
INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA: UNA PERSPECTIVA INTEGRADA.

.....
JESÚS RAMOS-MARTÍN (*)

Istituto Nazionale di Ricerca per gli Alimenti e la Nutrizione. Roma

RECIENTEMENTE, EL TEMA DE LA DESMATERIALIZACIÓN DE LAS ECONOMÍAS DESARROLLADAS, O LA REDUCCIÓN DE LA INTENSIDAD MATERIAL DE LA PRODUCCIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO, HA GANADO POPULARIDAD EN EL ÁMBITO DE

59

la economía ambiental y ecológica. Por ejemplo, la hipótesis de que un menor uso de energía y recursos en la producción de un determinado nivel de valor añadido podría representar una solución a la compatibilidad ecológica del crecimiento económico futuro fue discutido en un número especial de la revista *Ecological Economics* dedicado a la llamada Curva de Kuznets Ambiental (vol. 25, 1998). Esta idea ha sido defendida fundamentalmente por una serie de «optimistas tecnológicos» que vienen en su mayoría de la *Ecología Industrial* (Von Weizsäcker *et al.*, 1997).

Es interesante notar cómo esta aproximación al análisis de la actividad productiva desde una perspectiva biofísica por medio del análisis de flujos de energía y materiales no hace más que recuperar parte del pensamiento clásico, que ya puso énfasis en los condicionantes de la producción. Esta nueva perspectiva rompe, sin duda, con un análisis económico que últimamente se ha venido centrando, en exclusiva, en el funcionamiento de los mercados y en el comportamiento de los actores.

En nuestro país esta tendencia al análisis biofísico ha tenido precursores como Na-

redo y Campos (1980), que analizaron los flujos energéticos ligados a la agricultura española, y que han continuado otros, como Naredo y Gasco (1992), para el caso de las cuentas del agua. Es de destacar, no obstante, cómo ha surgido, en especial para el análisis de los flujos de materiales, lo que podríamos llamar una «escuela española», que vendría representada por Carpintero (2002) y por Arto (2002), quienes presentan, asimismo, unos excelentes trabajos en este número. Mi contribución aquí se centra, sin embargo, en los flujos de energía de la economía española a lo largo del tiempo y

su relación con el proceso de desarrollo económico.

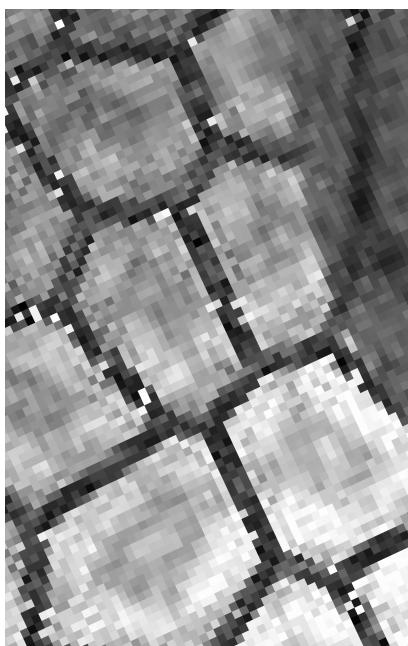
La llamada hipótesis de «la intensidad de uso» fue introducida por Malenbaum (1978) y establece que el nivel de ingreso es el principal factor que explica el consumo de materiales. Esto es, durante el proceso de desarrollo económico los países tenderían a aumentar el consumo de energía y materiales al mismo ritmo que el crecimiento en el nivel de renta, hasta que se alcanzase un determinado nivel.

A partir de entonces, sin embargo, sería esperable un proceso de desacoplamiento entre crecimiento económico y consumo de materiales. Esto provocaría que ulteriores crecimientos en el nivel de producción no conllevaran un aumento en el consumo de energía y materiales a la misma tasa. Esta hipótesis se conoce como la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) o la curva en forma de U invertida.

De acuerdo con esta hipótesis, los países desarrollados deberían estar desmaterializándose —necesitando cada vez menos cantidad de materiales *por unidad de producción*—, porque ya habrían alcanzado ese umbral de ingreso (o el pico en las series históricas). Por el contrario, los países en desarrollo estarían todavía inmersos en una fase de materialización.

Sin embargo, se dan una serie de problemas con los estudios que apoyan esta hipótesis, que serán discutidos más abajo. En concreto, los resultados se basan en la utilización del supuesto de *ceteris paribus* aplicado a series históricas, y por tanto se hace muy difícil generalizar, especialmente hacia el futuro. Es decir, no se está teniendo en cuenta la llamada Paradoja de Jevons (Jevons, 1990), que relativiza la importancia de las mejoras en la eficiencia energética para reducir el consumo total de energía.

Por otro lado, una reducción del consumo de recursos por unidad de producto no implica necesariamente una reducción en términos absolutos. Esto es importante dado que, de hecho, el posible impacto ambiental derivado del consumo de energía y materiales vendrá determinado por los niveles *absolutos* de consumo. Por último, la mayoría de estudios no han tenido en cuenta que el factor



«tiempo» es relevante a la hora de cambiar el impacto de una sociedad a través del consumo de energía y materiales. Por todo ello, se presenta aquí un análisis integrado de la intensidad energética que nos permite generar descripciones no equivalentes de la evolución de la intensidad energética.

La discusión sobre la desmaterialización es especialmente relevante dado que se piensa que la Curva de Kuznets Ambiental puede relacionar el impacto ambiental (como, por ejemplo, los requerimientos de energía para la economía y la contaminación resultante en forma de CO₂) con una medida de generación de bienestar material como es el PIB.

En el siguiente análisis se considerará el proceso económico como la producción y consumo de bienes y servicios a través de la transformación de energía y materiales. Daly (1991, 36) ha llamado a esta transformación el transflujo. Es decir, el flujo físico entrópico de materia y energía proveniente de fuentes naturales hacia la economía, que es transformado en su seno, y que es devuelto a la naturaleza en forma de residuos. Este flujo puede llamarse también el «flujo metabólico» de una sociedad, en terminología de Georgescu-Roegen (1971). De ahí que recientemente se hable de «metabolismo social» (Martinez-Alier, 1987; Fischer-Kowalski, 1997).

El análisis presentado aquí sobre la evolución de la intensidad energética en España se basa en la simplificación de considerar el nivel de transflujo de un país como un indicador de su impacto ambiental. La falta de datos detallados sobre diferentes tipos de contaminantes y su localización específica no nos permite la posibilidad de realizar, en paralelo, diferentes estudios para comprobar los cambios en diferentes transflujos materiales ligados a esos contaminantes.

Ésta es la razón por la que, en general, se utilizan datos sobre el consumo de energía y materiales como variable aproximada de la consiguiente salida de residuos. Es decir, se usan evaluaciones del lado de los insumos del transflujo como indicadores de impacto ambiental.

La mayoría de los estudios sobre la intensidad de uso asumen una relación lineal entre la evolución del PIB y el transflujo biofísico. Tal y como se ha mencionado antes, la mayoría de estos estudios muestra, por un lado, un transflujo creciente asociado al crecimiento del PIB en las fases iniciales del desarrollo, y, por otro, un crecimiento del transflujo cada vez menor en relación con el crecimiento del PIB para los principales países desarrollados (la llamada fase de desmaterialización).

No obstante, la evidencia del caso alemán (De Bruyn, 1999) muestra que a veces esta relación no es continua, sino que presenta determinados saltos. Este comportamiento ha sido ya comprobado para el caso de la economía española (Ramos-Martín, 1999, 2001), en donde se observó con claridad la falta de continuidad de la variable intensidad energética a lo largo del tiempo, sugiriendo, por tanto, la validez de la aplicación de la teoría del «equilibrio puntuado» (Eldridge y Gould, 1972) al caso de los sistemas económicos (Gowdy, 1994).

La novedad de lo presentado aquí, sin embargo, se corresponde con una evaluación integrada de las tasas de metabolismo exosomático (1) de varios compartimentos (o sectores) de la economía española, con el fin de caracterizar su desarrollo económico y su metabolismo energético. El modelo usado ha sido presentado en Giampietro y Mayumi (2000a, 2000b), y ha sido utilizado por Falconi

nación no reflejan necesariamente el estrés ecológico inducido por las economías modernas. Si éste es el caso, la CKA simplemente «no ve» lo que está sucediendo en la realidad.

La segunda explicación es similar, dado que se trata, de nuevo, de una mala representación del fenómeno al usar la CKA. Cada vez más, a lo largo de las últimas décadas una fracción determinada de la actividad económica requerida para el mantenimiento del metabolismo social de los países desarrollados, especialmente aquella que es intensiva en energía y recursos, se ha trasladado hacia los países en desarrollo.

En este caso, las hipotéticas fases de desmaterialización del Norte sólo serían una externalización de la fase de posible rematerialización del proceso económico, conllevando a su vez el desplazamiento del impacto ambiental ligado a la producción a los países en desarrollo. En otras palabras, no estaríamos ante un proceso real de desmaterialización, sino más bien ante un resultado derivado de una especie de «mentira epistemológica». Los daños al ambiente que se deben a la «externalización de la actividad económica» no aparecerían al realizar nuestro análisis al nivel del Estado.

En conclusión, incluso admitiendo que algunos países se encuentran en una fase de desmaterialización (como muestran Jänicke *et al.*, 1989), el debate completo acerca de la desmaterialización puede ser estéril si hacemos caso a los resultados obtenidos por De Bruyn y Opschoor (1997). Ellos nos muestran como algunos países se encuentran, de hecho, en una fase de rematerialización que sigue a una anterior de desmaterialización. Esta «hipótesis del reacoplamiento» implica que una inversión de tendencia siempre es posible, incluyendo a aquellos países que se puedan encontrar en la actualidad en una fase de desmaterialización.

De acuerdo con esta hipótesis, la curva del transflujo *versus* el PIB *per cápita* no seguiría la forma de una U invertida, sino más bien la forma de una N (dependiendo del intervalo de tiempo que analicemos).

Esta nueva hipótesis implica, por tanto, la existencia de tres fases: 1) El uso de

recursos crece de forma paralela al crecimiento de la renta. 2) Esta fase de capitalización de la economía viene seguida de una reducción en la tasa de rematerialización, en la cual el mayor aumento en la producción ocurre en el sector de los servicios. 3) En este punto, una nueva fase de materialización puede comenzar en cualquier momento, por ejemplo, al introducir nuevas actividades en el proceso económico. Esta fase suele continuar hasta que nuevas innovaciones tecnológicas permitan un nuevo desacoplamiento (aumento en la eficiencia de las nuevas actividades).

DATOS EMPÍRICOS DEL CAMBIO EN LA INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA

El análisis basado en el marco teórico de la anterior sección sólo refleja la relación entre el PIB y el consumo de energía comercial, considerado como una variable aproximada de un indicador intensivo del transflujo de la economía. La variable «intensidad energética» se define, pues, como la división entre la Oferta Total de Energía Primaria (2) entre el PIB, y se expresa en megajulios por dólar de PIB en valor constante de 1995 (MJ/US95\$).

Cuando representamos esta variable para la economía española (gráfico 1), observamos que la misma ofrece un continuo crecimiento en el horizonte temporal definido en nuestro estudio, en contra del comportamiento de otras economías desarrolladas de la OECD (Ramos-Martín, 2001).

Hay dos aspectos del gráfico 1 que merecen atención. El primero es que, sin lugar a dudas, la economía española está aumentando la intensidad energética a lo largo del tiempo. En segundo lugar, esta tendencia no es continua. De hecho, podemos observar cómo la intensidad energética aumentó muy rápidamente de 1963 a 1981 (de 4,21 a 6,96 MJ/US95\$), permaneciendo alrededor del valor de 7 MJ/US95\$, con ligeros altibajos, hasta 2001, año en el que la variable tomó el valor de 7,20 MJ/US95\$.

Por lo tanto, de acuerdo con el gráfico 1, podemos decir que España no sigue la

hipótesis de la curva en forma de U invertida. No obstante, alguien podría argumentar que esto se debe al hecho de que España no ha alcanzado todavía, pero lo hará en el futuro, el punto de inflexión a partir del cual se produciría la desmaterialización. Esta observación no tiene lugar para el caso de España.

Tal y como muestran Unruh y Moomaw (1998, 225), la mayoría de países desarrollados que siguen la CKA muestran su «año pico» o punto de inflexión durante la década de los setenta. El año que marca el cambio suele venir ligado a valores del PIB *per cápita* que se encuentran entre los 9.000 US\$ (con Austria en el nivel bajo) y los 15.000 US\$ (con Estados Unidos en el lado de renta alta). La mayoría de los países, no obstante, se encuentran en un valor en torno a 11.000 dólares *per cápita*.

España, que está lejos de ser una economía que se base tanto en el consumo de energía como Estados Unidos o Canadá, debería mostrar un comportamiento más parecido al de Austria. Sin embargo, todavía mostraba un crecimiento en la intensidad energética el año 2001, tras haber superado ya los 18.000 dólares *per cápita* de renta. Por tanto, si la CKA funcionara para el caso de España, debería haber mostrado signos de desmaterialización mucho antes.

POSIBLES EXPLICACIONES DE ESTOS CAMBIOS BASADAS EN LAS TRANSFORMACIONES ECONÓMICAS

Algunos autores (Simonis, 1989; Jänicke *et al.*, 1989, citado en De Bruyn y Opschoor, 1997) afirman que el cambio tecnológico e institucional, o, genéricamente, el «cambio estructural» (que incluye cambios en los patrones de consumo), es la principal causa de la evolución de la intensidad energética. Este hecho puede explicar que tras la crisis del petróleo de principios de los setenta la intensidad energética en España creciera en lugar de disminuir, como lo hacía en otros países desarrollados.

En aquella ocasión, el gobierno español, siguiendo los dictados del FMI, compen-

INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA...

só el aumento de precios con subvenciones, lo cual pospuso la adaptación de la economía a una nueva situación mundial de precios elevados. Sin embargo, tras la segunda crisis de finales de los setenta, la intensidad de algunos sectores económicos finalmente decreció, debido a dos motivos: 1) El gobierno no usó de nuevo las subvenciones y dejó que subieran los precios. Esto hizo que la energía, como factor de producción, se encareciera no sólo en términos absolutos, sino también en términos relativos, en comparación con otros factores como el capital o el trabajo. Así, la mayoría de las industrias se adaptaron a la nueva situación y mejoraron la eficiencia a la vez que cambiaron su composición de combustibles. 2) Se produjo una profunda reconversión industrial, que empezó a principios de los años ochenta, y que implicó el cierre de numerosas fábricas de corte tradicional, con altos niveles de consumo de energía, como astilleros y fundiciones.

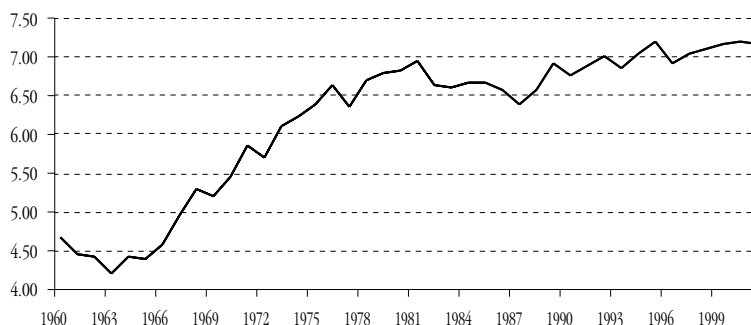
Éste es el principal factor que parece explicar los cambios en el caso español. Es decir, descensos locales de la variable «intensidad energética» estaban reflejando cambios estructurales (como la reestructuración sectorial mencionada antes) más que un cambio suave en la tendencia y en la evolución de la variable intensidad energética.

De hecho, tal y como se muestra en Ramos-Martin (2001), la variable permaneció más o menos estable, desde 1960, en el sector de la agricultura y la construcción (aunque hayan perdido peso relativo en la composición del PIB), mientras que el sector industrial, que también ha perdido peso en porcentaje de PIB, mantuvo una tendencia descendente en la intensidad energética.

No obstante, los sectores de servicios, el energético y el transporte han mostrado tendencias crecientes en sus intensidades energéticas, así como un mayor peso relativo en la composición del PIB, lo que explica que, a pesar de la buena evolución del sector industrial, la intensidad energética de la economía en su conjunto haya continuado aumentando cada año.

Finalmente, una explicación adicional de la peculiar evolución de la intensidad energética en España es el hecho de que

GRÁFICO 1
INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA
MEGAJULIOS/DÓLARES USA



FUENTE: Elaboración propia.

el país parece no haber transferido todavía muchas de las industrias intensivas en el consumo de energía y materiales hacia los países en desarrollo, en contra de lo que otros países de nuestro entorno, y que siguen la CKA, han hecho. No obstante, para poder comprobar esta última hipótesis, deberíamos disponer de datos en cantidades acerca del comercio internacional y del consumo interno, algo que está empezando a hacerse, como demuestran los artículos de Carpintero y de Arto en este número.

UN ANÁLISIS EVOLUTIVO BASADO EN LOS DIAGRAMAS DE FASES

La hipótesis de la desmaterialización considera las implicaciones del principio físico de la conservación de la energía, pero parece ignorar las implicaciones de otras características de los sistemas complejos adaptativos, a los cuales la sociedad humana pertenece. Para una explicación más detallada de cómo podemos entender a las economías como sistemas complejos, véase Ramos-Martin (2003).

Resumiendo, se puede ver a la sociedad humana (y a sus subsistemas) como sistemas complejos adaptativos (Giampietro, 1997, 83), así como sistemas jerárquicos, en los que cada elemento que los compone opera en una escala espacio-temporal diferente. Por ejemplo, los cambios en la identidad cultural, los institucionales, el tecnológico y los cambios en las preferencias individuales ocurren en paralelo, pero con diferentes frecuencias.

Esto implica que cuando presentamos escenarios futuros reflejando cambios que se están dando en la actualidad deberíamos basar nuestro análisis no en la aplicación de la cláusula *ceteris paribus*, sino en las características que nos reflejan la naturaleza evolutiva del sistema considerado. Esto es muy importante, dado que los estudios que predicen estados de desmaterialización están basados en la extrapolación hacia el futuro de series históricas pasadas.

Antes de utilizar este tipo de análisis para recomendar políticas para el futuro, uno debería comprobar si puede esperarse que los patrones que han ocurrido en el pasado (p. ej., trayectorias pasadas de desmaterialización) puedan repetirse en el futuro o no. Esto implica entender cuál es la escala temporal apropiada que debe usarse para reconocer la existencia de esos patrones y poder, así, extrapolar o no hacia el futuro.

Tal y como ya mencionó hace medio siglo Schumpeter (1949, 58) «no es posible explicar el cambio económico únicamente mediante las condiciones económicas previas» (énfasis en el original). Un factor que apoya esta precaución ante esta extrapolación es el hecho de que una mayor eficiencia en el uso de recursos implica un procesamiento de la información y el conocimiento más rápido. Esto conduce, entonces, a un potencial agotamiento de los recursos más rápido, debido a la mayor actividad generada (más consumo de energía para alimentar un conjunto amplio de actividades).

Este resultado es la llamada paradoja de Jevons (1990) (también llamada «efecto rebote», o postulado «Khazzoom-Brookes»), quien afirma que un aumento en la eficiencia en el uso de un recurso conduce, en el largo plazo, a un aumento en el uso del recurso en lugar de a una reducción (Giampietro y Mayumi, 2000). En el caso de la energía, implica que una política de promoción de la eficiencia energética en el nivel micro (agentes económicos individuales) puede aumentar el consumo de energía en el nivel macro (toda la sociedad) (Herring, 1999).

Hay dos aspectos relevantes de esta paradoja para el caso que nos ocupa. Por un lado, está el hecho, bien conocido en economía, que mejoras en la eficiencia conducen a un abaratamiento de los recursos, estimulando su uso (la oferta incentivando su propia demanda). Por otro, las sociedades, como sistemas complejos que son, funcionan a diferentes niveles jerárquicos. Los cambios definidos en un nivel (como la eficiencia energética en el hogar) no pueden ser extrapolados a niveles jerárquicos superiores (consumo total de energía de una sociedad), por la existencia de numerosas retroalimentaciones y relaciones entre los diferentes compartimentos del sistema en los diferentes niveles (Giampietro y Mayumi, 2000; Pastore *et al.*, 2000).

En otras palabras, el aumento en la eficiencia de un proceso sólo implica mejoras en variables extensivas. Esto llevará a ahorros efectivos de recursos *sólo si* el sistema *no se ajusta* a este cambio impuesto, mediante la evolución en el tiempo. Los aumentos en la eficiencia pueden usarse tanto para reducir el estrés de los ecosistemas (produciendo los mismos bienes y servicios con menos cantidad de recursos) como para producir más bienes y servicios manteniendo el mismo nivel de estrés (Giampietro y Mayumi, 2000).

Este último resultado es el típico de los sistemas humanos. Por lo tanto, podemos esperar que respondiendo a aumentos en la eficiencia, los humanos aumenten su nivel de actividad o incluso introduzcan nuevas actividades que antes no se podían permitir. La conclusión es que podemos ser más eficientes en el uso de la energía, pero aun así consumir más energía!

De acuerdo con lo que se ha discutido hasta ahora en esta sección, es difícil describir el comportamiento de metabolismo social de un sistema adoptando técnicas lineales tradicionales de análisis. Por el contrario, el uso de técnicas dinámicas no lineales nos permite observar comportamientos temporales así como cambios intermitentes en el conjunto de variables que utilizemos.

Así, por ejemplo, Gowdy (1994) aplica a los sistemas económicos la visión, originada en paleontología, de la evolución vista como un «equilibrio puntuado» (Eldridge y Gould, 1972). Éste es el nuevo nombre para algo que ya había sido estudiado con anterioridad por Schumpeter, que vio el desarrollo como «cambios espontáneos y discontinuos en los canales del flujo, que alteran y desplazan para siempre el estado de equilibrio existente previamente» (Schumpeter, 1949, 64). Es decir, los sistemas económicos estarían en unas fases estables en las que los parámetros del equilibrio dinámico de su comportamiento energético se mueven alrededor de lo que se conoce como puntos «atractores».

Estas fases estables vendrían seguidas de cambios radicales en el paradigma tecnológico y en la estructura industrial. Esto puede verse como un movimiento hacia otro punto atractor, que da cierta estabilidad al equilibrio dinámico, pero a otro nivel de consumos energéticos dentro del rango viable. La evolución de las sociedades, o el desarrollo, sería, por tanto, el transitar de un atractor al siguiente, o, usando palabras de Schumpeter (1949, 66), «llevar a cabo nuevas combinaciones», en el sentido de cambio estructural e institucional.

Una forma de analizar la existencia de esta discontinuidad es por medio de un diagrama de fases. Esta metodología ha sido usada para el caso de las emisiones de CO₂ (Unruh y Moomaw, 1998), y en el caso de la intensidad energética (De Bruyn, 1999; Ramos-Martín, 1999, 2001).

El diagrama de fases de la intensidad energética de la economía española se muestra en el gráfico 2. En el eje vertical se representa la intensidad energética en el año *t* (expresada en MJ/US\$), mientras que en el eje horizontal se representa la misma

variable para el año *t-1*. Los puntos obtenidos se unen mediante una línea. De esta forma, si los aumentos en la intensidad energética que vimos en el gráfico 1 fuesen cambios graduales (tal y como se defiende desde la hipótesis de la intensidad de uso), entonces el diagrama de fases mostraría una línea más o menos recta y con pendiente positiva, implicando mayores intensidades a lo largo del tiempo.

Sin embargo, si nos encontramos ante una situación de «equilibrio puntuado», el diagrama debería mostrar la existencia de diferentes puntos atractores, en donde los valores que toma la variable intensidad energética se mueven alrededor de unos valores determinados. En el caso que nos ocupa esto es precisamente lo que sucede en dos momentos, uno entre los años 1960-1966, y otro, más difuso, entre 1976-2001.

El segundo atractor implica valores para la intensidad energética que se mueven alrededor de los 7 MJ/US\$95. Entre estos dos puntos podemos observar un período de transición, que se caracteriza por una reenergización de la economía. Este tipo de comportamiento, que implica una fuerte no linealidad, viene a reflejar la peculiaridad de los sistemas complejos adaptativos mencionados antes, que se caracterizan, entre otras cosas, por la existencia de importantes retroalimentaciones y disipación de energía entre los diversos niveles jerárquicos, afectando al conjunto del sistema.

El diagrama de fases anterior muestra que, dentro del período analizado, la evolución de la intensidad energética ha atravesado fases de cierta estabilidad (alrededor de los dos atractores) y una fase de transición (cuando evolucionó de un atractor al otro).

En su conjunto, sin embargo, la tendencia que muestra la intensidad energética en el caso español es al crecimiento en el período de tiempo observado, significando que los cambios estructurales y/o institucionales no han generado, como ha ocurrido en otros países desarrollados, el mismo efecto de reducción de la intensidad energética.

Para poder entender mejor esta peculiaridad debemos distinguir entre el análisis

Una descripción detallada de la metodología empleada en el análisis, el *Multiple Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism* (MSIASM), puede encontrarse en los apéndices 1 y 2 de Giampietro y Mayumi (2000a).

En este análisis, la economía española se ha dividido en dos grandes sectores, el sector de trabajo remunerado (PW) (3) y el sector de los hogares (HH, *household* en inglés). El sector de trabajo remunerado sería aquel que generaría el valor añadido (GDP, *gross domestic product*), mientras que el sector de los hogares sería aquel que consumiría tal valor añadido. Ambos, sin embargo, consumen energía tanto para su mantenimiento como para su desarrollo. A su vez, el sector de trabajo remunerado se puede dividir en tres subsectores principales: el productivo (PS, *productive sector*) (4), servicios y gobierno (SG) y agricultura (AG).

$$PW = PS + SG + AG \quad [I]$$

La Intensidad Energética (EI) es la energía consumida total, o el transflujo total de energía (TET) dividido por el GDP, en este estudio se mide en MJ/US\$5.

$$EI = TET / GDP \quad [II]$$

Algunas relaciones útiles que se utilizarán más abajo son las siguientes:

La tasa de metabolismo exosomático media de la sociedad (EMR_{AS} , *exosomatic metabolic rate average of the society*) es el transflujo energético (exosomático) total dividido por el tiempo humano disponible total de la sociedad (THA, *total human time*). Esta relación nos da como resultado la tasa de uso energético de la sociedad en megajulios por hora. La interpretación de esta tasa es que se trata de una variable intensiva que refleja el ritmo al cual la sociedad disipa energía para su mantenimiento y desarrollo por unidad de actividad humana (tiempo).

$$EMR_{AS} = TET / THA \quad [III]$$

Por analogía, podemos obtener el mismo tipo de tasa para el caso del sector de los hogares y del sector del trabajo remunerado. Esto es,

$$EMR_{HH} = ET_{HH} / HA_{HH} \quad [IV]$$

Donde ET_{HH} es el consumo de energía en el sector de los hogares, y HA_{HH} es el tiempo humano disponible de la sociedad que no es trabajo; para el cálculo de esta variable, véase Giampietro y Mayumi (2000a). En este estudio, ET_{HH} se ha calculado como el consumo de energía residencial más el 50% del consumo de energía en el transporte.

Este último supuesto se fundamenta en el consumo medio de los automóviles y en el número de turistas en circulación, que sugieren que el 50% de la energía del sector transporte podría atribuirse a los hogares (véase una evaluación y las fuentes utilizadas en el apéndice del artículo). El otro 50% de energía del sector transporte lo asignamos al sector servicios y gobierno. De hecho, aunque este transporte sea usado para transportar mercancías para la producción, se generará el valor añadido en el sector de los servicios.

Un aumento en EMR_{HH} refleja un incremento en el nivel material de vida (Pastore *et al.*, 2000) y una mayor capitalización y consumo en el sector HH.

Usando el mismo procedimiento que para las relaciones (III) y (IV), obtenemos:

$$EMR_{PW} = ET_{PW} / HA_{PW} \quad [V]$$

Donde ET_{PW} es el consumo de energía en los sectores que generan valor añadido, y HA_{PW} es el tiempo humano disponible dedicado al trabajo (se usa un valor fijo de 1.840 horas por año y empleado). Tal y como se discutirá más abajo, EMR_{PW} puede usarse como una variable proxy para la inversión en capitalización del sector PW. Lo mismo ocurre en el caso de EMR_{PS} , EMR_{SG} y EMR_{AG} .

La última tasa que utilizaremos en el análisis es la productividad económica del trabajo (ELP , *economic labour productivity*), que se define como GDP / HA_{PW} en dólares por hora. De nuevo, podemos calcular también ELP_{AG} , ELP_{PS} y ELP_{SG} dividiendo el GDP sectorial (p. ej., GDP_{AG}) por su cantidad relativa de horas de trabajo (p. ej., HA_{AG}).

Por ejemplo, cuando hacemos una interpretación económica, podemos definir $TET = EI * GDP$ (de la relación [II]), pero desde nuestro punto de vista integrado, dado que $HA = HA_{HH} + HA_{PW}$ y $TET = ET_{HH} + ET_{PW}$, podemos definir TET como sigue:

$$TET = (HA_{HH} * EMR_{HH}) + (HA_{PW} * EMR_{PW}) \quad [VI]$$

Usando datos de 1990 para España obtenemos:

$$TET = EI * GDP = (HA_{HH} * EMR_{HH}) + (HA_{PW} * EMR_{PW})$$

$$3,78 * 10^{12} \text{ MJ} = 6,78 \text{ MJ}/\$ * 558,219 * 10^9 \$ = (3,17 * 10^{11} \text{ h} * 2,91 \text{ MJ/h}) + (2,32 * 10^{10} \text{ h} * 123,259 \text{ MJ/h}) = 3,78 * 10^{12} \text{ MJ}$$

Podemos hacer lo mismo para ET_{PW} . De la relación [I] sabemos que $PW = PS + SG + AG$, así que podemos definir ET_{PW} como sigue;

$$ET_{PW} = (HA_{PS} * EMR_{PS}) + (HA_{SG} * EMR_{SG}) + (HA_{AG} * EMR_{AG}) \quad [VII]$$

De nuevo, cuando utilizamos datos de la economía española para 1990, obtenemos que la anterior identidad se convierte en:

$$ET_{PW} = 2,86 * 10^{12} \text{ MJ} = (7,74 * 10^9 \text{ h} * 280,33 \text{ MJ/h}) + (1,29 * 10^{10} \text{ h} * 48,25 \text{ MJ/h}) + (2,61 * 10^9 \text{ h} * 26,99 \text{ MJ/h}) = 2,86 * 10^{12} \text{ MJ}$$

Para una discusión sobre la utilidad de escribir identidades que contienen información redundante que puede ser recuperada usando fuentes estadísticas, así como disciplinas, no equivalentes véase Giampietro y Mayumi (2000a). Brevemente, estos ejemplos muestran que es posible definir la misma variable (p. ej., TET o ET_{PW}) usando una interpretación económica (intensidad energética y GDP) o usando una evaluación integrada (tasas de metabolismo exosomático y disposición de tiempo humano, refiriéndonos a las características de los niveles jerárquicos inferiores del sistema, los sectores). Esto le da a nuestro análisis un alcance más amplio y más robustez, así como nos permite aportar diferentes explicaciones de los mismos hechos.

PRESENTACIÓN
DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

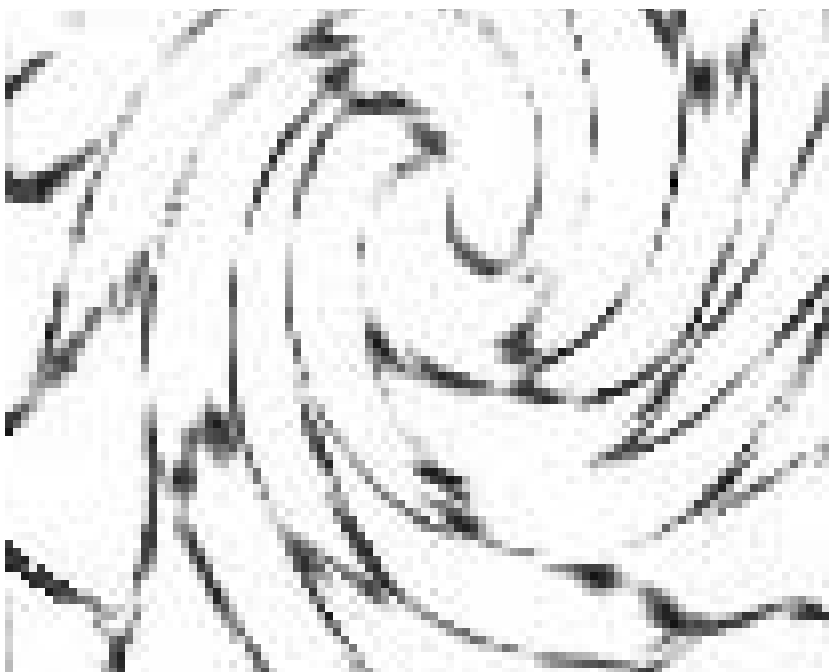
DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS
DE ELP Y EMR
EN LOS DIFERENTES SECTORES

Mediante el cálculo de las tasas definidas antes para la economía española obtenemos una información que no suele dar el análisis convencional de la intensidad energética y que se perdería de otra manera.

Una hipótesis principal que se usa en esta evaluación integrada es la relación existente entre la capitalización de los sectores productivos (medida por el consumo energético exosomático = fijo más circulante) y su posibilidad de producir valor añadido. Aceptar esta hipótesis implicaría que EMR_{pw} y ELP_{pw} están correlacionadas (Cleveland *et al.*, 1984; Hall *et al.*, 1986).

La buena correlación obtenida por Cleveland *et al.* en su análisis histórico de la economía norteamericana queda confirmada por las curvas presentadas en el gráfico 3 para el caso de la economía española. Así, cuando representamos los cambios en EMR_{pw} y ELP_{pw} encontramos una forma similar o una tendencia en el período considerado. Es decir, el consumo de energía exosomática por unidad de tiempo trabajado en el sector de trabajo remunerado seguiría la tendencia del valor añadido (GDP). El mismo resultado ha sido obtenido por Falconí (2001) para la economía ecuatoriana.

Si aceptamos la validez de esta correlación durante el período considerado, se podría argumentar que los cambios en la intensidad energética de España vienen generados por: 1) diferencias en la velocidad a la cual los dos parámetros EMR y ELP se ajustan el uno con el otro, y 2) cambios ocurridos fuera del sector de trabajo remunerado. Esta segunda opción nos apunta la posibilidad de que en España se estén produciendo cambios importantes en el sector de los hogares, como ya había sido anticipado por Alcántara y Roca (1995, 1996) al analizar los balances energéticos de España para el período 1975-1990.



Cambios en el sector PW. EMR_{pw} aumentó de 94,70 MJ/hora en 1976 a 137,11 MJ/hora en 2001, lo cual refleja la acumulación de capital en los sectores de la economía que producen valor añadido. Este cambio se ha visto reflejado en un relativo crecimiento de la productividad económica del trabajo (ELP_{pw}) (de 17,17 \$/hora en 1976 a 24,93\$ en 2001). Como efecto añadido, esto ha permitido el relativo descenso del tiempo humano disponible dedicado a actividades que generan valor añadido. De hecho, una mayor energía exosomática utilizada por trabajador implica la existencia de más aparatos exosomáticos por trabajador (tecnología), que está ligado a la posibilidad de comprar más petróleo para articular una determinada actividad económica.

Las dos cosas, *inversión fija* —los aparatos exosomáticos necesarios para disipar energía fósil de una forma útil por parte de los trabajadores— y la *inversión circulante* —energía fósil consumida— combinadas pueden considerarse como un indicador de una mayor capitalización de la actividad económica considerada. Esto es, un aumento en EMR que conduce a un incremento en ELP está ligado a más tecnología involucrada en la producción.

Cambios en el sector HH. Si los cambios en el sector PW han conducido a un au-

mento del tiempo no dedicado al trabajo, ¿cómo se ha reflejado esto en el nivel de capitalización del sector de los hogares? La tasa de metabolismo exosomático del sector de los hogares (EMR_{HH}) en el caso español se ha más que doblado. Ha subido de 1,54 MJ/hora en 1976 a 3,90 MJ/hora en 2001.

Combinando los dos. Cuando combinamos los cambios en las variables intensivas (EMR_i) y en las extensivas (HA_i) y cuando consideramos los sectores que tienen que ver tanto con el consumo como con la producción, obtenemos una imagen diferente de los cambios en la intensidad energética en España de la que obtuvimos en el anterior análisis (primera sección). A pesar de que la industria está reduciendo su intensidad energética, la intensidad de la economía en su conjunto está aumentando, debido al comportamiento del sector de los hogares, que está aumentando el consumo de energía en términos absolutos, de 449 PJ en 1976 a 1.260 PJ en 2001 (1 PJ = 10^{15} Julios).

Este resultado suele ser obviado por los estudios que hacen referencia a la CKA o a la intensidad energética de las economías, que se centran en exclusiva en el lado de la oferta de la economía, es decir, en los cambios en el sector de trabajo remunerado. Sin embargo, el lado

de la demanda, el sector de los hogares, puede ser un factor relevante para explicar la evolución de la intensidad energética, y por ello debe ser tenido en cuenta. Este resultado, tan importante desde un punto de vista de generación de políticas, no se encuentra en los análisis tradicionales.

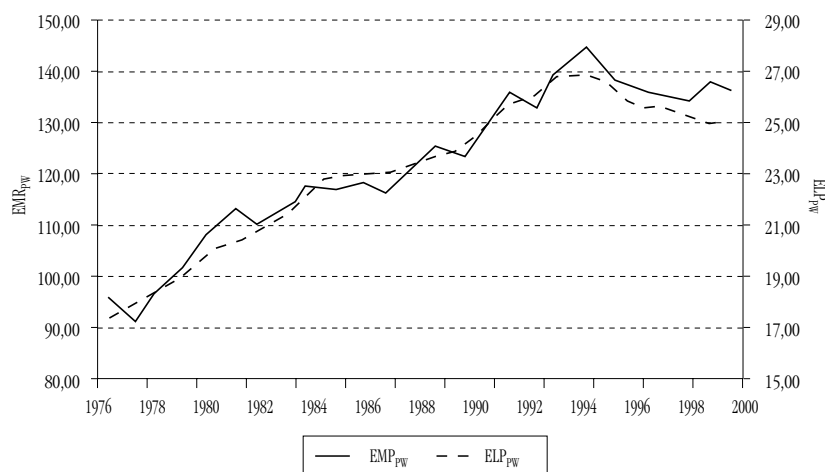
EL PAPEL CRUCIAL DE LOS CAMBIOS EN HA ENTRE LOS DIFERENTES SECTORES

Cuando representamos las diferentes tasas de metabolismo exosomático de la economía (gráfico 4) obtenemos información nueva y muy importante. Este gráfico muestra que $EMR_{PS} \gg EMR_{SG} > EMR_{AG} > EMR_{HH}$. Esta secuencia es muy importante dado que nos podemos dar cuenta de que, cuando estudiamos los cambios en las tasas de consumo de energía exosomática *per cápita* en un país (EMR_{SA}), tenemos que mirar también los cambios en los perfiles de asignación del tiempo disponible para los humanos entre esos diferentes sectores.

El valor real de EMR_{PW} , y por lo tanto su curva a lo largo del tiempo, no sólo depende del nivel de capitalización y de la eficiencia tecnológica de cada uno de los diferentes sectores (el valor que toma EMR_i), sino también del perfil de la distribución del «tiempo de trabajo» entre los tres diferentes sectores, PS, SG, y AG. El porcentaje de tiempo de trabajo en PS y en AG está disminuyendo, mientras que el mismo porcentaje para SG está aumentando (posindustrialización de la economía).

Cuando combinamos este resultado con el valor relativo de las diferentes EMR_i consideradas, podemos concluir que la reducción de la intensidad energética en PS ha sido contrarrestada por un aumento en EMR_{SG} ligado a un creciente peso del sector SG y por un aumento en EMR_{HH} , que ocurre en un sector que es mucho mayor que el resto. Es decir, para poder explicar el aumento total de la intensidad energética de la economía española tenemos que combinar (usando variables extensivas e intensivas) los diferentes cambios en las características de los diversos sectores.

**GRÁFICO 3
RELACIÓN ENTRE LA TASA DE METABOLISMO ENERGÉTICO (EMR_{PW})
Y LA PRODUCTIVIDAD DEL TRABAJO (ELP_{PW})**



FUENTE: Elaboración propia.

LA DINÁMICA ASOCIADA AL DESARROLLO ECONÓMICO

La relación entre EMR_{PW} y ELP_{PW} indicaría que existe una relación cuantitativa entre el PIB y el crecimiento del consumo de energía. No obstante, el crecimiento del *output* económico total se puede explicar por: 1) el aumento de la población ($dTHA/dt$); 2) el aumento en el nivel de vida material ($dEMR_{HH}/dt$) y 3) el incremento en la capitalización de los sectores económicos incluidos en PW ($dEMR_{PW}/dt$). Siempre que el comportamiento de la economía genera un excedente (un valor añadido extra al necesario para el propio mantenimiento de la economía), éste puede utilizarse para aumentar estos tres parámetros.

¿Cuáles son las implicaciones, por tanto, de la relación entre EMR_{PW} y ELP_{PW} , mostradas en el gráfico 2? Para poder tener crecimiento económico ET_{PW} tiene que crecer más rápido que HA_{PW} , esto se reflejará en un aumento de EMR_{PW} , que comportará una mayor disponibilidad de inversión para generar valor añadido. Claramente, la prioridad entre los posibles usos finales del excedente disponible [= 1) aumentar THA; 2) aumentar EMR_{HH} ; y 3) aumentar EMR_{PW}] dependerá de variables demográficas, decisiones políticas (como la posibilidad y la voluntad de reducir los aumentos en el consu-

mo por parte del sector HH para favorecer inversiones más rápidas en el sector PW, como es el caso de las reconversiones industriales de la década de los ochenta), y circunstancias históricas (como los niveles de capitalización existentes de los diversos sectores).

Para el caso español, el excedente generado por el desarrollo económico fue suficiente para absorber la nueva población (debido al crecimiento demográfico interno y, recientemente, a la inmigración) y el éxodo de los trabajadores del sector AG. De hecho, en las últimas décadas España ha estado todavía absorbiendo una gran fracción de trabajadores que salían del sector agrícola. Este proceso de desarrollo económico fue acelerado debido a la compresión en el aumento del nivel de vida de la población durante la dictadura, es decir, debido a la desigualdad en el ingreso, que permitió dirigir una fracción muy superior del excedente hacia la acumulación y posteriormente capitalización del sector PW. Finalmente, la estabilidad demográfica del país hizo posible que entrara en una espiral de crecimiento económico positivo de forma rápida.

Los muy bajos niveles de EMR_{HH} (cuando los comparamos con los de otros países desarrollados) indican que en las etapas iniciales de desarrollo industrial España experimentó cierta compresión del con-

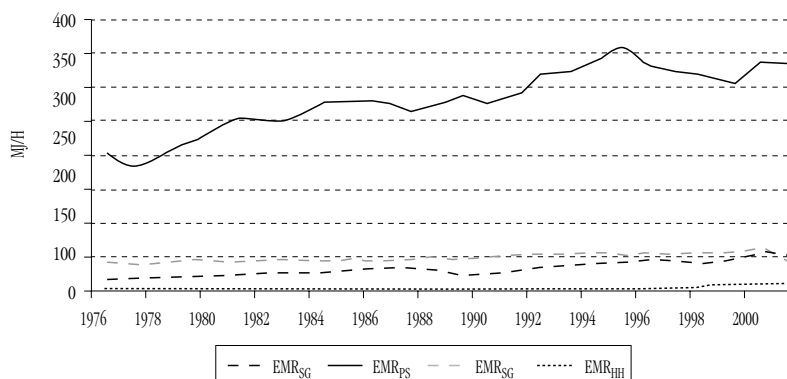
sumo. No obstante, una vez que EMR_{PS} alcanzó valores comparables a los de otros países desarrollados (p. ej., 300 MJ/h) y que la situación política cambió con la llegada de la democracia, el excedente se dedicó, principalmente, a estimular el sector SG (aumentando X_{SG} , por medio de la absorción de trabajadores de la agricultura, y al mismo tiempo aumentando EMR_{SG}) y a mejorar el nivel de vida material (aumentando EMR_{HH}).

En particular, la capitalización del sector de los hogares está induciendo el marcado aumento en EMR observado antes. Este resultado concuerda con el presentado por Alcántara y Roca (1995, 1996), al analizar los balances energéticos de España, a pesar de las diferencias en la metodología. Por ejemplo, los autores mantuvieron el consumo energético del transporte como un sector aparte, mientras aquí se ha dividido entre el sector de los hogares y los sectores productivos.

Cuando comparamos el crecimiento de EMR_{HH} con el de EMR_{PW} (gráfico 5), podemos ver un desfase temporal que refleja las diferentes elecciones tomadas en el proceso de desarrollo económico. De hecho, cuando España estaba todavía centrándose en una rápida capitalización de la economía, EMR_{PW} crecía casi de forma paralela a EMR_{HH} . Sin embargo, en los últimos 10 años, cuando los sectores pertenecientes a PW han ido reduciendo la tasa de crecimiento, el aumento en el nivel material de vida y el aumento en el sector del transporte han sido los mayores responsables del aumento en el consumo de energía, resultando en un aumento de la intensidad energética total (gráfico 1).

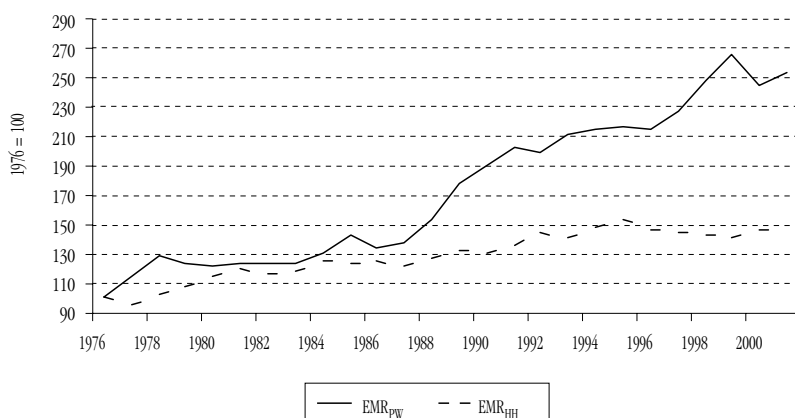
En resumen, el bajo crecimiento poblacional, así como el bajo servicio de la deuda (que puede ser una causa de fuga del excedente), permitieron a la economía española entrar en una espiral positiva de crecimiento económico. El excedente disponible se invirtió primero para permitir un aumento en EMR_{PW} ($dET_{PW} > dHA_{PW}$). Esta situación condujo a un aumento de la productividad, ELP_{PW} , que permitió un ulterior aumento del excedente (debido al mantenimiento temporal de EMR_{HH}). Cuando se alcanzó un nivel suficiente de capitalización en el sector PS ($EMR_{PS} = 300$ MJ/h), el excedente se

GRÁFICO 4
TASAS DE METABOLISMO EXOSOMÁTICO



FUENTE: Elaboración propia.

GRÁFICO 5
EVOLUCIÓN DE LAS TASAS DE CRECIMIENTO DE EMR_{HH} Y EMR_{PW}



FUENTE: Elaboración propia.

dedicó a expandir el sector SG (absorbiendo los trabajadores de AG con una razonable cantidad de inversión, dado que $EMR_{SG} < EMR_{PS}$) y a aumentar el nivel de vida material de los hogares, EMR_{HH} .

●●●●●●●●●●
CONCLUSIONES

A lo largo del artículo se han usado tres enfoques diferentes para estudiar el tema de la desmaterialización energética aplicado a la economía española. El primer enfoque ha sido el convencional, que analiza la intensidad energética desde una perspectiva económica. El

segundo sirvió para describir el comportamiento no lineal de la variable mediante la utilización de un diagrama de fases. Por último, el tercer enfoque ha utilizado de forma combinada variables económicas y biofísicas para tratar de explicar el mismo resultado. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes.

EN RELACIÓN CON ESPAÑA

España no sigue la hipótesis de la intensidad de uso que sugiere una curva en forma de U invertida para la intensidad energética. La variable, más bien, crece a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se puede concluir que la Curva de Kuznets Am-

biental no se aplica para el caso de la energía en España.

El comportamiento de la variable intensidad energética no es continuo a lo largo del tiempo, sino que presenta una serie de altibajos y una serie de saltos desde un atractor a otro. Así, los cambios en la intensidad energética se deben básicamente al cambio estructural y a la evolución de las características de los diversos sectores (especialmente HH), tal y como se ha podido ver en la tercera sección.

El aumento en el nivel de capitalización del sector de los hogares ($dEMR_{HH}/dt$) es uno de los factores que explica el aumento de la intensidad energética en España. Al pertenecer al lado de la demanda, este sector no suele ser tenido en cuenta en los análisis convencionales sobre la evolución de la intensidad energética. Sin embargo, este estudio muestra que, cuando se diseñan políticas que pretenden reducir el impacto ambiental de la economía deberíamos tener en cuenta cómo se está comportando dicho sector. Son los cambios en el grupo de actividades relacionadas con el consumo los que nos pueden ofrecer claves sobre la posibilidad de movimientos hacia nuevos atractores de menor impacto (siguiendo la teoría del equilibrio puntuado).

EN RELACIÓN CON LA CKA Y OTRAS HIPÓTESIS DE DESMATERIALIZACIÓN

El uso de variables intensivas como la intensidad energética es ciertamente útil, por ejemplo, para elegir entre diferentes procesos que presentes diferentes eficiencias. No obstante, este análisis no es relevante desde un punto de vista ambiental, dado que si estamos interesados en el metabolismo de la sociedad tenemos que mirar a las variables extensivas que reflejan el comportamiento del transflujo total. Por ejemplo, el valor de TET es el resultado de los cambios en una variable intensiva (EMR_{SA}) y una variable extensiva (THA). De 1960 a 2001 la población ha crecido de 30,58 millones a 40,23 millones, mientras que EMR_{SA} ha pasado de 2,52 MJ/h a 15,11 MJ/h. Reflejando estos cambios, TET ha variado de 675 PJ a 5.330 PJ. Es esta última variable la que



nos está indicando, de una manera indirecta, el posible impacto ambiental de la actividad económica española.

La existencia de retroalimentaciones entre los procesos que ocurren en diferentes niveles jerárquicos en los sistemas complejos adaptativos implica que no podemos extrapolar resultados de un nivel a otro de una forma lineal. Por lo tanto, necesitamos diferentes herramientas para representar ese comportamiento no lineal de las variables consideradas.

Parfraseando a Sun (1999) podemos decir que la CKA es sólo una reflexión de *nuestra percepción* de la evolución pasada de la intensidad energética, y no se trata de una guía que nos diga cuando un país está mejorando o no sus problemas ambientales (énfasis añadido). Además, se puede argumentar que no hace falta esperar a alcanzar determinado nivel de renta para poder reducir la intensidad energética (como nos dice la CKA). En cualquier estado de desarrollo se puede reducir la intensidad si existe la voluntad de cambiar los parámetros que determinan la estabilidad de nuestro consumo energético.

La hipótesis de la desmaterialización no se mantiene en situaciones de continuo crecimiento económico. Tal y como muestra el caso español presentado aquí y las fases

de rematerialización que De Bruyn y Opschoor (1997) encontraron para diversos países desarrollados, es posible que éstos se encuentren en fases de crecimiento entre dos atractores. Por tanto, en lugar de estudiar la trayectoria seguida cuando entra en la senda de atracción de un punto atractor (que es lo que hoy en día se ve en las curvas que muestran «desmaterialización»), sería más interesante estudiar cuáles pueden ser los futuros atractores que nos podemos imaginar. Esto implica que no podemos simplemente esperar a que el crecimiento económico nos resuelva todos nuestros problemas ambientales. Por el contrario, debemos tratar de ver qué cambios estructurales e institucionales son necesarios para evitar tanto las fases de rematerialización como la repetición de los mismos errores (o tendencias) por parte de los países en desarrollo (es decir, que no caigan en atractores caracterizados por un consumo energético superior).

Hay que tener especial cuidado para que la desmaterialización de algunos países (los más desarrollados) no se obtenga a costa de una mayor rematerialización de otros (los menos desarrollados). Es decir, debemos contrastar la actual internacionalización generalizada de las externalidades ambientales. Mielnik y Goldemberg (1999) han mostrado que ésta es una situación que, de hecho, se da para el caso del CO_2 .

En este sentido, la actitud de los gobiernos nacionales debería dirigirse a introducir el cambio estructural necesario para invertir la tendencia actual de la intensidad energética, así como a reducir, más adelante, el metabolismo del sistema.

Finalmente, la utilización de modelos integrados para caracterizar los cambios en las economías basados en el uso de diferentes variables para generar descripciones paralelas de los mismos hechos en diferentes niveles jerárquicos parece esencial cuando estamos hablando de sustentabilidad. La generación de efectos mosaico entre las diferentes piezas de información mejora la robustez del análisis y la posibilidad de obtener nuevas ideas generando un sinergismo en el uso paralelo de las diferentes disciplinas que intervienen en el análisis.

.....

(*) Profesor visitante de la Universitat Autònoma de Barcelona y candidato a doctor en Ciencias Ambientales (Economía Ecológica) por la misma universidad. Agradezco a Óscar Carpintero su ayuda con el acceso a algunos datos estadísticos, y al proyecto de la UE, *Development and application of a multi-criteria software decision analysis tool for renewable energy sources* (MCDA-RES), contrato NNE5-1999-NNE5/273/2001, por el apoyo parcial a esta investigación, así como al Grup de Recerca Consolidat, 2001SGR 00163.

.....

APÉNDICE

La intensidad energética se ha calculado dividiendo la Oferta Total de Energía Primaria (TPES, Total Primary Energy Supply) expresada en julios por el PIB expresado en dólares de 1995, usando los datos de la OECD que se mencionan a continuación.

La desagregación de los sectores se ha realizado combinando la desagregación de la OECD para el consumo de energía por sectores y para el PIB, y aplicando la evolución de la estructura del PIB por sectores que se puede encontrar en las Cuentas Nacionales.

Los datos sobre población también vienen de la OECD, mientras que la información sobre la población empleada se puede encontrar en la página web del INE <http://www.ine.es>. Se ha asumido una carga de trabajo de 1.840 horas por trabajador, es decir 46 semanas a 40 horas semanales. La distribución del tiempo de trabajo entre los diferentes sectores se encuentra disponible también en la misma página web.

Para la asignación del consumo de energía del sector transporte entre los diferentes sectores se ha hecho el siguiente supuesto: el 50% de la energía se atribuyó al sector de los hogares, mientras que el otro 50% fue al sector de servicios y gobierno. Este último supuesto se ha derivado del consumo medio de los automóviles y del número de coches en circulación para países desarrollados, usando las siguientes fuentes:

1] «Transportation energy data book: edition 17», Oak Ridge National Lab (<http://www.cta.ornl.gov/data/tebd17/tebd17.html>).

2] «Transportation energy and the environment: chapter 4», US Bureau of Transport Statistics

(http://www.bts.gov/ntda/nts/NTS_99/data/chapter4/content.pdf).

3] Statistical Compendium Europe's Environment from Eurostat (<http://europa.eu.int/eurostat>).

.....

NOTAS

(1) El consumo exosomático de energía implica el uso de fuentes para conversiones energéticas que se producen fuera del cuerpo humano (a diferencia del endosomático) para el metabolismo de una sociedad, pero que todavía están bajo el control de los humanos, como, por ejemplo, la energía contenida en, y la utilizada por, la maquinaria.

(2) Total Primary Energy Supply (TPES) en inglés, y se mide en megajulios, siendo 1 MJ = 10⁶ julios.

(3) Paid Work sector. La nomenclatura del modelo se encuentra en lengua inglesa, por lo que se respetan aquí las siglas que designan a las variables, y es por eso que entre paréntesis se explica su significado.

(4) Se utiliza la nomenclatura original, a pesar de que la denominación «sector productivo» para lo que es en realidad industria y minería puede llevar a equívocos, al poder interpretarse que ni la agricultura ni los servicios son «productivos».

.....

BIBLIOGRAFÍA

ALCÁNTARA, V. y ROCA, J. (1995): «Energy and CO₂ emissions in Spain», *Energy Economics*, vol. 17 (3), pp. 221-230.

ALCÁNTARA, V. y ROCA, J. (1996): «Tendencias en el uso de la energía en España (1975-90). Un análisis a partir de los balances energéticos», *Economía Industrial*, 311, pp. 161-167.

ARTO OLAIZOLA, I. (2002): *Necesidad total de materiales de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Serie programa marco ambiental nº 7, IHOB, Gobierno Vasco.

CARPINTERO, Ó. (2002): «La economía española: el «dragón europeo» en flujos de energía, materiales y huella ecológica, 1955-1995», *Ecología Política*, nº 23, pp. 85-125.

CLEVELAND, C. J., COSTANZA, R., HALL, C. A. S. y KAUFMAN, R. (1984): «Energy and the U.S. Economy: a Biophysical Perspective», *Science*, 225, pp. 890-897.

DALY, H. (1991): *Steady State Economics: Second Edition With New Essays*, Island Press, Washington, DC.

DE BRUYN, S. M. (1999): «The need to change attractors», *Ökologisches Wirtschaften*, 3.

DE BRUYN, S. M. y OPSCHOOR, J. B. (1997): «Developments in the transflujo-income relationship: theoretical and empirical observations», *Ecological Economics*, vol. 20, pp. 255-268.

ELDRIDGE, N. y GOULD, J. S. (1972): «Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism», en T. J. M., Schopf (ed.): *Models in Paleobiology*, San Francisco, Freeman, Cooper and Co.

FALCONI, F. (2001): «Integrated assessment of the recent economic history of Ecuador», *Population and Environment*, 22 (3), pp. 257-280.

FISCHER-KOWALSKI, M. (1997) «Society's metabolism: on the childhood and adolescence of a rising conceptual star», en M. Redclift y G. Woodgate, (eds.): *The International Handbook of Environmental Sociology*, Edward Elgar, Cheltenham.

GEORGESCU-ROEGER, N. (1971): *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

GIAMPIETRO, M. (1997): «Linking technology, natural resources, and the socioeconomic structure of human society», *Advances in Human Ecology*, vol. 6.

GIAMPIETRO, M. y MAYUMI, K. (2000): «Jevons' paradox. Scaling in Societal Metabolism and the fairy tale of Kuznets curves», Proceedings of the 3rd Biannual Conference of the European Society for Ecological Economics, Vienna, 3-6 mayo 2000: «Transitions towards a Sustainable Europe. Ecology-Economy-Policy».

GIAMPIETRO, M. y MAYUMI, K. (2000a): «Multiple-scale integrated assessment of societal Metabolism: introducing the approach», *Population and Environment*, 22, pp. 109-153.

GIAMPIETRO, M. y MAYUMI, K. (2000b): «Multiple-scale integrated assessment of societal Metabolism: integrating biophysical and economic representations across scales», *Population and Environment*, 22, pp. 155-210.

GOWDY, J. M. (1994): *Coevolutionary economics: The Economy, Society, and the Environment*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

HALL, C. A. S., CLEVELAND, C. J. y KAUFMAN, R. (1986): *Energy and Resource Quality*, Nueva York, John Wiley & Sons.

HERRING, H. (1999): «Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences», *Applied Energy*, 63, pp. 209-226.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (1992): *Contabilidad Nacional de España. Serie enlazada 1964-1991. Base 1986*, Madrid.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (1998): *Serie contable 1992-1997*, Madrid.

- JÁNICKE, M., MÖNCH, H., RANNEBERG, T. y SIMONIS, U. E. (1989): «Economic Structure and Environmental Impacts: East-West Comparisons». *The Environmentalist*, vol. 9, pp. 171-182.
- JEVONS, F. (1990): «Greenhouse: A paradox», *Search*, 21 (5).
- MALENBAUM, W. (1978): *World demand for raw materials in 1985 and 2000*, McGraw-Hill, Nueva York.
- MARTINEZ-ALIER, J. (1987): *Ecological Economics: Energy, Environment, and Society*, Blackwell's Book Services, Oxford.
- MIELNIK, O. y GOLDEMBERG, J. (1999): «The evolution of the "carbonization index" in developing countries», *Energy Policy*, 27, pp. 307-308.
- NAREDO, J. M. y CAMPOS, P. (1980): «Los balances energéticos de la agricultura española», *Agricultura y Sociedad*, nº 15.
- NAREDO, J. M. y GASCO, J. M. (1992): *Las cuentas del agua*. Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- OCDE (2002): *OECD Statistical Compendium on CD-ROM*, París.
- OPSCHOOR, J. B. (1997): «Industrial metabolism, economic growth and institutional change», en M. Redclift & G. Woodgate (eds.): *The International Handbook of Environmental Sociology*, Edward Elgar, Cheltenham.
- PASTORE, G., GIAMPIETRO, M. y MAYUMI, K. (2000): «Societal metabolism and multiple-scale integrated assessment: empirical validation and examples of application», *Population and Environment*, 22 (2), pp. 211-254.
- RAMOS-MARTIN, J. (1999): «Breve comentario sobre la desmaterialización en el estado español», *Ecología Política*, 18, pp. 61-64.
- RAMOS-MARTIN, J. (2001): «Historical analysis of energy intensity of Spain: from a "conventional view" to an "integrated assessment"», *Population and Environment*, 22, pp. 281-313.
- RAMOS-MARTIN, J. (2003): «Empirismo en economía ecológica: una visión desde la teoría de sistemas complejos», *Revista de Economía Crítica*, vol. 1, pp. 75-93.
- SCHUMPETER, J. A. (1949): *The Theory of Economic Development*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 3ª edición.
- SIMONIS, U. E. (1989): *Industrial restructuring for sustainable development: three points of departur*, Science Centre Berlin, FS II 89-401, Berlín.
- SUN, J. W. (1999): «The nature of CO₂ emissions Kuznets curve», *Energy Policy*, 27, pp. 691-694.
- UNRUH, G. C. y MOOMAW, W. R. (1998): «An alternative analysis of apparent EKC-type transitions», *Ecological Economics*, 25, pp. 221-229.
- VON WÉIZSACKER, E. U., LOVINS, A. B. y LOVIN, L. H. (1997): *Factor Four. Doubling Wealth, Halving Resource Use*, Earthscan, Londres.