ de un sector cualquiera dependen de tres factores: del factor de carbonización medio del sector dado por la relación entre emisiones y consumo energético del sector; de su intensidad energética; de su participación en la escala de la producción; y del nivel de actividad global de la economía dado por el volumen total de producción de los sectores considerados. La emisión total debida a la actividad productiva de toda la economía vendrá dada por la agregación de todos los sectores:

$$C(t) = \sum_i \frac{C_i(t)}{E_i(t)} \times \frac{E_i(t)}{Y_i(t)} \times \frac{Y_i(t)}{Y(t)} \times Y(t) \quad [4]$$

A partir de la expresión (4) es posible la descomposición multiplicativa (ver Anexo metodológico) en efectos explicativos de la variación anual de las emisiones. Y se tiene:

$$ET = EC \times EI \times ES \times EA \quad [5]$$

De tal manera que la variación experimentada por las emisiones de CO₂, lo que se llamará efecto total (ET) se explica por los cambios en el factor de car-

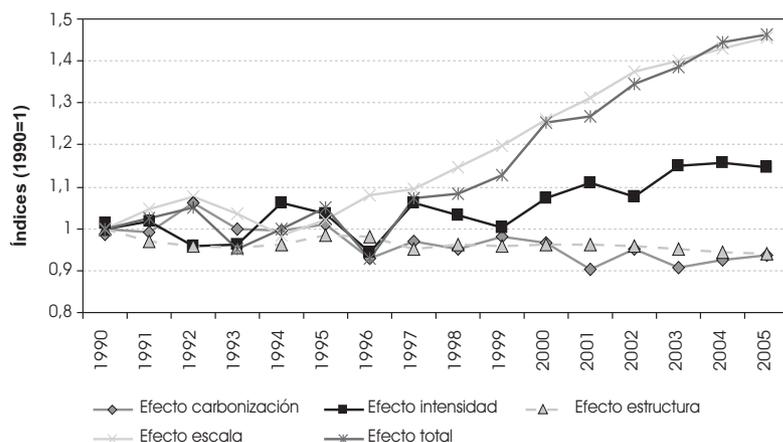


GRÁFICO 2
DESCOMPOSICIÓN DEL CRECIMIENTO DE LAS EMISIONES INDUSTRIALES DE CO₂

1990-2005

FUENTE:
Elaboración propia.

CUADRO 3
DESCOMPOSICIÓN MULTIPLICATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES INDUSTRIALES DE CO₂
ÍNDICES BASE 1990 = 1

| | Efectos explicativos | | | | | Total |
|------|----------------------|------------|------------|--------|--|-------|
| | Carbonización | Intensidad | Estructura | Escala | | |
| 1990 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | 1,000 |
| 1991 | 0,993 | 1,019 | 0,969 | 1,046 | | 1,026 |
| 1992 | 1,060 | 0,958 | 0,960 | 1,078 | | 1,051 |
| 1993 | 0,999 | 0,962 | 0,953 | 1,036 | | 0,950 |
| 1994 | 0,994 | 1,060 | 0,963 | 0,985 | | 0,999 |
| 1995 | 1,009 | 1,034 | 0,985 | 1,020 | | 1,049 |
| 1996 | 0,929 | 0,943 | 0,980 | 1,082 | | 0,928 |
| 1997 | 0,969 | 1,060 | 0,953 | 1,095 | | 1,072 |
| 1998 | 0,952 | 1,033 | 0,963 | 1,147 | | 1,085 |
| 1999 | 0,980 | 1,001 | 0,958 | 1,199 | | 1,128 |
| 2000 | 0,966 | 1,071 | 0,963 | 1,259 | | 1,253 |
| 2001 | 0,905 | 1,111 | 0,961 | 1,314 | | 1,269 |
| 2002 | 0,949 | 1,076 | 0,957 | 1,377 | | 1,347 |
| 2003 | 0,907 | 1,149 | 0,950 | 1,399 | | 1,386 |
| 2004 | 0,927 | 1,158 | 0,943 | 1,429 | | 1,446 |
| 2005 | 0,935 | 1,147 | 0,939 | 1,455 | | 1,465 |

FUENTE: Elaboración propia.

bonización medio de todos los sectores, que se denominará como antes efecto carbonización (EC); de la eficiencia en el uso sectorial de la energía, que puede considerarse como efecto eficiencia energética o, simplemente, efecto intensidad (EI); por los cambios experimentados por la estructura productiva o efecto estructura (ES); y por la escala de la producción (EA). Conviene notar que el concepto de eficiencia energética es un efecto que podría calificarse de puro, es decir, que se obtiene a estructura constante. Este efecto es, ahora, más significativo que el utilizado en el apartado anterior, ya que el concepto de eficiencia energética que se

utilizaba, era un concepto de eficiencia bruta, muy influenciado por la estructura productiva de la sociedad. De ahí el papel que otorgamos al nuevo efecto estructura introducido ahora en el análisis.

Los resultados obtenidos para la descomposición propuesta se reflejan en el cuadro 3.

Como se puede apreciar, en la réplica gráfica del cuadro en el gráfico 2, entre 1990 y 1995 apenas si se contemplan cambios sustanciales. Aunque aún se hace visible un papel algo favorable de la intensidad energética en la ralentización de las emisiones.

CUADRO 4
VARIACIÓN MEDIA ANUAL DE LOS ÍNDICES

| | Efectos explicativos | | | | Total |
|-----------|----------------------|------------|------------|--------|-------|
| | Carbonización | Intensidad | Estructura | Escala | |
| 1990-1995 | 0,18 | 0,68 | -0,29 | 0,41 | 0,98 |
| 1995-2000 | -0,87 | 0,74 | -0,46 | 4,78 | 4,19 |
| 2000-2005 | -0,60 | 1,52 | -0,48 | 3,91 | 4,34 |
| 1990-2005 | -0,43 | 0,98 | -0,41 | 3,03 | 3,17 |

FUENTE Tabla 3 y elaboración propia.

CUADRO 5
VARIACIÓN DE EFECTOS 1995-2005. PORCENTAJE

| | Intensidad | Carbonización | Estructura |
|------------------------------|------------|---------------|------------|
| Equipo de transporte | -13,7 | 0,1 | 14,6 |
| Metalurgia básica | -12,0 | -8,5 | 3,4 |
| Otras industrias | -2,2 | 90,1 | 4,2 |
| Extractivas no energéticas | 0,8 | -17,6 | 23,3 |
| Sector Industrial | 6,8 | -8,5 | 0,0 |
| Textil, cuero y calzado | 7,9 | 0,4 | -35,6 |
| Química y petroquímica | 9,3 | -10,2 | -15,2 |
| Minerales no metálicos | 24,9 | -11,3 | 0,5 |
| Papel, pasta y edición | 32,0 | -23,1 | -6,4 |
| Maquinaria | 34,8 | -14,2 | 3,6 |
| Alimentación, bebidas y tab. | 41,4 | -12,7 | -30,2 |
| Construcción | 44,8 | -24,1 | 18,6 |
| Madera y sus productos | 273,7 | -58,8 | -7,7 |

FUENTE: Elaboración propia.

Es a partir de 1995, y sobre todo desde finales de los años 90, cuando el proceso descarbonizador y los cambios en la estructura productiva juegan a favor de la disminución de emisiones, que no es suficiente para compensar el impacto del crecimiento de la intensidad energética y, no digamos, del efecto escala. Nótese que, a partir del 2000, el efecto total y el efecto escala discurren prácticamente juntos. Si tenemos en cuenta que el incremento de la producción lo que genera es un efecto, digamos, teórico sobre la emisión por unidad producida del año anterior, si no operan adecuadamente el resto de factores, la diferencia entre efecto escala y el efecto total será nula o casi nula, lo que indica que no se está produciendo ningún ahorro de emisiones (Sun, 1999).

Para disponer de algún orden de magnitud, hemos determinado la variación media anual de cada uno de los índices, y que reflejamos en el cuadro 4.

Dada la naturaleza del índice, la determinación de la tasa de crecimiento medio anual del efecto total, descompuesta en los cuatro factores explicativos, es inmediata, tal como muestra la tabla. Los resultados

no vienen sino a confirmar lo expuesto con anterioridad. El ahorro, por así decir, de emisiones ha dependido casi de forma exclusiva de los cambios en la estructura productiva y del proceso de descarbonización que se inicia en 1995. Por el contrario las pérdidas de eficiencia energética, puestas de manifiesto en el crecimiento de la intensidad en el uso de la energía, efecto intensidad, han hecho perder parte del esfuerzo realizado desde la perspectiva de los otros dos efectos explicativos, dando lugar a una trayectoria creciente de las emisiones totales (efecto total).

No podemos dejar de plantearnos, ahora y aún de un modo muy general, el comportamiento de las distintas ramas productivas. Para ello tendremos en cuenta el factor de carbonización, la intensidad energética y la participación porcentual en la estructura del sector. Abordaremos la descripción viendo el porcentaje de variación de estos factores para el período 1995 a 2000, que hemos visto era el más relevante. Estas variaciones se reflejan en el cuadro 5.

Las ramas productivas, en el cuadro, se han ordenado de menor a mayor variación de la intensidad

energética, ya que hemos considerado este factor como clave en la variación de las emisiones de CO₂ del sector industrial. Como es palpable, sólo tres sectores han disminuido su intensidad energética a lo largo del lapso de tiempo considerado, Equipo de transporte, Metalurgia básica y Otras industrias. Sin embargo, sólo de la Metalurgia básica podemos afirmar que tiene un comportamiento amigable, digamos, con el medio ambiente. Aunque con un mínimo incremento de la intensidad, un 0,8 %, muy inferior a la media del sistema industrial, 6,8 %, el gran esfuerzo en la descarbonización es el de las industrias Extractivas no energéticas.

Por lo que se refiere a las ramas industriales cuya intensidad energética ha crecido más que la media, observamos que Textil, cuero y calzado tiene un incremento tanto de la intensidad como del factor de carbonización, sin embargo, su peso en la estructura productiva ha disminuido considerablemente. La rama de la Química y petroquímica, sufre un incremento en su intensidad energética que es compensado por la disminución de su factor de carbonización y por su pérdida de peso en la estructura productiva. Para el resto de ramas la disminución del factor de carbonización, que se da en todas, compensa el incremento de su intensidad energética. Un incremento no muy grande de la intensidad energética puede ser el resultado de una sustitución de combustibles que paralelamente alienten una disminución sustancial del factor de carbonización, y ello es positivo. Un análisis de la sustitución no cabe en el marco de estas páginas, pero si se aborda un análisis detallado de los cambios en la intensidad energética de las distintas ramas productivas ese aspecto hay que considerarlo relevante. Lo único un tanto positivo de este panorama es que para el sector, como un todo, el factor de carbonización creció algo más que la intensidad energética, pero ya vimos con anterioridad que esto no es suficiente para compensar el crecimiento de la escala de la producción.

CONCLUSIÓN

El análisis anterior pone de manifiesto dos cuestiones importantes. Por una parte, no parece que el derrotero seguido por la industria española conduzca a una situación de desconexión o sustentabilidad fuerte, lo que supondría un descenso en términos absolutos de las emisiones de CO₂. Y ni mucho menos se verán cumplidos los compromisos de Kyoto.

Una de las cuestiones más delicadas que ha puesto de manifiesto el examen realizado es el repuntar de la intensidad energética. Esta cuestión que pare-

cía superada, al menos para el sector industrial, como hemos puesto de manifiesto en nuestros trabajos citados, nos debería impulsar a desarrollar análisis más exhaustivos y detallados. Este aspecto del problema no es sólo relevante desde una perspectiva ambiental. Las pérdidas de eficiencia en el uso de la energía, puestas de manifiesto por nuestro trabajo, y que se plasman en un incremento de la intensidad energética tienen, además, un claro coste monetario.

Somos conscientes de que la metodología tiene limitaciones importantes al olvidar una serie de interrelaciones, como es el uso de inputs industriales (cuya producción y transporte requieren energía) por parte de los sectores energéticos. Otras limitaciones vendrían impuestas por el grado de calidad y nivel de desagregación proporcionada por las fuentes utilizadas. Sin embargo, a pesar de todas estas limitaciones, creemos que nuestras estimaciones dan una aproximación (de hecho una infravaloración) de los impactos en las emisiones de gases de efecto invernadero, a partir del uso energético requerido para su actividad. No obstante, la aproximación dada en estas páginas permite, al menos, perfilar la marcha del problema y, al mismo tiempo, mostrar algunos objetivos de futuras investigaciones sobre el consumo energético del sector industrial encaminadas a reforzar el diseño de políticas conducentes a un mayor grado de sostenibilidad.

(*) El autor agradece el soporte financiero del proyecto 2005SGR-177 y de la XREPP (Direcció General de Recerca). Así como al proyecto SEJ2006-4444 (Ministerio de Ciencia y Tecnología).

NOTAS

- [1] Emisiones medidas en toneladas de CO₂-equivalente, empleando los factores de conversión del IPCC. Los seis gases considerados son CO₂, N₂O, CH₄, HFCs, CFCs, y SF₆.
- [2] Las descomposiciones tipo IPAT parten de una identidad que expresa una variable como producto de otras. Al tratarse de una identidad, lo que da sentido al análisis es la descomposición del crecimiento de la variable explicada en función de las otras variables explicativas. Las descomposiciones tipo IPAT hacen depender el impacto ambiental de la tecnología, la afluencia de bienes a la sociedad y de la población como factor de escala. No obstante, se conocen como identidades tipo IPAT todas aquellas dirigidas al análisis ambiental que tienen en cuenta algunos factores de tipo tecnológico y de impacto unitario y un factor de escala, normalmente la producción. Para más detalles y discusiones ver: Commoner, B. (1995) y Roca, J. (2002).
- [3] Las emisiones de CO₂ incorporan las realizadas en el proceso de obtención de la energía eléctrica consumida por las ramas productivas que constituyen el sector industrial.

ANEXO METODOLÓGICO

El problema de la descomposición de la evolución de una variable en efectos explicativos no es nuevo. En realidad, como ha señalado Ang (1999), el problema es similar al de los números índices en economía. Törnqvist (1935) ya se planteaba este problema hace bastantes años y fue retomado nuevamente por Törnqvist *et al.* (1985), planteando cuestiones relativas a problemas que nada tenían que ver con los problemas energéticos y los impactos ambientales. A partir de los primeros años de la década de los ochenta, la descomposición en factores fue ampliamente desarrollada en el análisis de la demanda industrial de energía, y, más recientemente, por la necesidad de disponer de instrumentos de diagnóstico en los problemas relativos a las emisiones contaminantes en general, y de las emisiones de CO₂ en particular. Desde una perspectiva metodológica, el lector debe considerar esta técnica analítica como un problema de análisis de números índices, no comparable a instrumentales más potentes como, por ejemplo, el análisis de descomposición estructural input-output.

Una buena síntesis de los métodos de descomposición se encuentra en el trabajo citado de Ang. Una discusión matemática rigurosa se encuentra en Liu y Ang (2003) y Choi y Ang (2003). Se ha optado por la metodología más oportuna para los objetivos del presente trabajo.

Descomposición aditiva

Partiendo de la expresión del texto,

$$C(t) = \frac{C(t)}{E(t)} \times \frac{E(t)}{Y(t)} \times Y(t) \quad (1)$$

y con el fin de simplificar las expresiones, sea

$$c_t = \frac{C(t)}{E(t)}; e_t = \frac{E(t)}{Y(t)}; Y(t)$$

La expresión (1) puede volverse a escribir como sigue:

$$C_t = c_t \times e_t \times Y_t \quad (2)$$

El incremento anual de las emisiones de CO₂ (C_t) se puede descomponer de la siguiente forma:

$$\Delta C_t = w_t \ln \frac{c_t}{c_{t-1}} + w_t \ln \frac{e_t}{e_{t-1}} + w_t \ln \frac{Y_t}{Y_{t-1}} \quad (3)$$

Si se tiene en cuenta que

$$w_t = \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln(C_t / C_{t-1})} \quad (4)$$

No es difícil demostrar que la descomposición planteada no es sino la parte de la variación atribuible a cada factor atendiendo al peso que su tasa de crecimiento instantáneo tiene sobre la de las emisiones totales.

Si $t = 0$ para el año que se toma como base (en el texto, 1971) la variación anual sobre el año base en kt de CO₂ sería:

$$ET = EC + EI + EE \quad (5)$$

Descomposición multiplicativa

En el caso de la siguiente expresión (4) del texto, operaremos una descomposición multiplicativa. El método es una adaptación del propuesto por Ang y Liu (2001) para nuestro caso de estudio.

$$C(t) = \sum_i \frac{C_i(t)}{E_i(t)} \times \frac{E_i(t)}{Y_i(t)} \times \frac{Y_i(t)}{Y(t)} \times Y(t) \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ sectores

Si, para simplificar, se operan los siguientes cambios:

$$c_{i,t} = \frac{C_i(t)}{E_i(t)}; e_{i,t} = \frac{E_i(t)}{Y_i(t)}; y_{i,t} = \frac{Y_i(t)}{Y(t)}$$

La expresión (6) puede ser rescrita como sigue:

$$C_t = \sum_i C_{it} = \sum_i c_{it} \times e_{it} \times y_{it} \times Y_t \quad (7)$$

El índice de variación anual sobre un año base, en nuestro caso 1990, de las emisiones puede ser descompuesto de forma multiplicativa como sigue:

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp\left(\sum_i w_{it}^* \ln \frac{c_{it}}{c_{i0}}\right) \times \exp\left(\sum_i w_{it}^* \ln \frac{e_{it}}{e_{i0}}\right) \times \exp\left(\sum_i w_{it}^* \ln \frac{y_{it}}{y_{i0}}\right) \times \exp\left(\sum_i w_{it}^* \ln \frac{Y_t}{Y_0}\right)$$

Expresión en la que

$$w_{it}^* = \frac{L(C_{i0}, C_{it})}{L(C_0, C_t)} = \frac{(C_{it} - C_{i0}) / \ln(C_{it} / C_{i0})}{(C_t - C_0) / \ln(C_t / C_0)}$$

Es un factor de ponderación que permite una descomposición perfecta y consistente con la agregación.

BIBLIOGRAFÍA

ALCÁNTARA, V. y PADILLA, E.: «Input-output subsystems and pollution: An application to the service sector and CO₂ emissions in Spain», *Ecological Economics*, volume 68, Issue 3, January 2009, pp. 905-914.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.07.010>

ALCÁNTARA, V. y ROCA, J. (1995): «Energy and CO₂ emissions in Spain. Methodology of analysis and some results for 1980-1990», *Energy Economics*, 17 (3), pp. 221-230.

ALCÁNTARA, V. y ROCA, J. (1996): «Tendencias en el uso de energía en España (1975-1990). Un análisis a partir de los balances energéticos», *Economía Industrial*, pp. 161-67.

ANG, B. W. (1999): «Decomposition methodology in energy demand and environmental analysis», en Jeroen C.J.M: van den Bergh, *Handbook of Environmental and Resources Economics*, Edward Elgar, Chentelham, UK. pp. 1146- 1163.

ANG, B.W. y Liu, F.L. (2001): «A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation», *Energy*, 26, pp. 537-548.

CHOI, KI-H y ANG, B.W. (2003): «Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference», *Energy Economics*, 25, 615-624.

COMMONER, B. (1995): *En paz con el planeta*, Ed. Crítica, Barcelona.

LIU, F. L. y ANG, B.W. (2003): «Eight methods for decomposing the aggregate energy-intensity of industry», *Applied Energy*, 76, 15-23

ROCA, J. (2002): «The IPAT formula and its limitations», *Ecological Economics*, vol. 42/1.

SANTAMARTA, J. y RODRIGO, F. (2008): *Evolución de las emisiones de GEI en España (1990-2007)*, Confederación Sindical de CC.OO. Departamento de Medio Ambiente.

TÖRNQVIST, L. (1935): «A memorando concerning the calculation of Bank of Finland consumption price index» citado por Ang (1999)

TÖRNQVIST, L., VARTIA, P. y VARTIA, Y. (1985): «How should relative changes be measured?», *The American Statistician*, 39 (1), pp. 43-46

