

De los consumos finales de energía a los requerimientos de energía primaria y las emisiones de CO₂. Aproximación a partir de los balances de energía. Aplicación a Cataluña, 1990-2005

Este artículo analiza la evolución de los usos de energía primaria y las emisiones de CO₂ resultantes en Cataluña durante 1990-2005. Se presenta un método que permite —a partir de los balances energéticos— «traducir» los consumos finales de energía en requerimientos de energía primaria. Se comparan los resultados de 2003-2005 con los de 1990-1992. Los cambios más relevantes son la disminución en la energía primaria necesaria para obtener una unidad de electricidad y el cambio en su composición media por fuentes de energía primaria. Los cambios en las necesidades de energía primaria se descomponen en tres efectos: cambios en el nivel de consumo final de los diferentes sectores («efecto actividad»), entre diferentes tipos de energías finales («efecto sustitución») y cambios en las necesidades de energía primaria para disponer de las energías finales («efecto transformación»). Posteriormente, el trabajo traduce los requerimientos de energía primaria en las emisiones correspondientes y analiza su evolución mediante la descomposición factorial antes descrita.

Artikulu honetan Katalunian 1990-2005 artean energia primarioaren erabilerak izandako bilakaera eta horren ondoriozko CO₂ isurketak aztertzen dira. Balantze energetikoak kontuan izanda, energia-kontsumoaren azken emaitzak energia primarioen eskakizun «bihurtzeko» aukera eskaintzen du. Metodo honen arabera, dena delako sektore edo jarduerak azkenean izandako energia-kontsumoa azertu, eta horrek zenbat energia primario kontsumitzea dakarren kalkulatzan da, eta baita konposizioa zein den ere. 2003-2005 arteko emaitzak 1990-1992 artekoekin erkatu dira. Antzemandako aldaketarik nabarmenenak hauek dira: elektrizitate-unitate bat lortzeko behar den energia primarioaren kopuruak behera egin izana, eta energia primarioen iturrietan izandako aldaketak. Horrekin batera, energia primarioen beharrianak aldatu egin dira, eta horrek hiru arlotan ditu ondorioak: sektoreen azken kontsumoaren mailan («jarduera-efektua»), azken energiaren motetan («ordezkapen-efektua»), eta behar beste azken energia izateko behar den energia primarioaren premietan («eraldaketa-efektua»). Horren ostean, energia primarioaren premiek zenbateko isurketak izango dituzten aztertzen du azterlanak, eta baita zer nolako bilakaera izango duten ere, lehen deskribaturiko banaketa faktorialaren arabera.

This paper analyzes the evolution of the uses of primary energy and the resulting CO₂ emissions in Catalonia during 1990-2005. We present a method that allows – from the energy balances – to «translate» final consumption of energy into primary energy requirements. This technique estimates the quantity of primary energy (and its composition) that pulls a given level of final energy consumption of the different sectors or activities. We compare the results for 2003-2005 with the ones for 1990-1992. The most relevant changes are the reduction in the primary energy required for obtaining a unit of electricity and the change in its average composition by primary energy sources. We decompose the changes in primary energy into three effects: the change in the level of final consumption of the different sectors (“energy final consumption”) and the changes between different types of final energies (“substitution effect”) and the changes in the needs of primary energy for obtaining final energies (“transformation effect”). Finally, the paper translates the primary energy requirements into the corresponding emissions and analyzes their evolution by means of the factorial decomposition abovementioned.

ÍNDICE

1. Introducción: objetivo y base de datos
 2. Evolución de los consumos finales de energía (1990-2005)
 3. De los consumos finales de energía a los requerimientos de energía primaria
 4. Los factores explicativos de los cambios en los requerimientos de energía primaria asociados al consumo final
 5. Evolución de las emisiones de CO₂ vinculadas al consumo final de energía
 6. Conclusiones
- Referencias bibliográficas
Anexos

Palabras clave: balances de energía, emisiones de CO₂, energía primaria, uso y consumo de energía.

Keywords: energy balances, greenhouse gases; primary energy, use and energy consumption.

N.º de clasificación JEL: Q40, Q53, Q56.

1. INTRODUCCIÓN: OBJETIVO Y BASE DE DATOS

La perspectiva de este trabajo es analizar las tendencias en los consumos finales de energía en Cataluña durante el periodo 1990-2005 y ver sus implicaciones en requerimientos de energía primaria y emisio-

nes de CO₂. Para ello utilizamos un método de análisis de los datos de consumos finales de energía que permite estimar la cantidad de energía primaria que *arrastra* un determinado nivel de consumo de energía final usada por los diferentes sectores o actividades.

La base de datos utilizada es la de los balances energéticos de Cataluña, facilitados para el periodo 1990-2005 por el Instituto Catalán de la Energía (ICAEN)¹. Las

* Agradecemos al ICAEN, y especialmente a Joan Esteve y Albert Casanovas toda la ayuda suministrada. Una versión preliminar de este artículo ha sido presentada como documento de trabajo del Departamento de Economía Aplicada de la Universidad Autónoma de Barcelona. Investigación hecha en el marco del proyecto AMEEC (Análisis del Metabolismo Energético de la Economía Catalana), promovido por el Consejo Asesor para el Desarrollo Sostenible (CADS) con financiación del Instituto de Estudios Catalanes (IEC). Los autores agradecen el apoyo de los proyectos SEJ2006-04444/ECON (Ministerio de Educación y Ciencia), 2005SGR-177 y XREPP (Dirección General de Recerca) y SEJ2006-15219/ECOM (Ministerio de Educación y Ciencia).

¹ Los datos de 2004 y 2005 son avances que pueden experimentar variaciones cuando se consideren definitivos. Hay algún pequeño problema en la continuidad de la serie temporal de datos, pero afecta a fuentes energéticas con muy poco peso relativo y apenas altera los resultados globales. Los principales déficit son que hay un salto en la información sobre el uso de biomasa que parece muy incompleta hasta el año 1997 y que para los años anteriores a 1996 no hay información sobre «residuos no renovables».

fuentes de energía primaria consideradas en estos balances son las siguientes.

En primer lugar, los tres combustibles fósiles: carbón², petróleo y gas natural. Por otro lado, tenemos también como fuentes primarias diferentes formas de obtener electricidad, como son la energía nuclear, la hidroelectricidad, la eólica y la solar fotovoltaica; tal y como hace la Agencia Internacional de la Energía, la energía nuclear se contabiliza por el calor generado en las centrales nucleares, mientras que en los otros casos se contabiliza como energía primaria sólo el valor energético de la electricidad efectivamente generada³. En tercer lugar, tenemos la captación de calor a partir de la energía solar («solar térmica»). En cuarto lugar, se contabilizan también como fuentes primarias diversos aprovechamientos energéticos —a veces en forma de electricidad y a veces en formas de calor— principalmente de flujos residuales que el ICAEN clasifica como: «biomasa» (forestal y agrícola), «biogás» (aprovechado de los vertederos y también de lodos de depuradora, purines y residuos de la industria agroalimentaria), «residuos renovables» (las plantas de incineración de residuos sólidos urbanos) y «residuos no renovables» (hidrógeno y otros gases residuales de proceso, básicamente del sector químico, y otros residuos industriales).

En último lugar, tenemos los agrocarburos clasificados en bioetanol y biodiésel que incluyen por ejemplo el aprovecha-

miento de residuos —por ejemplo aceites vegetales utilizados— como los llamados «cultivos energéticos». Respecto a estos últimos, habría que hacer un par de precisiones. La primera, terminológica, es que la producción de alimentos también se puede calificar, obviamente, como cultivo energético⁴; pero dado que este trabajo estudia solo la energía «exosomática» (es decir, la controlada por los humanos pero consumida fuera de nuestro cuerpo), los únicos «cultivos energéticos» relevantes para este trabajo son aquellos que no están destinados a alimentar la población humana (es decir, excluye la energía «endosomática»). La segunda cuestión a destacar es que para obtener estos cultivos se produce un fuerte gasto energético que no está incluido en los balances energéticos ya que forma parte de otros sectores —como el agrario— por lo que la propia clasificación como fuente primaria —que mantenemos— puede llevar a confusión porque da la impresión de que se añade sin más a la oferta energética⁵.

La energía disponible también aumenta cuando se importan energías ya transformadas, como la electricidad o productos del petróleo ya refinados, hecho del cual también informan los balances energéticos. En un apartado posterior nos referiremos al tratamiento de estas importaciones.

Los balances de energía ponen de manifiesto las interrelaciones entre los sectores energéticos y también muestran el consu-

² Respecto al carbón, en los datos de los balances se distingue entre lignito y otros tipos de carbón. Nosotros los hemos considerado de forma agregada.

³ Esto es importante tenerlo en cuenta en el momento de valorar las cifras: una unidad de energía primaria de energía nuclear corresponde a una cantidad de electricidad mucho más pequeña —aproximadamente la tercera parte— que una unidad de hidroelectricidad.

⁴ Y, de hecho, el coste de oportunidad de los cultivos para «alimentar» coches puede ser efectivamente, dejar de cultivar alimentos para las personas.

⁵ Si hiciéramos todos los cálculos, la energía gastada para obtener energía en forma de agrocombustibles sería muy grande (hasta podría resultar, en algunos casos extremos, que la actividad —quizás viable gracias a subvenciones— consumiese más energía de la que se obtiene).

mo final de energía por parte de diferentes sectores o actividades. Las fuentes de consumo final consideradas son las mismas que antes, quitando el petróleo crudo, nuclear, hidráulica, fotovoltaica y añadiendo electricidad y derivados del petróleo.

Lamentablemente, la información sectorial del consumo final disponible es muy agregada, de forma que considera sólo cinco sectores o actividades: «Primario», «Industrial» (que incluye la construcción), «Servicios», «Transporte» y «Doméstico». De momento, no tenemos pues información desagregada en diferentes sectores industriales (que sería muy importante para situar las responsabilidades relativas de diferentes actividades y que, además, podría permitir un análisis input-output más completo). Tampoco tenemos estimaciones —y esto es muy difícil de resolver— sobre cómo el consumo energético en transporte se distribuye entre el «sector transporte» como sector productivo y el transporte privado particular, de forma que siempre tratamos al «transporte» como un todo⁶. Además de los cinco usos anteriores de la energía final, hay que añadir también la demanda de los «usos no energéticos» (especialmente derivados del petróleo utilizados como materia prima de la industria petroquímica) y del «saldo exportador energético» que en el primer caso no es propiamente una demanda energética (pero que también consideraremos) y en el segundo caso puede considerarse «responsabilidad» de los territorios importadores.

⁶ También hay que decir que, cuando hablamos de energía del transporte, nos referimos a una parte —la más importante, pero no la única— del ciclo total del transporte. En sentido más amplio, podríamos incluir —en una perspectiva de ciclo de vida— el gasto energético de producir coches, construir y mantener carreteras,... (véase Estevan, 2005).

Después de esta introducción, la estructura del trabajo es la siguiente. El apartado 2 describe brevemente la evolución de los consumos finales de energía en Cataluña entre 1990 y 2005. El apartado 3 presenta el método que hemos utilizado para estimar la energía primaria «arrastrada» por los consumos finales de energía. A continuación ilustra el modelo con los datos reales de Cataluña del año 2005 y describe los cambios en las necesidades de energía primaria ligadas a las diferentes formas de consumo final de energía a lo largo del periodo analizado. El apartado 4 presenta el modelo utilizado para analizar la contribución de diferentes factores a los cambios en el total de energía primaria —y en su composición— y aplica el modelo a Cataluña para el periodo considerado. El apartado 5 describe la evolución de las emisiones totales de CO₂ asociadas al uso de energía en Cataluña durante el mismo periodo 1990-2005 atribuyendo las responsabilidades a los diferentes sectores y analiza los cambios en las emisiones de CO₂ estudiando la contribución de diferentes factores explicativos, aplicando el mismo enfoque que para los requerimientos de energía primaria. Por último, el apartado 6 recoge unas breves conclusiones.

2. EVOLUCIÓN DE LOS CONSUMOS FINALES DE ENERGÍA (1990-2005)

Como ya hemos apuntado, un objetivo del trabajo es analizar cuánta energía primaria se requiere (y cuantas emisiones se generan) para proveer los diferentes consumos finales de energía de empresas, ciudadanos y administraciones públicas. Comenzaremos, no obstante, dando una perspectiva general sobre la evolución de estos consumos finales.

No consideraremos el uso del propio sector de la energía ya que éste tiene, desde nuestro punto de vista, un papel meramente de proveedor y transformador de las energías primarias en energías disponibles para su uso. Nos interesan las energías disponibles para su uso.

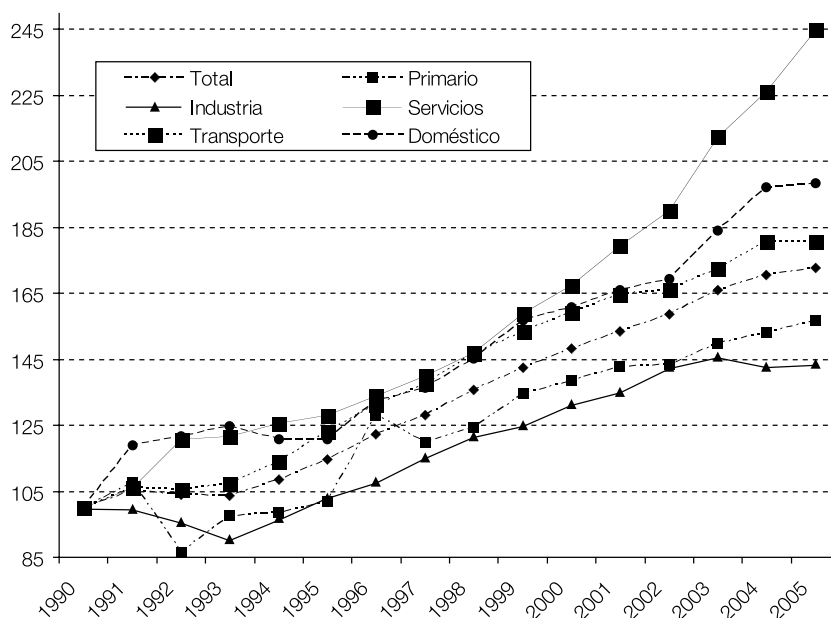
En el gráfico n.º 1 podemos ver cómo evoluciona el total del consumo final de energía y los cinco sectores en que podemos dividirlo, según los datos disponibles, expresado en números índice (base 1990=100).

En el gráfico n.º 1 podemos ver dos comportamientos muy diferenciados. Por un

lado, los sectores primario e industrial, para los cuales hay una cierta disminución en el consumo energético de los primeros años noventa, aunque en conjunto el aumento de consumo de energía es muy importante. Por otro lado, los servicios, el transporte y el consumo residencial, con un aumento del consumo de energía durante prácticamente todos los años y relativamente mucho más importante para el conjunto del periodo de dieciséis años analizado.

En el cuadro n.º 1 vemos el peso relativo sobre el consumo final de los cinco sectores considerados. Como en la mayor parte del

Gráfico n.º 1
Evolución de los consumos finales de energía total y por sectores.
Cataluña, 1990-2005
(Base 1990=100)



Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

Cuadro n.º 1

Consumos finales de energía por sectores. Cataluña, 1990-2005

(Valores absolutos, peso relativo y variación)

	Media 1990-1992		Media 2003-2005		Aumento en términos absolutos	% aumento sobre aumento total
	ktep	% sobre el total	Ktep	% sobre el total		
Primario	397,5	4,2	620,8	4,0	223,3	3,6
Industria	3.549,7	37,3	5.194,4	33,2	1.644,6	26,7
Servicios	858,3	9,0	1.795,9	11,5	937,7	15,2
Transporte	3.457,6	36,4	5.925,6	37,8	2.468,0	40,1
Doméstico	1.248,5	13,1	2.124,6	13,6	876,1	14,2
Total	9.511,6	100,0	15.661,3	100,0	6.149,7	100,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

resto del trabajo, se utilizan los valores medios de los tres años iniciales y de los tres finales para evitar oscilaciones muy coyunturales. Podemos ver cómo, desde el punto de vista del consumo final de energía, el transporte se ha convertido en la actividad más importante por encima de la industria. Al mismo tiempo, el transporte ha sido la actividad que, en términos absolutos, más ha aumentado en el consumo de energía.

En el gráfico n.º 2 aparece la comparación de la evolución del PIB catalán a precios constantes con la de los diferentes consumos finales de energía, ahora distinguiendo solo entre el total de los tres grandes sectores económicos (primario, industria y servicios excluido el transporte), el transporte (privado y comercial) y el doméstico. Podemos ver que, como tendencia, todos los consumos de energía superaron en crecimiento al PIB catalán, un hecho que explica la creciente intensidad energética de la economía catalana.

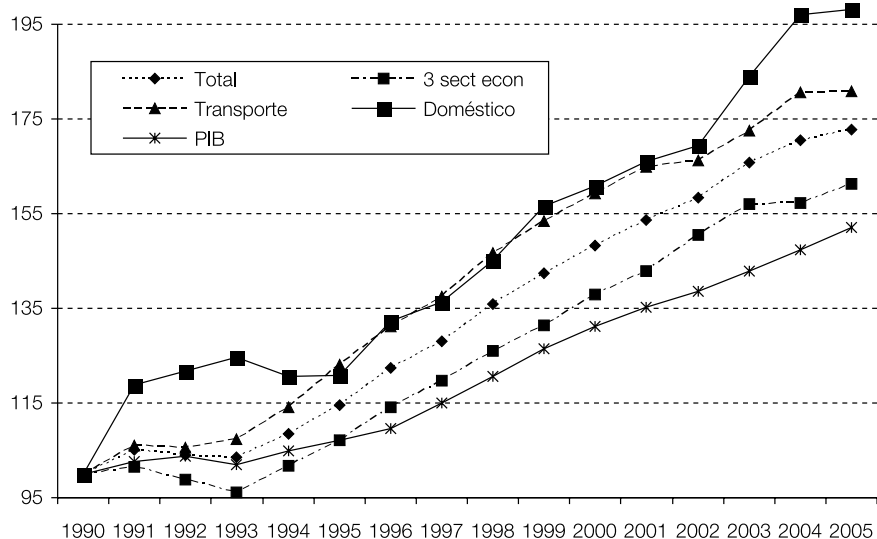
Por lo que se refiere a las formas de energía final utilizadas, el cuadro n.º 2 resume los cambios más significativos.

Podemos ver cómo el consumo final de carbón —ya muy pequeño en 1990— prácticamente desaparece, mientras que las otras formas de energía crecen en valor absoluto. En peso relativo crece sobre todo el uso del gas; la electricidad también aumenta su peso, pero de forma mucho más moderada.

Aunque aquí no haremos un análisis detallado, las dos evoluciones —cambios por actividades y por tipos de consumo final— obviamente se interrelacionan, puesto que las evoluciones en cada sector son diferentes. Mientras que en el transporte, el consumo energético se basa en todo el periodo en la gran dependencia de los productos energéticos, en otros sectores hay importantes sustituciones. Así, el sector industrial reduce de forma importante el uso del carbón no sólo en términos relati-

Gráfico n.º 2

Evolución de los consumos finales de energía total y por sectores y del PIB «real». Cataluña, 1990-2005
(Base 1990=100)



Nota: Para el PIB: serie homogénea a precios constantes.

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

Cuadro n.º 2

Consumos finales de energía según tipo de energía. Cataluña, 1990-2005
(Valores absolutos y proporción respecto al total)

	Media 1990-1992		Media 2003-2005	
	ktep	% del total	ktep	% del total
Carbón	249,5	2,6	25,1	0,2
P. Petrolíferos	5.396,4	56,7	8.155,4	52,1
Gas	1.550,8	16,3	3.552,0	22,7
Residuos no renovables	0,0	0,0	43,6	0,3
Electricidad	2.236,4	23,5	3.744,8	23,9
Renovables	78,5	0,8	140,5	0,9
TOTAL	9.511,6	100,0	15.661,3	100,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

vos sino también absolutos. Tanto en el sector industrial como en el doméstico la forma de energía que tiene un mayor aumento es el gas natural y, en menor medida, la electricidad, mientras que para el sector servicios el aumento se concentra también en estas dos formas de energía, pero mucho más en la electricidad que en el gas natural.

3. DE LOS CONSUMOS FINALES DE ENERGÍA A LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PRIMARIA

3.1. Planteamiento y limitaciones

Tanto la prospectiva sobre usos futuros de energía como la política energética —en el momento de establecer prioridades— han de considerar no sólo cuáles son los consumos finales de energía, sino tener en cuenta el conjunto de requerimientos de energía primaria —su magnitud y su composición— que hacen posible este consumo final de energía. Es este requerimiento de energía primaria el que determina la cantidad total de recursos que tenemos que extraer de la naturaleza (internamente o en otros lugares) y las presiones ambientales generadas.

Por otro lado, es fundamental saber cuáles son las responsabilidades relativas en el uso energético total de los diferentes tipos de actividades. Por ejemplo, es importante saber cuál es y cómo evoluciona el requerimiento de energía del transporte, del consumo residencial o de un determinado sector económico. La aproximación habitual de este análisis consiste en desagregar los datos sobre consumo final de energía tal y como hemos hecho en el apartado anterior. Esta perspectiva da una información importante, pero es insuficiente y puede llevar en

ocasiones a conclusiones erróneas. Para poner un ejemplo, si una familia utiliza una cocina eléctrica y nos limitamos a medir este consumo de energía en forma de electricidad, nos olvidamos de que para obtener esta electricidad se ha tenido que disponer de una cantidad de energía primaria que es muy superior a la energía finalmente obtenida. Si nos fijamos sólo en el consumo final podríamos concluir que un uso creciente de electricidad por parte de los hogares o las industrias para obtener las mismas prestaciones o los mismos productos aumenta la «eficiencia energética», cuando en realidad es posible que las necesidades totales de energía aumenten, si tenemos en cuenta toda la energía primaria disipada. Expresado en otros términos, es importante saber cuál es la energía (primaria) requerida para disponer de la energía utilizada por las industrias, los agricultores, los hogares, los servicios privados y públicos, etc.

Para ello utilizamos un método que es bastante simple pero que permite dar una aproximación (a partir de los datos disponibles en Cataluña) sobre la evolución del total y la composición de la energía primaria necesaria para satisfacer las necesidades de los diferentes sectores económicos. La idea básica es partir de las relaciones energéticas (en términos físicos) input-output que nos proporcionan los balances energéticos de Cataluña para estimar los requerimientos directos e indirectos de energía primaria que producen una unidad de las diferentes formas de energía final. El método fue planteado y aplicado al conjunto de España en Alcántara y Roca (1995) y Alcántara y Roca (2003). Ferng (2001, 2002) también usó este modelo para analizar los usos de energía en Taiwán.

Por ejemplo, por cada kilogramo de equivalente petróleo en forma de electricidad en realidad necesitamos una cantidad de energía mucho más grande, ya que hay que producir más electricidad porque una parte se pierde en las redes de distribución, se consume en las centrales eléctricas, se utiliza para bombear agua que se utilizará para obtener electricidad, etc. Además, y aún más importante, la producción de esta electricidad en gran parte se hace en centrales térmicas (nucleares o alimentadas con combustibles fósiles) en las que la mayor parte de energía primaria se dispersa en forma de calor en el proceso de transformación. De la misma forma, el proceso de transformación de petróleo crudo en sus derivados utiliza energía, de forma que el uso de un kilogramo de equivalente petróleo en forma de productos derivados de petróleo comporta disponer de más de un kilogramo de petróleo crudo.

Seguidamente explicamos el método utilizado y en el subapartado siguiente lo ilustraremos a partir de los datos reales de Cataluña del año 2005.

El primer paso consiste en encontrar los coeficientes de energía (primaria y secundaria) directos por unidad de consumo final que se utilizan en procesos de transformación, consumos internos o en pérdidas de distribución. Estos serían los componentes de la matriz A de coeficientes energéticos, donde A es una matriz cuadrada de orden n ($n \times n$), siendo n el número total de tipos de energía (primaria y secundaria) considerados.

Como es habitual en la perspectiva input-output, si queremos calcular las necesidades totales —directas e indirectas— para disponer de una unidad de energía en sus diversas formas —por ejemplo, en forma de electricidad— tendremos que calcular la

matriz inversa $(I - A)^{-1}$ donde I representa la matriz unitaria de orden n . Como la matriz obtenida contendrá fuentes de energía primarias y secundarias, para evitar dobles contabilidades nos limitaremos a considerar las filas correspondientes a fuentes primarias de energía y las columnas correspondientes a energías secundarias. Hay que aclarar que algunas energías aparecerán con el mismo nombre como fuentes energéticas primarias y secundarias, como es el caso del carbón o el gas natural, mientras que otras sólo aparecerán como primarias (por ejemplo, nuclear) o secundarias (por ejemplo, electricidad). A esta matriz la denominamos T —matriz de transformación de consumos finales de energía a energías primarias— y es de orden $j \times k$ donde j es el número de fuentes primarias consideradas (carbón, nuclear, etc.) y k es el número de energías finales consideradas.

Los requerimientos de energía primaria de un periodo desagregados por fuentes y sectores responsables pueden expresarse como una matriz E ($j \times s$) donde s es el número de sectores o actividades considerados (industrial, doméstico, transporte, etc.).

$$E = T * P * \hat{C} \quad (1)$$

T representa la matriz de transformación, P es una matriz que representa los pesos relativos de cada forma de energía final en las diferentes actividades y es de orden $k \times s$. $\hat{C}$ es una matriz diagonal que tiene por diagonal principal los consumos finales de cada actividad y es de orden $s \times s$.

Antes de pasar al ejemplo numérico señalaremos algunas limitaciones de este método. La primera es que un análisis más completo requeriría tener en cuenta que parte de los usos que aquí se consideran como «finales» son en realidad utilizados para proveer al «sector energético», como es el caso de la

energía utilizada para producir los inputs industriales que se utilizan por parte de las centrales térmicas o en el transporte de carburantes. Esta limitación sólo podría superarse utilizando las tablas input-output del conjunto de la economía (que para la economía catalana reciente sólo están disponibles para el año 2001⁷ y, además, requeriría disponer de una desagregación de los datos sectoriales de uso de energía superior a la que tenemos). Como consecuencia, estamos infravalorando la «energía requerida para disponer de energía», que en algunos casos puede ser muy importante. Un caso particular, ya apuntado anteriormente, es el de una fuente energética hoy en día de muy poca importancia cuantitativa, pero que puede adquirir un peso creciente: se trata de los llamados «cultivos energéticos» o agrocombustibles. El motivo es que el sector agrario no se incorpora dentro de los balances energéticos, al considerarse un sector no energético, pero consume una cantidad de energía considerable para la producción de la cosecha que se considera «energía primaria». Otro ejemplo es el de la energía fotovoltaica, sobre la que se ha discutido mucho acerca de la relación entre energía obtenida para consumo final y energía invertida; ésta última, utilizada, por ejemplo, en la manufactura de componentes, no es captada en este método.

Una segunda limitación proviene del ámbito territorial. Como partimos de los balances energéticos de Cataluña, sólo disponemos de información sobre la energía importada, transformada y utilizada en este ámbito. Así, no consideramos, por ejemplo, los gastos energéticos de extraer y transportar el petróleo o el carbón que se impor-

ta por la comunidad autónoma⁸. Esta es una razón adicional por la que nuestros cálculos infravaloran la energía necesaria para disponer de energía. De hecho, tampoco se están teniendo en cuenta los consumos energéticos producidos fuera de Cataluña para todos los bienes (energéticos o no) que se importan, de forma que si el «coste energético» de los bienes importados es superior al «coste energético» de los exportados, estaremos infravalorando el impacto asociado. A pesar de su relevancia para la valoración de los impactos ambientales atribuibles a la comunidad catalana, esto queda fuera del alcance de este estudio.

En último lugar, nuestra perspectiva es muy agregada, de forma que, por ejemplo, considera implícitamente que cualquier usuario de electricidad arrastra las mismas necesidades de energía primaria por cada Kwh. utilizado y esto no siempre es así. Por ejemplo, las instalaciones industriales que autoproducen electricidad o las casas aisladas con células fotovoltaicas no son responsables de las pérdidas de distribución y éstas también son diferentes según la tensión a que se distribuye electricidad.

3.2. Aplicación del modelo al análisis de los consumos finales y requerimientos de energía primaria en Cataluña, 2005

La matriz del cuadro n.º 3 resume la información que hemos obtenido a partir de

⁷ Para un análisis sobre las posibilidades de ampliar las tablas input-output de Cataluña para el análisis energético y ambiental véase Alcántara (2003).

⁸ Estos gastos se podrían estimar si supiéramos la procedencia de las importaciones, los consumos energéticos de la extracción en los lugares de origen, los consumos de transformación y los de transporte. La importación (neta) de electricidad y de derivados de petróleo de Cataluña solamente la valoramos, como veremos en el siguiente apartado, como si fuera una fuente de energía primaria por su contenido energético.

los balances energéticos del año 2005. Las «entradas» se consideran en sentido muy amplio, incluyendo las siguientes partidas de los balances energéticos: los «consumos en transformación» en sentido estricto, los «consumos propios del sector energético» y las «pérdidas de transporte y distribución». Tanto el «consumo total de energía» como las «necesidades de energía» suman fuentes primarias y secundarias, de forma que para saber cuánta energía primaria se utiliza hemos de evitar esta doble contabilidad.

La economía catalana importa y exporta productos refinados del petróleo y electricidad. Consideramos que una unidad importada se compensa con una unidad exportada, de forma que nos centramos sólo en conocer cuál es el saldo neto⁹. Cuando el saldo es importador no podemos dejar de considerar, obviamente, que esta entrada de energía supone una mayor disponibilidad de energía primaria. Esto puede hacerse de dos formas. La primera opción, que es la que aquí hemos utilizado (como hace el ICAEN en sus balances), es tratar estas importaciones como una fuente de energía primaria valorada por su contenido energético, de forma que tendríamos dos nuevas fuentes de energía primaria: el saldo neto de electricidad importada y el saldo neto de derivados del petróleo importados; a pesar de ello no debe olvidarse que en realidad los derivados de petróleo y, sobre todo, la electricidad se obtienen a partir de la transformación de las energía primarias. La segunda opción consistiría en estimar cuánta

energía primaria es necesaria para obtener estas energías. Cuando el saldo es exportador no aparece el problema señalado y en este caso consideramos —como es lógico— que esta energía exportada no forma parte de los requerimientos de energía primaria de Cataluña¹⁰.

En el cuadro n.º 4 reproducimos la matriz de relaciones directas A , donde los coeficientes se han calculado dividiendo las entradas por la disponibilidad total de cada una de las formas de energía, es decir, la suma de la requerida como input de los procesos de extracción, distribución y transformación energética más la destinada al consumo final (o a usos no energéticos o a exportación neta).

La matriz del cuadro n.º 5 es la matriz inversa $(I - A)^{-1}$ pero suprimiendo las columnas que sólo corresponden a energías primarias y las filas que sólo corresponden a energías finales. Es la matriz que efectivamente utilizamos para «traducir» los consumos finales en energías primarias. Tiene tantas filas como energías primarias consideradas y tantas columnas como energías secundarias consideradas (recuérdese que algunas formas de energía aparecen con el mismo nombre como primarias y secundarias).

Los resultados para el año 2005 muestran que por cada unidad consumida de electricidad debemos considerar una equivalencia de algo más de 2,5 unidades de energía primaria. La composición de esta energía primaria fue la siguiente: más de la

⁹ No obstante, mientras que la electricidad se puede considerar un producto homogéneo (y aún en este caso lo que importa es disponer de electricidad en un momento determinado del tiempo y por tanto un Kwh. generado en un momento no es lo mismo que un Kwh. generado en otro momento), los derivados del petróleo son productos muy heterogéneos y esto explica los fuertes saldos importadores y exportadores que se dan.

¹⁰ De hecho, en coherencia con nuestro método, en cálculos posteriores consideramos que toda la energía primaria necesaria utilizada en Cataluña para disponer de la energía (neta) exportada forma parte de los requerimientos de energía primaria de fuera de Cataluña. En cualquier caso, la diferencia para el periodo analizado es casi insignificante cuantitativamente.

Cuadro n.º 3
Entradas y salidas de energía en Cataluña, 2005
(en ktep)

	Carbón	Petróleo	Salido ref. Petróleo	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Solar fotov.	Eólica	Nuclear	Hidráulica	Salido elec. import.	Residuos renovables	Residuos no renovables	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad	Consumos intermedios	Consumo final	Usos no energéticos	Salido energético exportador	CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA
Carbón	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	237,2	237,2	24,2	0,0	0,0	261,3
Petróleo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,194,9	0,0	9,194,9	0,0	0,0	0,0	9,194,9
Salido ref. Petróleo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,950,9	0,0	3,950,9	0,0	0,0	0,0	3,950,9
Gas natural	0,0	0,0	0,0	45,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	69,7	3,004,5	3,120,1	3,632,0	11,0	0,0	6,763,1
Biomasa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	95,2	0,0	0,0	95,5
Solar térmica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	6,2
Solar fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4
Eólica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,8	20,8	0,0	0,0	0,0	20,8
Nuclear	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,231,0	5,231,0	0,0	0,0	0,0	5,231,0
Hidráulica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	323,5	323,5	0,0	0,0	0,0	323,5
Salido Elec. Import.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	599,6	599,6	0,0	0,0	0,0	599,6
R. Renovables	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	117,2	117,2	0,0	0,0	0,0	117,2
R. No renovables	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,6	12,6	44,4	0,0	0,0	57,0
Bioetanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,6	0,0	0,0	21,6
Biodiésel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	32,4	50,4
Biogás	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,1	29,1	8,9	0,0	0,0	38,0
Ref. Petróleo	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,867,7	207,8	1,576,6	8,219,0	3,388,6	0,0	13,134,2
Electricidad	0,5	0,5	0,0	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,5	598,8	657,1	3,873,5	0,0	0,0	4,530,6
Consumos intermedios	1,6	0,5	0,0	52,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,633,7	10,382,6	25,071,0	15,943,0	3,349,6	32,4	44,396,1

.../...

Cuadro n.º 3 (continuación)
Entradas y salidas de energía en Cataluña, 2005
(en ktep)

	USOS TOTALES ENERGÍA (PRIMARIA Y SECUNDARIA)																	CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA					
	Producción	Carbón	Petróleo	Saldo ref. Petróleo	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Solar fotov.	Eólica	Nuclear	Hidráulica	Saldo elec. import.	Residuos renovables	Residuos no renovables	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad	Consumos intermedios	Consumo final	Usos no energéticos	Saldo energético exportador
19.293,9																							
25.102,2	Saldo Importador de energía																						
44.396,1	Necesidades de energía																						
26.698,9																							

(*) Total primaria es la suma de los consumos totales de energía excluyendo las fuentes secundarias (refinados de petróleo y electricidad) para evitar una doble contabilidad; al mismo resultado se llega sumando las necesidades de energía, de nuevo excluyendo las fuentes secundarias. Del total se excluye también el saldo energético exportador de biodiésel, que no forma parte de la energía primaria utilizada en Cataluña.

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN. Para el significado de esta matriz véase la explicación metodológica del texto.

Cuadro n.º 4

Matriz de relaciones energéticas directas

	Carbón	Petróleo	Saldo refinados de petróleo	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Solar fotovolta.	Eólica	Nuclear	Hidráulica	Saldo import. electricidad	Residuos renovables	Residuos no renovables	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad
Carbón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,052
Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0
Saldo refinado del petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,301	0
Gas natural	0	0	0	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0,663
Biomasa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
Solar térmica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solar fotovolta.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
Eólica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005
Nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,155
Hidráulica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,071
Saldo import. de electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,132
Residuos renovables	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,026
Residuos no renovables	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003
Bioetanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiésel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogás	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,006
Refinados de petróleo	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,104	0,046
Electricidad	0,002	0,000	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,132

Nota: En este cuadro y los siguientes, los valores 0 y 1 sin decimales se usan cuando el valor es exacto; en los otros casos hemos conservado los valores decimales, incluso en los casos en los que los tres primeros valores son nulos.

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN. Para el significado de esta matriz véase la explicación metodológica del texto.

Cuadro n.º 5

Matriz de necesidades de energía primaria ligadas a los diferentes tipos de consumos finales de energía. Cataluña, 2005

	Carbón	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Residuos no renovables	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad
Carbón	1,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,060
Petróleo	0,003	0,000	0	0	0	0	0	0	0,782	0,042
Saldo ref. Petróleo	0,001	0,000	0	0	0	0	0	0	0,336	0,018
Gas natural	0,001	1,008	0	0	0	0	0	0	0,009	0,771
Biomasa	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Solar térmica	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Solar fotovoltaica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Eólica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,005
Nuclear	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0	0,006	1,332
Hidráulica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,082
Saldo Elec. Import.	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,001	0,153
Residuos renov.	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,030
Residuos no renov.	0,000	0,000	0	0	1	0	0	0	0,000	0,003
Bioetanol	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Biodiésel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Biogás	0,000	0,000	0	0	0	0	0	1	0,000	0,007
Total primaria	1,009	1,009	1	1	1	1	1	1	1,134	2,503

Nota: Para el significado de esta matriz, véase la explicación metodológica del texto.

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

mitad en forma de calor nuclear (1,332); el gas natural tiene también un papel considerable (0,771); una importancia mucho más pequeña tuvieron el saldo eléctrico importador (0,153), la hidroelectricidad (sólo 0,082)¹¹ y el carbón y el conjunto «petróleo y sus derivados importados» (0,06 en los

dos casos); las otras fuentes tuvieron un papel marginal. Podemos hacer el mismo tipo de análisis para los derivados del petróleo, para los cuales, evidentemente, la relación entre energía primaria total/consumo final es mucho más pequeña y las necesidades se concentran, como es lógico, de forma prácticamente total en petróleo crudo y en derivados importados ya transformados. Para diferentes formas de con-

¹¹ No olvidemos la forma de contabilización: véase nota 2.

sumo —como agrocarburos— debido a las características del modelo no captamos los gastos energéticos (véase nota 5) y para el caso del carbón y el gas natural aparecen muy infravalorados, ya que los consumos asociados a la extracción se hacen principalmente en otros territorios. Estas son, no obstante, limitaciones ya señaladas anteriormente¹².

3.3. Los cambios en las matrices de transformación de Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005

En este subapartado nos referiremos a los cambios en las matrices de transformación de energía final a requerimientos de energía primaria que se han producido en todo el periodo considerado. En vez de considerar el año 2005 y el año 1990, hemos preferido utilizar las medias de los tres primeros y de los tres últimos años con el fin de que los datos no se vean muy influidos por factores muy específicos de un año concreto, como pueden ser una excepcionalmente alta o baja producción hidroeléctrica o un saldo de importación-exportación excepcional.

¹² Recordemos que hemos considerado los saldos netos importadores de electricidad y derivados de petróleo como si fuesen fuentes primarias (por su valor energético). Como ya habíamos señalado, una opción consistiría en estimar cuánta energía primaria es necesaria para obtener estas energías secundarias obtenidas en el exterior. Ello requeriría información sobre las tecnologías energéticas de los lugares de exportación pero también podría hacerse el supuesto de la misma tecnología, con lo que en realidad estaríamos calculando más bien la energía que nos ahorraríamos —dadas nuestras tecnologías— por no llevar a cabo los procesos de transformación. Haciendo el ejercicio obtendríamos para la electricidad que en el año 2005 1 unidad de electricidad arrastra en total 2,778 unidades de energía primaria (y no 2,503); para los derivados de petróleo el resultado sería 1,204 (en vez de 1,134).

Con el método explicado anteriormente hemos llegado a las matrices de transformación de los cuadros n.º 7 y n.º 8. El cambio más relevante es la disminución en la energía primaria que estimamos que se ha utilizado de media para obtener una unidad de electricidad; de 2,96 a 2,59. Detrás de esta disminución puede haber fenómenos muy diferentes. Así, una mejora en la eficiencia en la distribución de electricidad que hubiera disminuido las pérdidas influiría en esta dirección. El otro factor clave tiene que ver con cuáles son las fuentes de energía primaria a partir de las cuales se obtiene electricidad. En este sentido, el cambio más importante en la composición media por fuentes de energía primaria que se utilizan para obtener una unidad de electricidad ha sido que mientras que para cada unidad de electricidad a principios de los noventa se gastaban 2,41 unidades de calor nuclear, ahora —debido al menor peso relativo de la energía nuclear en el *mix* eléctrico— se gastan 1,56; en cambio, las necesidades de gas natural han aumentado claramente de 0,12 unidades a 0,65 unidades, reflejando el creciente peso de las centrales térmicas de este combustible. Este cambio de energía nuclear a gas reduce las pérdidas de la transformación de calor en electricidad, dada la mayor eficiencia de las centrales actuales de gas. Todas las otras variaciones en la composición del *mix* eléctrico son de menor cuantía: el carbón, el total «crudo y saldo importador de derivados» y la hidroelectricidad disminuyen, mientras que aumentan el saldo eléctrico importador, los recursos renovables (incineradoras de residuos), el biogás y la energía eólica. Los saldos importadores de electricidad también aumentan su peso y este es otro de los factores (pero no el único) que contribuye —en este caso de

Cuadro n.º 6

Matriz de necesidades de energía primaria ligadas a los diferentes tipos de consumos finales de energía. Cataluña, 1990-1992

	Carbón	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Residuos no renov.	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad
Carbón	1,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,090
Petróleo	0,002	0,006	0	0	0	0	0	0	1,156	0,103
Saldo ref. Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gas natural	0,000	1,041	0	0	0	0	0	0	0,000	0,118
Biomasa	0,000	0,000	1	0	0	0	0	0	0,000	0,003
Solar térmica	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Solar fotovoltaica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Eólica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Nuclear	0,007	0,005	0	0	0	0	0	0	0,010	2,407
Hidráulica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,001	0,141
Saldo elec. Import	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,071
Residuos renov.	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,024
Residuos no renov.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Bioetanol	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Biodiésel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Biogás	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Total primaria	1,010	1,053	1	1	1	1	1	1	1,168	2,957

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

forma sólo aparente debido a que no se consideran las transformaciones externas— a la disminución de la energía primaria necesaria para disponer de energía. La reducción de la energía primaria necesaria para disponer de los derivados de petróleo sí que se explica con toda probabilidad por el «ahorro» energético —también aparente— que comporta la importación de productos ya refinados.

4. LOS FACTORES EXPLICATIVOS DE LOS CAMBIOS EN LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PRIMARIA ASOCIADOS AL CONSUMO FINAL

4.1. Método

Desde los años setenta, el análisis energético y ambiental ha utilizado de forma

Cuadro n.º 7

Matriz de necesidades de energía primaria ligadas a los diferentes tipos de consumos finales de energía. Cataluña, 2003-2005

	Carbón	Gas natural	Biomasa	Solar térmica	Residuos no renov.	Bioetanol	Biodiésel	Biogás	Ref. Petróleo	Electricidad
Carbón	1,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,054
Petróleo	0,004	0,000	0	0	0	0	0	0	0,767	0,044
Saldo ref. Petróleo	0,002	0,000	0	0	0	0	0	0	0,351	0,020
Gas natural	0,001	1,009	0	0	0	0	0	0	0,009	0,650
Biomasa	0,000	0,000	1	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Solar térmica	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Solar fotovoltaica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Eólica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,005
Nuclear	0,003	0,002	0	0	0	0	0	0	0,007	1,564
Hidráulica	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,115
Saldo elec. Import.	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,101
Residuos renov.	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0,000	0,034
Residuos no renov.	0,000	0,000	0	0	1	0	0	0	0,000	0,003
Bioetanol	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Biodiésel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Biogás	0,000	0,000	0	0	0	0	0	1	0,000	0,007
Total primaria	1,011	1,011	1	1	1	1	1	1	1,135	2,595

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances de energía facilitados por el ICAEN.

creciente técnicas de descomposición en diversos factores o efectos para analizar los cambios en el uso de energía o en las emisiones contaminantes. Ya hace años, Ang y Zhang (2000) identificaron más de un centenar de estudios en este sentido. Cuando el método que se utiliza es el del enfoque input-output es usual utilizar el término «análisis de descomposición estructural» para referirse a este tipo de descomposi-

ción (Hoekstra, 2005). Como ya hemos indicado, nuestra perspectiva utiliza parcialmente el análisis input-output, ya que parte de la matriz de relaciones energéticas.

Nuestro análisis explica los cambios totales («efecto total») en las necesidades de energía primaria —y en sus componentes— a partir de la descomposición en tres efectos o factores que son: el cambio en el nivel de consu-

mo final de los diferentes sectores («efecto consumo final energía»)¹³, los cambios entre diferentes tipos de energías finales («efecto sustitución») y los cambios en las necesidades de energía primaria para disponer de las energías finales («efecto transformación»)¹⁴.

Como habíamos indicado en un apartado anterior, la matriz de energías primarias de cada período (por fuentes de energía y sectores responsables) puede expresarse como:

$$E = T * P * \hat{C} \quad (1)$$

Donde T representa la matriz de transformación de consumos finales de energía a energías primarias, P es una matriz que representa los pesos relativos de cada forma de energía final en las diferentes actividades y $\hat{C}$ es una matriz diagonal que tiene por diagonal principal los consumos finales de cada actividad.

Las variaciones de los requerimientos de energía primaria entre dos periodos se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} \Delta E = E_1 - E_0 &= T_1 * P_1 * \hat{C}_1 - T_0 * P_0 * \hat{C}_0 = \\ &= \Delta T_{efecto} + \Delta P_{efecto} + \Delta \hat{C}_{efecto} \end{aligned} \quad (2)$$

Los tres efectos corresponden a los que hemos denominado «transformación» (derivados de los cambios en T , «sustitución» (cambios en P) y «consumo final energía» (cambios en $\hat{C}$).

Como se ha discutido en la literatura sobre la descomposición en factores, se podrían adoptar diversas técnicas de descomposición. La más «intuitiva» es calcular cada efecto como los cambios que se hubieran producido si sólo hubiera cambiado el factor considerado manteniéndose los otros invariables en su valor inicial. Sin embargo, esta alternativa —que se llama a menudo de tipo «Laspeyres»— no da una descomposición exacta, de forma que el efecto total normalmente no coincide con la suma de los diferentes efectos considerados (en nuestro caso tres) ya que aparecen interacciones entre los efectos. Esta es la razón principal por la cual muchos estudios aplican otras técnicas de descomposición para obtener una descomposición exacta. Aquí adoptamos la propuesta de Sun (1998) que distribuye los efectos y la interacción entre los diferentes efectos aplicando el principio «conjuntamente creado, igualmente distribuido». Es decir:

$$\begin{aligned} \Delta T_{efecto} &= \Delta T * P_0 * \hat{C}_0 + 1/2(\Delta T * \Delta P * \hat{C}_0) + \\ &+ 1/2(\Delta T * P_0 * \Delta \hat{C}) + 1/3(\Delta T * \Delta P * \Delta \hat{C}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{efecto} &= T_0 * \Delta P * \hat{C}_0 + 1/2(\Delta T * \Delta P * \hat{C}_0) + \\ &+ 1/2(T_0 * \Delta P * \Delta \hat{C}) + 1/3(\Delta T * \Delta P * \Delta \hat{C}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{C}_{efecto} &= T_0 * P_0 * \Delta \hat{C} + 1/2(\Delta T * P_0 * \Delta \hat{C}_0) + \\ &+ 1/2(T_0 * \Delta P * \Delta \hat{C}) + 1/3(\Delta T * \Delta P * \Delta \hat{C}) \end{aligned} \quad (5)$$

¹³ Si bien, cuando presentamos los datos de consumo final de energía, dejamos al margen los usos no energéticos (como es la práctica habitual), ahora, cuando analizamos el «efecto consumo final de energía», éste sí que incluye las variaciones de los «usos no energéticos», para explicar los cambios en los requerimientos de energía primaria.

¹⁴ Es importante destacar que la descomposición en factores es de tipo «contable» más que estrictamente explicativo, ya que se considera como si su evolución fuese independiente. En realidad, los factores pueden verse afectados por la evolución de los otros factores; por ejemplo, una mayor eficiencia en la transformación energética podría estimular una mayor demanda de energía.

4.2. Los factores explicativos de los cambios en los requerimientos de energía primaria asociados al consumo final: Cataluña 1990-1992/2003-2005

Pasaremos ahora a presentar los resultados del análisis de efectos aplicada a los cambios entre la media de los años 1990-1992 y la media de los años 2003-2005.

Para tener en cuenta todos los usos de la energía primaria hemos incorporado no sólo los diferentes sectores de consumo final de energía, sino también los «usos no energéticos» —especialmente los derivados del petróleo utilizados para la industria química— incluyendo no sólo su valor energético, sino también la energía estimada para obtenerlos. No hemos considerado, en cambio, las exportaciones netas de productos energéticos que, de hecho, no forman parte de las necesidades internas de energía primaria y que, en cualquier caso, representan una parte muy pequeña del total y prácticamente no afectan al resultado¹⁵.

En primer lugar, presentamos (cuadro n.º 8) la contribución de los diferentes sectores a los requerimientos de energía primaria en los años iniciales y finales. Si comparamos esta tabla con el cuadro n.º 1, vemos que, lógicamente, todos los datos son superiores en valor absoluto, pero la diferencia es particularmente grande en los servicios y el consumo doméstico; en cambio, para el transporte —que depende mucho menos del uso de electricidad— las diferencias son menos relevantes. En consecuencia, la «responsabilidad» del sector transporte en la demanda de energía primaria¹⁶ para el 2003-2005 es inferior a la de la industria, a diferencia de lo que pasaba en términos de consumo final.

Entre los dos periodos señalados, las necesidades de energía primaria de Cataluña crecieron (en la media anual de los tres

años considerados) en más de 9 millones de teps. El cuadro n.º 9 resume los diferentes efectos que explican este aumento. En este cuadro, la desagregación de los efectos se hace por actividades (o «sectores»). Puede destacarse que —según esta perspectiva— el sector que más contribuye al aumento es el transporte, pero el sector industrial, el de servicios y el doméstico también impulsan considerablemente el crecimiento, como también lo hacen los usos no energéticos. Recordemos que el análisis en términos de energía primaria «amplifica» el papel relativo de los sectores con más peso de demanda eléctrica: si actualmente el consumo final del transporte ya supera al de toda la industria, no es así en cuanto a la energía primaria estimada para proveer el consumo final, que es aún superior en el caso del sector industrial, como se observa en el cuadro n.º 8.

Como era de esperar, el «efecto consumo final energía» —debido al aumento de los consumos finales— es el más importante de los tres con diferencia y para todas las actividades. De los comentarios de un apartado anterior, ya podíamos esperar también que el «efecto transformación» —es decir, de la reducción de la energía primaria necesaria para disponer de una unidad de las diferentes formas de energía final¹⁷— tenga en todos los casos el efecto de disminuir las necesidades de energía primaria, que es más fuerte en aquellos sectores de demanda que más dependen de la electricidad. El «efecto sustitución», que tiene mucha relevancia —como veremos— para explicar las variaciones en los

¹⁵ Para los años 1990-1992 se trata de la exportación de 89,9 kteps de derivados de petróleo y para los años 2002-2005 de 10,8 kteps de biodiesel. Los saldos importadores o exportadores siempre los hemos considerado a partir del total de los tres años.

¹⁶ Sin embargo, recordemos, de nuevo, que no consideramos todo el ciclo del transporte sino sólo la energía necesaria para proveer el consumo energético directo del sector.

¹⁷ Recordemos, no obstante, que una parte de esta mejora no es una reducción genuina de las necesidades de energía primaria, sino que puede ser explicada por un mayor uso de electricidad importada y porque se pasa a un saldo importador de derivados de petróleo.

Cuadro n.º 8

**Requerimientos totales de energía primaria por sectores.
1990-1992 y 2003-2005. Cataluña**

	Media 1990-1992	Media 2003-2005	Variación	
			absoluta	%
Primario	506,0	755,7	249,7	49,3
Industria	5.996,5	8.021,5	2.025,0	33,8
Servicios	1.914,4	3.677,0	1.762,7	92,1
Transporte	4.128,1	6.817,3	2.689,3	65,1
Doméstico	2.336,5	3.503,7	1.167,2	50,0
Usos no energéticos	2.204,6	3.689,0	1.484,4	67,3
Total	17.086,0	26.464,2	9.378,2	54,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

Cuadro n.º 9

**Efectos por sectores. Mediana de 2003-2005 respecto a mediana
de 1990-1992. Cataluña**

	Transformación	Sustitución	Consumo final energía	Total
Cambios en valores absolutos (kteps)				
Primario	-26,7	-1,6	278,0	249,7
Industria	-608,8	-26,0	2.659,9	2.025,0
Servicios	-320,5	75,4	2.007,7	1.762,7
Transporte	-175,0	-28,2	2.892,5	2.689,3
Doméstico	-282,4	-91,7	1.541,3	1.167,2
Usos no energéticos	-85,4	-0,4	1.570,2	1.484,4
Total	-1.498,9	-72,5	10.949,6	9.378,2
Contribución a la variación de la energía primaria (% de la energía primaria inicial total)				
Primario	-0,2	0,0	1,6	1,5
Industria	-3,6	-0,2	15,6	11,9
Servicios	-1,9	0,4	11,8	10,3
Transporte	-1,0	-0,2	16,9	15,7
Doméstico	-1,7	-0,5	9,0	6,8
Usos no energéticos	-0,5	0,0	9,2	8,7
Total	-8,8	-0,4	64,1	54,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

requerimientos de algunas fuentes de energía primaria, tiene, en cambio, muy poca relevancia para explicar los cambios en el total de energía primaria del periodo analizado.

El cuadro n.º 10 muestra el análisis del efecto total y de los diferentes efectos, pero con una desagregación no por actividades sino por fuentes energéticas. Podemos ver como el «efecto consumo final de energía» sobre todo provoca el aumento de necesidades de petróleo crudo (y de los

derivados del petróleo importados), un resultado lógico a causa del papel clave del aumento del uso de energía para el transporte por carretera. Los aumentos de las fuentes de obtención de electricidad (sobre todo nuclear) y de gas natural a consecuencia de este efecto también son remarcables. Por lo que respecta al «efecto sustitución», si bien su efecto sobre el total de energía primaria es muy pequeño, sí que explica una gran parte del aumento de la demanda de gas natural que se debe al

Cuadro n.º 10

Efectos por fuentes energéticas. Cambios en valores absolutos.
Media de 2003-2005 respecto a media de 1990-1992. Cataluña
(kteps)

	Transformación	Sustitución	Consumo final energía	Total
Carbón	-109,6	-288,8	172,7	-225,6
Petróleo	-3.844,7	-637,9	4.733,8	251,2
Saldo ref. Petróleo	3.355,1	-128,8	845,5	4.071,8
Gas natural	1.588,6	929,2	1.727,2	4.245,0
Biomasa	-9,5	-18,5	38,9	11,0
Solar térmica	0,0	3,5	1,0	4,4
Solar fotovoltaica	0,2	0,0	0,1	0,2
Eólica	13,9	0,0	3,5	17,5
Nuclear	-2.561,1	0,3	3.033,0	472,3
Hidráulica	-81,0	0,0	195,7	114,8
Saldo elec. Import.	89,2	0,1	131,3	220,5
R. Renov.	29,6	0,0	44,3	73,9
R. no renov.	10,0	36,7	9,4	56,1
Bioetanol	0,0	17,0	4,5	21,5
Biodiésel	0,0	8,8	2,3	11,1
Biogás	20,4	5,9	6,4	32,6
Total primaria	-1.498,9	-72,5	10.949,6	9.378,2

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

creciente peso relativo del gas natural en el consumo final de industrias, servicios y residencial a costa de los derivados de petróleo y a costa también (en el caso industrial) del carbón. En último lugar, el «efecto transformación» implica —como decíamos— una disminución de los requerimientos totales de energía primaria, pero en términos más desagregados podemos ver cómo hace aumentar los requerimientos de gas natural (ya que este combustible fósil se utiliza mucho más en la producción de energía eléctrica) a costa sobre todo de la energía nuclear que pierde peso relativo (pero no absoluto) en la generación de electricidad; la disminución de las necesidades de petróleo crudo, en cambio, responde básicamente al —antes inexistente— saldo importador de derivados del petróleo ya refinados que en nuestro modelo aparece como una forma de energía primaria para poder disponer de derivados de petróleo. También puede verse cómo el saldo importador de electricidad contribuye más a la oferta eléctrica.

Puede observarse que en los comentarios anteriores no hemos hecho ninguna referencia a fuentes energéticas «nuevas» como la eólica, el biogás o los agrocarburos. La razón es que los comentarios se han centrado en las variaciones más importantes en términos absolutos y, hoy por hoy, estas fuentes, a pesar de su gran incremento, son aún marginales dentro de la oferta total de energía.

En el Anexo I aparecen los cuadros desagregados, combinando sectores de demanda o actividad y fuentes energéticas, que permiten un análisis más detallado de los cambios en la matriz *E* a los cuales nos referíamos y de los tres efectos explicativos combinando las dos variables: tipo de fuente energética y tipo de actividad.

5. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ VINCULADAS AL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA

5.1. Una visión de conjunto

Aunque existen otras fuentes de emisión, las emisiones de CO₂ se explican, principalmente, por el uso de energía. En este apartado y en los siguientes consideraremos, como hemos hecho para la energía primaria, las variaciones entre las medias de los periodos 1990-1992 y 2003-2005 para evitar aspectos muy coyunturales que podrían desvirtuar los resultados.

La base de datos de partida sigue siendo la de los balances energéticos de Cataluña y sólo consideraremos las emisiones de CO₂ relacionadas con el carbón, el petróleo y sus derivados y el gas natural. Otros elementos, como el biogás, biodiesel, y determinados residuos, no han sido tenidos en cuenta dada su poca importancia relativa. Tampoco hemos tenido en cuenta las emisiones asociadas a la importación (neta) de electricidad (emisiones que son generadas en otros países). Nuestras estimaciones son muy similares a las obtenidas en el Plan de la Energía de Cataluña y, por tanto, estas omisiones apenas afectan a los resultados obtenidos.

Por lo que respecta a los factores de emisión, nos hemos basado en IPCC (1997), teniendo en cuenta también la composición media de los carbones utilizados y de los derivados de petróleo importados. En concreto, hemos utilizado los siguientes factores (en toneladas de CO₂ por tep): 4 (carbón), 3,04 (petróleo crudo), 2,34 (gas natural) y 3,12 (saldos derivados del petróleo importados).

Para esta estimación nos basamos en la misma regla explicada anteriormente, es decir, en la energía primaria que «arrastran»

los consumos finales de los diferentes sectores pero añadiendo el factor de emisión de CO₂ de las diferentes energías primarias. Es decir, la matriz Q de emisiones desagregada por fuentes energéticas y sectores responsables es una matriz Q:

$$Q = \hat{F} * E = \hat{F} * T * P * \hat{C} \quad (6)$$

donde Q es, como E, una matriz jxs y $\hat{F}$ es una matriz diagonal jxj que tiene ceros en todos sus elementos excepto en aquellos de la diagonal principal que corresponden a las fuentes de energía cuyas emisiones hemos considerado (carbón, petróleo, derivados de petróleo importados y gas natural), en cuyo caso aparecen los factores de emisión ya especificados.

Un ejemplo destacable es el siguiente: nuestra estimación da las siguientes emisiones medias de CO₂ por unidad de elec-

tricidad (lo que podemos llamar «factor de carbonización») medidas en toneladas de CO₂ por tep: 0,95 (1990-1992) y 1,93 (2003-2005) reflejando el creciente peso relativo de las centrales de gas natural en detrimento de las nucleares.

Como en apartados anteriores, nuestra comparación se refiere a los años 2003-2005 respecto a los años 1990-1992. Las emisiones totales ligadas al uso de energía crecieron en total un 69,2%. En los cuadros n.º 11 y 12 podemos ver cómo dicho aumento se distribuye entre fuentes de energía y según la responsabilidad de los diferentes sectores. Para este último aspecto, los sectores considerados son, como en apartados anteriores, primario, industria, servicios, doméstico y transporte; no hemos considerado, en cambio, los usos no energéticos.

Cuadro n.º 11

Estimación de las emisiones de CO₂ por fuentes de energía primaria

	1990-1992	2003-2005	Variación	
	Miles de toneladas (ktCO ₂)		%	
Carbón	1.808,9	910,1	-898,8	-49,7
Petróleo	19.696,8	19.522,4	-174,4	-0,9
SDP importados	0,0	9.157,8	9.157,8	-
Gas	4.402,1	14.251,5	9.849,4	223,7
Total	25.907,8	43.841,8	17.933,9	69,2
	Distribución sectorial %		% variación respecto a las emisiones totales iniciales	
Carbón	7,0	2,1	-3,5	
Petróleo	76,0	44,5	-0,7	
SDP importados	0,0	20,9	35,4	
Gas	17,0	32,5	38,0	
Total	100,0	100,0	69,2	

Fuente: Elaboración propia a partir de ICAEN.

Cuadro n.º 12

**Estimación de la responsabilidad de los diferentes sectores
en las emisiones de CO₂**

	1990-1992	2003-2005	Variación	
	Miles de toneladas (ktCO ₂)			%
Primario	1.336,7	2.062,4	725,7	54,3
Industria	8.304,7	12.696,8	4.392,2	52,8
Servicios	1.531,4	3.935,4	2.404,0	157,0
Transporte	12.034,3	20.217,3	8.182,9	68,0
Doméstico	2.700,7	4.929,9	2.229,1	82,5
Total	25.907,8	43.841,8	17.933,9	69,2
	Distribución sectorial %		% variación respecto a las emisiones totales iniciales	
Primario	5,2	4,7	2,8	
Industria	32,1	29,0	17,0	
Servicios	5,9	9,0	9,3	
Transporte	46,5	46,1	31,6	
Doméstico	10,4	11,2	8,6	
Total	100,0	100,0	69,2	

Fuente: Elaboración propia a partir de ICAEN.

Como vemos, las emisiones ligadas al uso de la energía han aumentado considerablemente. El comportamiento por fuentes energéticas era previsible dado el análisis anterior: la contribución más importante (más de la mitad del aumento) es debida al uso de gas natural, y la segunda —un poco menos importante— es debida al uso de petróleo, con la particularidad de que este aumento es totalmente achacable a las importaciones de derivados del petróleo. No sorprende la contribución negativa del carbón, ya que ha perdido importancia como fuente de energía primaria. Estas evoluciones no deben obviamente interpretarse en el sentido de que el mayor peso del gas natural implique mayores emisio-

nes, porque es necesario comprobar las sustituciones que se han producido tanto en el consumo final como en la transformación energética; no obstante, estas cuestiones se pondrán de manifiesto en el análisis posterior.

Por lo que se refiere a las actividades, queda claro que el transporte es el gran responsable de las emisiones de CO₂ en Cataluña, que son casi la mitad del total. Sin embargo, son los servicios y los hogares los que más han incrementado su responsabilidad en las emisiones (sobre todo emisiones generadas en la obtención de electricidad). Así, el sector servicios ha pasado de representar el 5,9% en 1990-1992

al 9% en 2003-2005, una variación de 3 puntos (prácticamente la disminución de la industria) mientras que no llega al 1% el aumento del peso relativo de los hogares.

5.2. Efectos explicativos de la evolución de las emisiones de CO₂ vinculadas al uso de energía

La descomposición en factores explicativos de la evolución de las emisiones de CO₂ sigue el mismo método aplicado en el caso de la energía primaria, pero aplicando ahora el cálculo de las emisiones correspondientes por lo cual no repetiremos las expresiones ya vistas en el apartado 4 y a

las que sólo hay que añadir que cada término aparece multiplicado por la matriz diagonal de factores de emisión.

En los cuadros n.º 13 y 14 aparece la descomposición por efectos desagregada según dos perspectivas: la sectorial y la de las fuentes de energía que provocan las emisiones; en el Anexo II puede verse la desagregación cruzando las dos perspectivas.

Desde el punto de vista agregado, el efecto absolutamente dominante es el del consumo final de energía. Los efectos transformación y sustitución son de mucha menor cuantía. El primero actúa haciendo disminuir las emisiones, lo que contrasta con lo visto en el caso de la energía prima-

Cuadro n.º 13

Efectos explicativos de la contribución sectorial a la variación de las emisiones

	Transformación	Sustitución	Consumo final energía	Total
Cambios en valores absolutos, miles de toneladas (ktCO ₂)				
Primario	-3,8	-17,0	746,4	725,7
Industria	1.141,8	-685,8	3.936,2	4.392,2
Servicios	777,8	-231,1	1.857,3	2.404,0
Transporte	-259,7	-63,8	8.506,5	8.182,9
Doméstico	579,9	-318,5	1.967,7	2.229,1
Total	2.236,1	-1.316,2	17.014,1	17.933,9
Contribución a la variación de la energía primaria (% de las emisiones totales iniciales)				
Primario	0,0	-0,1	2,9	2,8
Industria	4,4	-2,6	15,2	17,0
Servicios	3,0	-0,9	7,2	9,3
Transporte	-1,0	-0,2	32,8	31,6
Doméstico	2,2	-1,2	7,6	8,6
Total	8,6	-5,1	65,7	69,2

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

Cuadro n.º 14

**Efectos explicativos de la contribución de las fuentes de energía primaria
a la variación de las emisiones**

Cambios en valores absolutos, miles de toneladas (ktCO₂)

	Transformación	Sustitución	Consumo final energía	Total
Carbón	-436,7	-1.150,0	687,8	-898,8
Petróleo	-8.658,4	-1.929,3	10.413,4	-174,4
SDP importados	7.663,7	-399,9	1.894,0	9.157,8
Gas natural	3.667,5	2.162,9	4.018,9	9.849,4
Total	2.236,1	-1.316,2	17.014,1	17.933,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE e ICAEN.

ria: ello se explica sobre todo porque el cambio más relevante en este terreno es el creciente peso relativo de las centrales de gas natural (más eficientes) a expensas de la energía nuclear lo que disminuye el coste energético medio de obtener electricidad, pero aumenta la intensidad media de emisiones de CO₂ por unidad de electricidad. En cambio, el efecto sustitución hace disminuir las emisiones, dado que el gas natural sustituye sobre todo a carbón y petróleo y sus emisiones por unidad de energía son significativamente inferiores.

Podemos ahora abordar el análisis desde el punto de vista de los sectores de actividad aquí considerados. Por sectores, la contribución más importante al crecimiento de las emisiones corresponde con diferencia al sector transporte (el incremento del transporte es casi el doble que el de la industria). En cambio, los aumentos asignados a los sectores servicios y doméstico son mucho más moderados. Para explicarlo es importante tener en cuenta que —en Cataluña— el mismo aumento de consumo

final de energía comportaría un mayor aumento de las emisiones en los casos de la industria y del transporte que en el doméstico y, sobre todo, los servicios, mucho más dependientes del uso de electricidad. Otro aspecto que podemos ver en el análisis sectorial es cómo el efecto sustitución que disminuye las emisiones es particularmente importante para el sector industrial, aunque también relevante para los sectores de servicios y doméstico. No obstante, como muestra el «efecto transformación», el incremento muy elevado de los consumos de energía eléctrica compensó ampliamente en todos estos sectores el «efecto sustitución» positivo. En el sector transporte, cuyas emisiones están totalmente dominadas por el uso de derivados de petróleo en los desplazamientos por carretera, los efectos sustitución y transformación tienen un papel muy pequeño.

Por lo que se refiere a la procedencia de las emisiones, el petróleo y sus derivados importados pueden verse como un conjunto cuyas emisiones aumentan como era de

esperar de forma muy considerable, dado el papel predominante del transporte en el incremento en el uso de la energía. Sin embargo, las emisiones de gas natural impulsadas por los tres efectos aún aumentan más. En el caso del carbón, en cambio, las emisiones totales disminuyen y ello se explica sobre todo por su sustitución en el consumo final por otras formas de energía.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado, en primer lugar, la evolución del consumo final de energía durante el período 1990-2005 en Cataluña y hemos analizado cómo los consumos finales de energía crecen por encima del crecimiento del PIB en términos reales. Los aumentos relativos más importantes se producen en el sector servicios, doméstico y en el transporte. Es esta última actividad (que incluye el transporte privado y el comercial) la que experimenta un mayor aumento en términos absolutos, hasta llegar a representar un consumo final de energía superior incluso al del sector industrial.

Si en vez de hacer el análisis en cuanto a consumo final de energía, lo hacemos en cuanto a los requerimientos de energía primaria que permiten este consumo final de energía, podemos ver que el transporte, a pesar de su gran importancia, «arrastra» menos energía primaria que el sector industrial.

En el conjunto del periodo analizado, la energía primaria necesaria para disponer de las diferentes formas de energía final experimenta cambios significativos. El cambio más relevante es la disminución en la energía primaria que estimamos se utiliza de media para obtener una unidad de electricidad —de 2,96 los años 1990-1992 a 2,59 los

años 2003-2005— y aún más importante es el cambio en la composición media por fuentes de energía primaria que se utiliza para obtener una unidad de electricidad; mientras que para cada unidad de electricidad a principios de los noventa se gastaban 2,41 unidades de calor nuclear, en los años finales del estudio —debido al menor peso relativo de la energía nuclear en el *mix* eléctrico— se gastaban 1,56; en cambio, las necesidades de gas natural aumentaron claramente: de 0,12 unidades a 0,65 unidades, reflejando el creciente peso de las centrales térmicas de este combustible.

Los importantes cambios en las necesidades totales de energía primaria de Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005 han sido analizados mediante una descomposición en tres efectos o factores: efecto consumo final de energía (debido a los cambios en los niveles de consumo final de energía), efecto sustitución (debido a los cambios en la composición del consumo final de energía) y efecto transformación (debido a los cambios en la matriz de transformación energética que relaciona consumos finales de energía con requerimientos de energía primaria).

El efecto consumo final de energía es el más importante de los tres con diferencia y para todas las actividades. El efecto consumo final de energía provoca un aumento de los requerimientos de todas las fuentes energéticas, pero particularmente del petróleo, debido al papel del transporte y también a la creciente demanda de derivados de petróleo para «usos no energéticos».

El efecto transformación hace disminuir las necesidades de energía primaria, y esta disminución es más fuerte en aquellos sectores de demanda que más dependen de

la electricidad. El efecto sustitución, que tiene mucha relevancia para explicar las variaciones en los requerimientos de algunas fuentes de energía primaria no es, en cambio, demasiado relevante para explicar los cambios en el total de energía primaria para el periodo analizado.

Los requerimientos de energía primaria que más crecen son los de gas natural, debido a que tanto el efecto transformación (mayor proporción de producción eléctrica en térmicas de gas) como el «efecto sustitución» (creciente peso relativo del gas natural en el consumo final de industrias, servicios y residencial) son importantes y se suman al efecto consumo final energía. En cambio, el uso de energía nuclear aumenta poco en términos absolutos debido a que el efecto transformación (pérdida de peso relativo de la electricidad de origen nuclear) actúa en dirección contraria al efecto consumo final de energía. La única fuente de energía primaria que disminuye en términos absolutos es el carbón y eso es debido a que el efecto transformación (menor uso en el sector energético) y sustitución (menor uso en el consumo final) más que contra-

rrestan el efecto consumo final de energía. Por último, hay que destacar cómo en los años 2003-2005 hay una importante dependencia de la importación de derivados del petróleo ya refinados, mientras que en el conjunto del periodo 1990-1992 el saldo global de estos derivados en unidades energéticas fue exportador.

Seguidamente, hemos analizado la evolución de las emisiones de CO₂, el más importante de los gases de efecto invernadero asociadas al uso de energía. Hemos comparado también los años 2003-2005 con los años 1990-1992 y hemos seguido exactamente la misma metodología de descomposición en efectos.

Gran parte de los resultados en términos de emisiones se deduce directamente del análisis energético, por lo que ahora no repetiremos lo analizado pero sí destacaremos las diferencias que quedan resumidas en el cuadro n.º 15.

Lo primero a constatar es que las emisiones de CO₂ aún aumentan más que la energía primaria utilizada a pesar del gran aumento de ésta. Un factor, poco importante

Cuadro n.º 15

**Contribución al incremento de las necesidades de energía primaria
y las emisiones de CO₂ por efectos explicativos**
(en %)

	Transformación	Sustitución	Consumo final energía	Total
Energía primaria	-8,8	-0,4	64,1	54,9
Emisiones de CO ₂	8,6	-5,1	65,7	69,2

Nota: En el análisis de la energía primaria están incluidos los «usos no energéticos». De no incluirse los datos cambiarían ligeramente con un aumento total no del 54,9% sino del 53%

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE e ICAEN.

cuantitativamente que actúa en este sentido, es que el efecto consumo final de energía es un poco mayor en las emisiones, debido al papel preponderante del transporte.

Pero el factor clave para explicar la diferencia es el efecto transformación que, desde la perspectiva del CO₂, ha tenido un papel negativo, contribuyendo al incremento de las emisiones en un 8%, aunque, desde la perspectiva de la energía primaria, las necesidades para transformación disminuyeron. La razón principal es el peso decreciente de la energía nuclear respecto a la producción de electricidad en centrales térmicas de gas natural; éstas tienen una mayor eficiencia en la conversión de calor a electricidad, pero emiten CO₂, a diferencia de las nucleares que (directamente) no emiten este gas. Este es un buen ejemplo de las diferentes conclusiones que a veces podemos extraer de un análisis en términos de energía primaria o de emisiones de carbono. (Y también un buen ejemplo, aunque éste es otro tema, de cómo unas presiones ambientales pueden disminuir a costa de que aumenten otras).

Por otro lado, la sustitución de combustibles en el consumo final —en favor básicamente

del gas natural— ha jugado un papel favorable a la disminución de las emisiones, mientras que fue más o menos neutral respecto a las necesidades totales de energía primaria, pero insuficiente para compensar el «efecto transformación».

Por lo que se refiere a la descomposición por actividades, todos los sectores aumentaron sus emisiones (teniendo en cuenta siempre la energía primaria «arrastrada») pero es el transporte el que explica más del 45% del aumento, una proporción aún mucho mayor que la que supone en el aumento de las demandas energéticas.

Una conclusión es que en el caso de Cataluña —como en el conjunto de España y a diferencia de otros países ricos— no es posible hablar de desvinculación entre crecimiento económico y uso de energía, ni mucho menos entre crecimiento económico y emisiones de CO₂, ni siquiera en «sentido relativo» o «débil» (es decir, de reducción de la intensidad energética o de la intensidad de carbono; Roca y Alcántara, 2001). Este artículo contribuye, a profundizar en las causas de esta evolución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÁNTARA, V. (2003): «Comptabilitat satèl·lit del medi ambient». (<http://www.idescat.net/cat/idescat/formaciorecerca/formacio/CS%20Medi%20Ambient.pdf>).
- ALCÁNTARA, V. Y ROCA, J. (1995): «Energy and CO₂ emissions in Spain. Methodology of analysis and some results for 1980–90». *Energy Economics*, vol. 17,3: 221–230.
- 2003: «Consumo energético y actividad económica: Sobre el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input-output». Campos PALACÍN, P. Y. CASADO RAIGÓN J. M (coord.). *Contabilidad Nacional Ambiental Integrada*, Consejo General de Colegios de Economistas de España, Madrid: 163–178.
- ANG, B. Y ZHANG, F.Q. (2000): «A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies». *Energy*, vol. 25: 1149–1176.
- ESTEVAN, A. (2005): «Modelos de transporte y emisiones de CO₂ en España». *Revista de Economía Crítica*, n. 4: 67–87.
- FERNG, J.J. (2001): «Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity.» *Ecological Economics*, vol. 37: 159–172.
- 2002: «Toward a scenario analysis framework for energy footprints.» *Ecological Economics*, vol. 40: 53–69.
- HOEKSTRA, R. (2005): *Economic Growth, Material Flows and the Environment*. Edward Elgar, Cheltenham.
- IPCC (1997): «Revised 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory», IPCC, disponible en: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invslohtm
- ROCA, J. Y ALCÁNTARA, V. (2001): «Energy intensity, CO₂ emissions and the environmental Kuznets curve. The Spanish case», *Energy Policy*, vol. 29/7, Julio: 553–556.
- SUN, J.W. (1998): «Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model». *Energy Economics*, 20: 85–100.

ANEXOS

Anexo I

Tablas detalladas sobre descomposición en diferentes efectos de los cambios en los requerimientos de energía primaria en Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005

333

Efecto total (Ktep)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Usos no energéticos	Suma
Carbón	-0,2	-231,1	15,0	-0,9	-7,6	-0,9	-225,6
Petróleo	6,3	-326,7	-72,3	525,2	-189,9	308,6	251,2
Saldo ref. Petróleo	201,0	459,7	93,6	2043,3	137,6	1.136,6	4.071,8
Gas natural	34,3	2.083,5	970,8	91,6	1.028,9	35,8	4.245,0
Biomasa	1,7	-37,8	7,5	-0,2	39,7	0,0	11,0
Solar térm.	0,0	0,1	0,7	0,0	3,5	0,0	4,4
Solar fotov.	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2
Eólica	0,2	7,6	5,3	0,4	3,8	0,1	17,5
Nuclear	0,4	-140,2	563,3	-11,4	57,7	2,5	472,3
Hidráulica	0,9	29,8	59,7	1,4	22,4	0,5	114,8
Saldo elec. Import.	2,1	86,2	79,8	4,6	46,9	0,8	220,5
R. Renov.	0,7	28,9	26,8	1,5	15,7	0,3	73,9
R. No renov.	0,1	49,1	3,8	0,3	2,7	0,0	56,1
Bioetanol	0,0	0,0	0,0	21,5	0,0	0,0	21,5
Biodiésel	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	11,1
Biogás	2,1	15,7	8,5	0,6	5,6	0,1	32,6
Total primaria	249,7	2.025,0	1.762,7	2.689,3	1.167,2	1.484,4	9.378,2

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN y de la metodología explicada en el texto.

Anexo I (continuación)

Tablas detalladas sobre descomposición en diferentes efectos de los cambios en los requerimientos de energía primaria en Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005

Efecto transformación (Ktep)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Usos no energéticos	Suma
Carbón	-1,1	-50,6	-30,1	-2,8	-24,5	-0,4	-109,6
Petróleo	-185,6	-537,8	-134,3	-1798,6	-191,9	-996,5	-3.844,7
Saldo ref. Petróleo	166,3	430,6	91,8	1.620,2	147,3	898,8	3.355,1
Gas natural	19,6	699,0	435,9	70,2	342,5	21,3	1.588,6
Biomasa	-0,1	-4,4	-2,6	-0,2	-2,1	0,0	-9,5
Solar térm.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Solar fotov.	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Eólica	0,1	6,4	3,8	0,4	3,1	0,1	13,9
Nuclear	-26,8	-1.183,5	-703,9	-66,0	-572,1	-8,8	-2.561,1
Hidráulica	-0,8	-37,5	-22,2	-2,1	-18,1	-0,3	-81,0
Saldo elec. Import.	0,9	41,1	24,6	2,3	19,9	0,3	89,2
R. Renov.	0,3	13,6	8,2	0,8	6,6	0,1	29,6
R. No renov.	0,1	4,6	2,7	0,3	2,2	0,0	10,0
Bioetanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biodiésel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogás	0,2	9,4	5,6	0,5	4,6	0,1	20,4
Total primaria	-26,7	-608,8	-320,5	-175,0	-282,4	-85,4	-1.498,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

Anexo I (continuación)

Tablas detalladas sobre descomposición en diferentes efectos de los cambios en los requerimientos de energía primaria en Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005

Efecto sustitución (Ktep)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Usos no energéticos	Suma
Carbón	0,0	-277,9	2,3	-1,0	-10,7	-1,3	-288,8
Petróleo	-8,7	-250,5	-136,3	-14,6	-224,5	-3,3	-637,9
Saldo ref. Petróleo	-1,7	-49,5	-28,7	-2,9	-45,3	-0,7	-128,8
Gas natural	6,4	573,5	112,8	-2,6	234,2	4,9	929,2
Biomasa	1,5	-59,5	6,8	0,0	32,7	0,0	-18,5
Solar térm.	0,0	0,1	0,6	0,0	2,8	0,0	3,5
Solar fotov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eólica	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0
Nuclear	-0,5	-2,4	104,0	-29,1	-71,7	0,0	0,3
Hidráulica	0,0	-0,2	6,8	-1,9	-4,7	0,0	0,0
Saldo elec. Import.	0,0	-0,1	4,7	-1,3	-3,2	0,0	0,1
R. Renov.	0,0	0,0	1,6	-0,4	-1,1	0,0	0,0
R. No renov.	0,0	36,7	0,1	0,0	-0,1	0,0	36,7
Bioetanol	0,0	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	17,0
Biodiésel	0,0	0,0	0,0	8,8	0,0	0,0	8,8
Biogás	1,5	3,8	0,7	-0,1	-0,1	0,0	5,9
Total primaria	-1,6	-26,0	75,4	-28,2	-91,7	-0,4	-72,5

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

Anexo I (continuación)

Tablas detalladas sobre descomposición en diferentes efectos de los cambios en los requerimientos de energía primaria en Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005

Efecto consumo final energía (Ktep)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Usos no energéticos	Suma
Carbón	1,0	97,4	42,9	3,0	27,6	0,8	172,7
Petróleo	200,6	461,7	198,3	2.338,5	226,4	1.308,4	4.733,8
Saldo ref. Petróleo	36,4	78,6	30,5	426,0	35,6	238,5	845,5
Gas natural	8,2	811,0	422,1	24,1	452,2	9,7	1.727,2
Biomasa	0,3	26,1	3,3	0,1	9,1	0,0	38,9
Solar térm.	0,0	0,0	0,2	0,0	0,7	0,0	1,0
Solar fotov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Eólica	0,0	1,2	1,4	0,1	0,8	0,0	3,5
Nuclear	27,7	1.045,7	1.163,1	83,6	701,5	11,4	3.033,0
Hidráulica	1,8	67,5	75,1	5,4	45,2	0,7	195,7
Saldo elec. Import.	1,2	45,2	50,5	3,6	30,2	0,5	131,3
R. Renov.	0,4	15,3	17,0	1,2	10,2	0,2	44,3
R. No renov.	0,0	7,8	1,0	0,1	0,6	0,0	9,4
Bioetanol	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	4,5
Biodiésel	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	2,3
Biogás	0,4	2,5	2,2	0,1	1,2	0,0	6,4
Total primaria	278,0	2.659,9	2.007,7	2.892,5	1.541,3	1.570,2	10.949,6

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.

Anexo II

Tablas detalladas sobre descomposición en diferentes efectos de los cambios en las emisiones de CO₂ en Cataluña entre 1990-1992 y 2003-2005**Efecto total (ktCO₂)**

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Total
Carbón	-0,69	-927,68	59,23	-3,50	-31,22	-903,87
Petróleo	19,12	-992,91	-219,75	1.596,56	-577,37	-174,37
Saldo ref. Petróleo	626,97	1434,12	291,89	6.374,37	429,28	9.156,64
Gas natural	80,09	4.869,24	2.268,84	214,14	2.404,63	9.836,95
Total	725,49	4.382,78	2.400,20	8.181,57	2.225,32	17.915,35

Efecto transformación (ktCO₂)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Total
Carbón	-4,58	-202,31	-120,35	-11,30	-97,81	-436,34
Petróleo	-564,01	-1634,85	-408,19	-5.467,12	-583,18	-8.657,35
Saldo ref. Petróleo	619,10	1.614,86	344,13	6.012,67	555,45	9.146,22
Gas natural	45,88	1.633,65	1.018,82	164,04	800,53	3.662,92
Total	96,41	1.411,36	834,41	698,29	674,98	3.715,45

Efecto sustitución (ktCO₂)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Total
Carbón	-0,07	-1.110,97	9,01	-4,17	-42,95	-1.149,16
Petróleo	-26,54	-761,39	-414,45	-44,44	-682,26	-1.929,08
Saldo ref. Petróleo	-6,12	-174,71	-100,62	-10,21	-159,22	-450,87
Gas natural	15,04	1.340,33	263,61	-6,13	547,36	2.160,22
Total	-17,68	-706,74	-242,44	-64,95	-337,08	-1.368,89

Efecto consumo final de energía (ktCO₂)

	Primario	Industria	Servicios	Transporte	Doméstico	Total
Carbón	3,99	389,67	171,53	12,06	110,39	687,65
Petróleo	609,66	1.403,33	602,89	7108,12	688,07	10.412,06
Saldo ref. Petróleo	129,27	280,49	109,53	1513,00	127,94	2.160,23
Gas natural	19,17	1.895,26	986,40	56,23	1.056,74	4.013,81
Total	762,08	3.968,75	1.870,35	8.689,41	1.983,15	17.273,74

Fuente: Elaboración propia a partir de los balance de energía facilitados por el ICAEN.