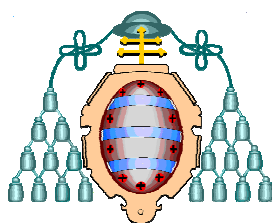


UNIVERSIDAD DE OVIEDO



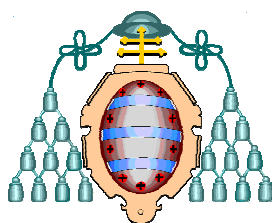
**PROGRAMA DE DOCTORADO DE
ECONOMÍA APLICADA**

**TÉCNICAS DE DESCOMPOSICIÓN DE
VARIACIONES BASADAS EN
ÍNDICES DE DIVISIA.
ALGUNAS APLICACIONES
MEDIOAMBIENTALES**

Paula Fernández González

2012

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

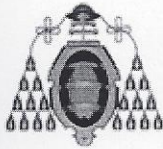


**PROGRAMA DE DOCTORADO DE
ECONOMÍA APLICADA**

**TÉCNICAS DE DESCOMPOSICIÓN DE
VARIACIONES BASADAS EN
ÍNDICES DE DIVISIA.
ALGUNAS APLICACIONES
MEDIOAMBIENTALES**

**Memoria presentada por D^a. Paula Fernández González y
dirigida por los Doctores Manuel Landajo Álvarez y M^a.
José Presno Casquero para optar al grado de Doctora.**

Oviedo, 2012



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: TECNICAS DE DESCOMPOSICION DE VARIACIONES BASADAS EN INDICES DIVISIA. ALGUNAS APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES.	Inglés: DIVISIA-INDEX-BASED TECHNIQUES FOR DECOMPOSITION OF VARIATIONS. SOME ENVIRONMENTAL APPLICATIONS
2.- Autor	
Nombre: PAULA FERNANDEZ GONZALEZ	
Programa de Doctorado: ECONOMIA APLICADA	
Órgano responsable: ECONOMIA APLICADA	

RESUMEN (en español)

En esta tesis se estudian las principales técnicas de descomposición, tanto paramétricas como no paramétricas, basadas en números índices de tipo Divisia. Estos métodos descomponen, aditiva y multiplicativamente, la variación de indicadores tales como valores absolutos, ratios y elasticidades, asociados a las magnitudes en estudio. En la primera parte del trabajo se analizan un conjunto de estos métodos y se propone una alternativa basada en el uso de splines, derivando formalmente diversas propiedades matemáticas y estadísticas de la misma. En la segunda parte de la memoria se aplica la metodología expuesta al análisis de las variaciones de diversas magnitudes energéticas y medioambientales, incluyendo la intensidad de energía eléctrica de la industria española, las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero, y el consumo de energía de la Unión Europea.

RESUMEN (en Inglés)

The main Divisia-index-based decomposition techniques, both parametric and non-parametric, are studied in this thesis. These methods allow both additive and multiplicative decomposition of changes of indicators (such as absolute values, ratios and elasticities) associated with the variables under study. In the first part of the work a number of Divisia-index-based methods are analysed, and an alternative based on splines is outlined, and its main mathematical and statistical properties are formally derived. In the second part of the thesis, these methods are applied in order to analyse changes in a number of energy and environmental magnitudes, including electricity intensity in Spanish industry, the carbon dioxide and greenhouse gas emissions, and energy consumption in the European Union.

AGRADECIMIENTOS

Debo reconocer mi deuda con un conjunto de personas de cuyo apoyo incondicional he gozado a lo largo de la elaboración de este trabajo. Mi labor se ha visto enormemente facilitada y mejorada gracias a su ayuda, a su asesoramiento y a su permanente aliento. Por ello, debo mi gratitud:

A los Doctores D. Manuel Landajo Álvarez y D^a. M^a José Presno, por la constancia, dedicación y disponibilidad que han mostrado durante la dirección de esta tesis, así como por su colaboración activa en la misma. Ellos han despertado mi curiosidad por la investigación de la técnica, me han recordado la preocupación por el rigor del análisis sin olvidar la finalidad práctica del estudio y, en definitiva, me han guiado y orientado con gran profesionalidad y calidez en la elaboración de esta memoria.

Al Doctor D. Rigoberto Pérez Suárez, que ha permitido amablemente la utilización de resultados elaborados conjuntamente con la doctoranda y publicados en la revista *Energy* (Fernández y Pérez, 2003).

Al Doctor D. Esteban Fernández Vázquez, que ha autorizado amablemente el uso de algunos resultados elaborados conjuntamente con la doctoranda y publicados en la revista *Energy Economics* (Fernández y Fernández, 2008).

A mis compañeros del área de Estadística y Econometría y del departamento de Economía Aplicada por su disponibilidad y por sus constantes muestras de ánimo.

A mis compañeros de la Facultad de Economía y Empresa y a todos aquellos que se han interesado por el desarrollo del trabajo.

A la Dra. Pilar Valladares Rodríguez y a su equipo de la planta A10 por sus buenos consejos y enseñanzas.

A mi familia, en especial a Pablo, por su apoyo y paciencia.

Sin la ayuda de todas estas personas – y de otras muchas, omitidas por brevedad, pero no por ello olvidadas – este texto no existiría. Los errores e imperfecciones que en el mismo haya son ya de la sola responsabilidad de su autora.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN Y PLAN GENERAL	viii
--	-------------

PARTE 1. METODOLOGÍA

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y EXPOSICIÓN DE LA METODOLOGÍA	1
1.1. Introducción	2
1.2. Revisión de la literatura	3
1.3. Metodología basada en índices tipo Divisia	7
1.3.1. Introducción. Técnicas de descomposición estructural y en índices	7
1.3.2. Descomposición del cambio experimentado por un indicador	8
1.3.3. Tipos de descomposición: aditiva y multiplicativa	9
1.3.4. Técnicas de descomposición basadas en índices tipo Divisia	10
1.3.4.1. Métodos Divisia paramétricos. Algunos métodos clásicos	12
1.3.4.2. Método Divisia no paramétrico. El enfoque LMDI	17
1.3.5. Descomposición en distintos niveles de desagregación de la información	19
1.3.6. Descomposición en series temporales	20

CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MATEMÁTICAS Y ESTADÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN	23
2.1. Introducción	24
2.2. Reconstrucción de trayectorias mediante interpolación. El método de los splines naturales	25
2.3. Propiedades matemáticas. Convergencia	30
2.3.1. La descomposición aditiva	31
2.3.2. La descomposición multiplicativa	36
2.4. Comportamiento en ambiente estocástico	37
2.5. Conclusiones	40
Anexo I: Demostraciones matemáticas del Capítulo 2	42

PARTE 2. APLICACIONES

CAPÍTULO 3. DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS EMISIONES TOTALES DE CO₂ DE LA UE-27 EN EL PERÍODO 2001-2008	54
3.1. Introducción	55
3.2. Exposición de la metodología	56
3.2.1. Descomposición multiplicativa mediante el método LMDI	56

3.2.2. Descomposición aditiva mediante el método LMDI	60
3.3. Análisis empírico: la variación de las emisiones totales de CO₂ en la UE-27	60
3.3.1. Resultados de la descomposición multiplicativa	61
3.3.2. La descomposición aditiva	65
3.4. Conclusiones	72
CAPÍTULO 4. DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA UE-15 EN LOS AÑOS 90. EL MÉTODO DE SUN Y EL MÉTODO BASADO EN LA TRAYECTORIA	74
4.1. Introducción	75
4.2. Exposición de la metodología	76
4.2.1. El método de descomposición de Sun	78
4.2.2. El método basado en la trayectoria	80
4.3. Análisis de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero de la UE-15 en los años 90	86
4.3.1. Contribuciones de los cambios en los factores	87
4.3.2. Comparación con una descomposición en series anuales	91
4.4. Conclusiones	98

CAPÍTULO 5. DESCOMPOSICIÓN MULTINIVEL DE LA VARIACIÓN DEL CONSUMO AGREGADO DE ENERGÍA. ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ENERGÍA Y PROYECCIONES DE DEMANDA EN LA UE-27	101
5.1. Introducción	102
5.2. Exposición de la metodología	103
5.2.1. El enfoque del consumo de energía. Versión multiplicativa	103
5.2.1.1. Descomposición en series temporales	106
5.2.1.2. Descomposición multinivel	107
5.2.2. El enfoque de la elasticidad. Proyección de la demanda energética	109
5.3. La variación del consumo agregado de energía y la demanda de energía en la UE-27 en el período 2001-2008	111
5.3.1. Descomposición multinivel de la variación del consumo agregado de energía	112
5.3.1.1. Nivel de desagregación III (país)	113
5.3.1.2. Nivel de desagregación II	116
5.3.1.3. Nivel de desagregación I	118
5.3.2. El enfoque de la elasticidad de energía	121
5.4. Análisis de resultados	127

CAPÍTULO 6. DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD AGREGADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA EN LOS AÑOS 80	130
6.1. Introducción	131
6.2. Exposición de la metodología	132
6.2.1. Versión multiplicativa del enfoque de la intensidad	132
6.2.2. Descomposición en series temporales	136
6.2.3. Descomposición multinivel	136
6.3. Análisis de la variación de la intensidad de energía eléctrica industrial en España en los años 80	138
6.3.1. Análisis gráfico	139
6.3.2. Descomposición en un nivel de desagregación (grupo)	142
6.3.2.1. Aplicación de técnicas basadas en índices tipo Divisia	142
6.3.2.2. Descomposición mediante MSN	151
6.3.3. Descomposición en dos niveles de desagregación (grupo y sector)...	156
6.4. Conclusiones	159
Anexo II: Clasificación industrial y gráficos a nivel de sector	162
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	167
CONTENIDO E INSTRUCCIONES DEL DVD-ROM	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180

INTRODUCCIÓN Y PLAN GENERAL

El concepto de desarrollo sostenible nos conduce a una forma de progreso que pretende satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin menoscabar la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. Grandes actores internacionales como la Unión Europea intentan establecer estrategias a largo plazo que combinen políticas para el desarrollo sostenible desde los puntos de vista medioambiental, económico y social, a fin de mejorar el bienestar y las condiciones de vida tanto de las generaciones presentes como de las futuras.

Las series históricas atestiguan una fuerte correlación entre la disponibilidad de energía, la actividad económica y las mejoras en el nivel de vida y el bienestar social. La energía es un agente básico en la generación de riqueza (Nathwani *et al.*, 1992), con lo que el sector energético desempeña un papel de importancia fundamental en el desarrollo económico, y las medidas a tomar en este sector deben ser compatibles con los principios básicos de competitividad, seguridad de abastecimiento y protección medioambiental, buscando siempre un crecimiento sostenible.

Tras la crisis del petróleo de los años 70, la mayor parte de los países desarrollados han sufrido un importante giro hacia industrias menos intensivas en energía. Los factores que podrían explicar este cambio son la creciente preferencia por parte del consumidor hacia servicios y productos poco intensivos en materiales y energía (Williams *et al.*, 1987), la emergencia de nuevos y mejores materiales (Gardner y Robinson, 1993), los diseños novedosos de los productos, que tratan de reducir la necesidad de energía para la obtención del producto

terminado (Ross *et al.*, 1987), los cambios en los patrones de comercio (como la penetración en los mercados nacionales de materiales básicos provenientes de otros países), el precio de la energía (Gardner y Elkhafit, 1998) o incluso el propio crecimiento económico, puesto que las industrias intensivas en energía son generalmente sensibles a la inversión en infraestructuras y maquinaria. En este trabajo abordaremos este tipo de cuestiones, centrandó nuestra atención tanto en los problemas medioambientales como en los energéticos.

En el Protocolo de Kioto (1997), sucesor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992), los países industrializados se comprometen a reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero con efecto sobre el calentamiento global. En particular, las emisiones totales de los países desarrollados deben reducirse durante el periodo 2008-2012 al menos en un 5% respecto a los niveles de 1990. Para lograr sus objetivos, el Protocolo propone una serie de medios, incluyendo el establecimiento o refuerzo de las políticas nacionales de reducción de las emisiones (aumento de la eficacia energética, fomento de formas de agricultura sostenible, desarrollo de fuentes de energías renovables, entre otras) y la cooperación con las otras partes contratantes (intercambio de experiencias e información, coordinación de las políticas nacionales por medio de permisos de emisión, puesta en práctica conjunta y mecanismos de desarrollo limpio).

Entre los cinco objetivos que la Unión Europea plantea como estrategia de crecimiento en 2011, y que deberán ser alcanzados en 2020, se encuentra el cumplimiento de los objetivos de energía y cambio climático, para los que cada estado miembro formulará sus

propios planes y acciones. Si cumplir estos objetivos es uno de los pilares de la estrategia de crecimiento, se entiende que existen interacciones entre los fenómenos medioambientales, sociales y económicos. Por tanto, el desarrollo de indicadores capaces de recoger dichas interacciones se torna de sumo interés para diseñar proyectos cuyo impacto energético y medioambiental pueda ser evaluado. Nosotros trataremos de limitar nuestro estudio a este espacio, analizando el impacto que sobre algunas variables energéticas y medioambientales relevantes tienen otras variables energéticas, medioambientales o económicas.

El objetivo principal de la mayoría de los estudios de descomposición es la cuantificación de los factores subyacentes que contribuyen a los cambios en los indicadores a lo largo del tiempo. Nuestro objetivo en esta tesis es el estudio, comparación y desarrollo de técnicas de descomposición basadas en índices de tipo Divisia, con el propósito de descomponer en diferentes factores las variaciones que experimenta una magnitud. Estas técnicas harán posible la identificación, medida e interpretación del impacto de los factores que influyen sobre agregados medioambientales tan relevantes como el consumo de energía, la eficiencia energética interpretada en sentido amplio como intensidad de energía (cantidad de energía utilizada por unidad de producto) y las emisiones de gases de efecto invernadero, permitiendo a su vez el diseño y desarrollo de políticas que ayuden a su control. La eficiencia energética se ha convertido en un factor clave para el desarrollo económico y social de un país y es una componente fundamental en cualquier programa medioambiental (Jollands *et al.*, 1996). La reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, entre los que se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), contribuye notablemente a la sostenibilidad del desarrollo

económico y es uno de los principales objetivos de la comunidad internacional. Parece pues que un análisis de estos agregados medioambientales resulta de gran interés y podría conducir a conclusiones que ayuden a establecer líneas de actuación medioambiental.

Este trabajo se estructura en una primera parte de carácter teórico, que comprende los Capítulos 1 y 2, en la que se plantea el problema desde un punto de vista metodológico. La segunda parte, que incluye los Capítulos 3 a 6, es de carácter empírico, y en la misma se llevan a cabo diversas aplicaciones de la teoría a los ámbitos de la energía y el medio ambiente. En la última parte se recogen una serie de conclusiones y se plantean diversas líneas de investigación futura.

En el Capítulo 1 se lleva a cabo una revisión de la literatura sobre las técnicas de descomposición de las variaciones de un indicador, presentando una panorámica general de la metodología basada en índices tipo Divisia y analizando con más detalle algunos métodos particulares.

Por lo que respecta al Capítulo 2, en él se propone un nuevo enfoque, que denominamos *método de los splines naturales* (MSN), para la descomposición de la variación de un indicador. Este enfoque se fundamenta en la reconstrucción, a partir de un número finito de observaciones discretas, de las trayectorias temporales de las componentes del indicador. Dicha aproximación se lleva cabo mediante técnicas clásicas de interpolación basadas en splines. Deduciremos teoremas límites que garantizan la convergencia, tanto determinista como estocástica, hacia las magnitudes teóricas de la teoría de Divisia en tiempo continuo. Nuestro análisis se centrará en

el problema de la descomposición de la variación de una ratio (intensidad de energía eléctrica) en dos factores (efecto estructural y efecto intensidad), aunque los resultados obtenidos son de validez para el caso general de la descomposición en un número arbitrario finito de factores, así como en la descomposición de la variación de funcionales que verifiquen condiciones de diferenciabilidad apropiadas.

La segunda parte se abre con el Capítulo 3, en el que nos ocupamos de la descomposición de las variaciones de las emisiones de CO₂ en los países de la UE-27, así como de la explicación de los factores que influyen en dicha variación entre los años 2001 y 2008. Aunque lo habitual en la literatura medioambiental y energética es la descomposición en dos o tres factores determinantes (*e.g.*, Liu, 2007), autores como Ang (1999) o Cheng y Rhee (2001) han realizado descomposiciones incluyendo cuatro efectos (actividad, estructural, intensidad y carbonización). En este capítulo proponemos una descomposición alternativa en cinco factores que se corresponderían con los efectos denominados población, renta per cápita, intensidad, mezcla de combustibles y carbonización.

Para llevar a cabo la descomposición aplicamos una metodología basada en índices de Divisia con función de pesos de tipo media logarítmica (también denominado método *LMDI* o de *Divisia refinado*). Al objeto de comprender mejor los resultados obtenidos, incluimos en nuestro análisis la evolución de los precios de los distintos tipos de combustible, así como las diferencias interregionales en el crecimiento por habitante.

En el Capítulo 4 se considera en primer lugar un enfoque alternativo al LMDI: el *método basado en la trayectoria* (BT; Fernández, 2004). Además se aplica el método de descomposición propuesto por Sun (1998). Ambas técnicas se basan en la especificación previa de la trayectoria temporal de los factores y dan lugar a descomposiciones exhaustivas. El método de Sun distribuye el término residual asumiendo el principio de “creados conjuntamente e igualmente distribuidos”, mientras que el enfoque de la trayectoria es más general y flexible, permitiendo aprovechar la posible información adicional de períodos intermedios. Esta información adicional se utiliza en un procedimiento de estimación de máxima entropía que permite obtener estimaciones de los parámetros que determinan las trayectorias temporales seguidas por los factores de la descomposición. El capítulo incluye también una aplicación en la que se descomponen aditivamente los cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE-15 entre 1990 y 2002. En la misma se utilizan los métodos de Sun, BT y LMDI. Adicionalmente, se comparan los resultados bajo distintas situaciones informativas de partida, según se conozcan los datos correspondientes a todos los períodos intermedios, se disponga de cierta información parcial, o se posean únicamente datos relativos a los períodos extremos. Nuestro análisis extiende resultados previos que obtuvimos en colaboración con el Dr. Esteban Fernández Vázquez, de la Universidad de Oviedo, y publicados en la revista *Energy Economics* (Fernández y Fernández, 2008).

En el Capítulo 5 se plantea la descomposición multiplicativa en series temporales de la variación del consumo agregado de energía en tres efectos (actividad, estructural e intensidad). La descomposición se lleva a cabo mediante el método LMDI y se realiza para el conjunto

de los países la UE-27 en el período 2001-2008. Uno de los objetivos del estudio es analizar la sensibilidad de los resultados del mismo ante distintos niveles de desagregación espacial de la información. En la literatura medioambiental y energética, los estudios multinivel realizan descomposiciones únicamente en dos factores; en este capítulo introducimos un tercer factor.

En una segunda parte del mismo capítulo, y como una extensión multiplicativa del *enfoque del consumo de energía*, propuesto en su versión aditiva por Liu *et al.* (1992), se aplica el denominado *enfoque de la elasticidad de la energía* (Ang, 1995). Nuestro propósito es doble: analizar los coeficientes de energía estimados y elaborar proyecciones para la demanda energética. Asumiendo una tasa constante de crecimiento anual, nos plantearemos diferentes escenarios y obtendremos predicciones que son de interés práctico para el diseño de políticas energéticas y ambientales.

Cerrando la parte dedicada a las aplicaciones, ubicamos el Capítulo 6. En él abordamos otra descomposición basada en índices tipo Divisia, que aplicamos a la cuantificación de los factores que contribuyeron a la variación de la intensidad de la energía eléctrica agregada consumida por la industria española entre 1979 y 1992. Siguiendo el denominado *enfoque de la intensidad de energía* (Ang, 1994), se aplican varios métodos particulares de descomposición multiplicativa, considerando diversos niveles de desagregación. Asimismo, se lleva a cabo un análisis gráfico de la evolución de los precios de la electricidad en este período, como apoyo a la hora de extraer conclusiones. El estudio se lleva a cabo aplicando tanto los métodos convencionales tipo Divisia como los derivados de la teoría basada en splines naturales propuesta en el Capítulo 2, realizándose una

comparación de los resultados proporcionados por los diversos enfoques. Este capítulo amplía y desarrolla resultados preliminares obtenidos en colaboración con el Dr. Rigoberto Pérez Suárez, de la Universidad de Oviedo, que aparecieron publicados en la revista *Energy* (Fernández y Pérez, 2003).

Finalmente, en el epígrafe de Conclusiones y Líneas Futuras se recogen los principales resultados del presente trabajo, así como diversas vías de investigación abiertas que consideramos de interés potencial para desarrollos futuros.

CAPÍTULO 1.

REVISIÓN DE LA LITERATURA Y EXPOSICIÓN DE LA METODOLOGÍA

1.1. Introducción

1.2. Revisión de la literatura

1.3. Metodología basada en índices tipo Divisia

1.3.1. Introducción. Técnicas de descomposición estructural y en índices

1.3.2. Descomposición del cambio experimentado por un indicador

1.3.3. Tipos de descomposición: aditiva y multiplicativa

1.3.4. Técnicas de descomposición basadas en índices tipo Divisia

1.3.4.1. Métodos Divisia paramétricos. Algunos métodos clásicos

1.3.4.2. Método Divisia no paramétrico. El enfoque LMDI

1.3.5. Descomposición en distintos niveles de desagregación de la información

1.3.6. Descomposición en series temporales

CAPÍTULO 1.

REVISIÓN DE LA LITERATURA Y EXPOSICIÓN DE LA METODOLOGÍA

1.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de analizar y comprender los cambios históricos en los indicadores económicos, medioambientales, socio-económicos y energéticos, resulta útil identificar, separar y evaluar las fuerzas macroeconómicas que contribuyen a dichos cambios. Las técnicas de descomposición de la variación experimentada por un indicador que se recogen en la literatura son básicamente cuatro: (a) análisis econométrico, (b) análisis con datos agregados, (c) análisis basado en índices (*Index Decomposition Analysis*, o IDA) y (d) análisis estructural (*Structural Decomposition Analysis*, o SDA).

El análisis de descomposición econométrico presenta la limitación potencial de que suele quedar limitado a la estimación de los efectos de primer nivel a través de variables explicativas de segundo nivel (e.g., Panayotou, 1997; Bruyn *et al.*, 1998). En cambio, las otras tres técnicas permiten separar los diferentes componentes de una identidad dada con el fin de analizar, desde la estática comparativa, en qué medida la variación de dichos componentes puede haber contribuido al cambio en el indicador seleccionado. De entre estos tres últimos tipos de técnicas, el análisis de descomposición con datos agregados es el más sencillo, al considerar las variables agregadas y no introducir información específica (e.g., la identidad de Kaya, 1990). Por el contrario, el análisis de descomposición estructural y el análisis de descomposición basado en números índices permiten utilizar datos de desagregación sectorial.

Teniendo en cuenta el objetivo planteado en nuestro estudio, centraremos nuestra atención en este tipo de técnicas. En particular, nos basaremos en el enfoque IDA, por ser el más habitual en los estudios medioambientales y energéticos y poseer ciertas ventajas sobre el SDA: permite tanto descomposiciones aditivas como multiplicativas, posibilita descomposiciones para cualquier tipo de agregado (valor, ratio o elasticidad), y requiere menor información de partida en los estudios multi-país.

Dentro del análisis de descomposición de índices enfocaremos nuestro trabajo en una metodología específica basada en índices tipo Divisia. Este tipo de índice es habitualmente utilizado en el ámbito de la descomposición medioambiental. Autores como Ritcher (1966) o Hulten (1973) han demostrado que el índice de Divisia verifica las propiedades de proporcionalidad, homogeneidad e invarianza y que -si fuera independiente de la trayectoria- podría asegurarse que es igual o superior a cualquier otro índice.

1.2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Desde la década de 1980 se han publicado numerosos trabajos basados en índices tipo Divisia. Desde un punto de vista empírico, los trabajos de Jenne y Cattell (1983), Reitler *et al.* (1987), Boyd *et al.* (1988), Chen y Rose (1989), Park *et al.* (1991), Greening *et al.* (1997), Gardner y Elkhafif (1998), Nag y Parikh (2000), Zhang (2003), Lee y Oh (2006), Hatzigeorgiou *et al.* (2008), Ma y Stern (2008), Wood (2009), Sahu y Narayanan (2010) o Shahiduzzaman y Alam (2012) han explotado diversas técnicas de descomposición basadas en índices tipo Divisia.

Desde el punto de vista metodológico, autores como Hulten (1987), Boyd *et al.* (1987), Liu *et al.* (1992), Ang (1994, 1995, 2005), Ang y Lee (1994), Ang y Choi (1997), Sun (1998), Sun y Ang (2000), Albrecht *et al.* (2002), Fernández y Fernández (2008) o Choi y Ang (2012) se han preocupado de introducir un marco conceptual que permite la formulación teórica de estos métodos y valida su aplicación práctica.

Boyd *et al.* (1987) analizan la metodología aplicada por los distintos autores hasta el momento, fundamentada básicamente en el trabajo con series de datos económicos de consumo de energía, producción e insumos industriales, y proponen una metodología alternativa basada en la clase de índices que se derivan de las propuestas de F.L. Divisia (1925). En el mismo trabajo incluyen una relación de los estudios en los que se analiza la tendencia de la demanda de energía en la industria, identificando (a) el impacto de la intensidad de energía real, como consecuencia de la mejora en la eficiencia energética (la cual se define como cantidad de energía utilizada por dólar o tonelada de acero de bienes de equipo producidos), y (b) el impacto del cambio sectorial, el cual es consecuencia del cambio en la estructura productiva industrial, al desplazarse la producción desde los sectores más intensivos en energía hacia otros menos intensivos.

Más recientemente, Liu *et al.* (1992) proponen el denominado "enfoque del consumo de energía", el cual se basa en dos métodos paramétricos generales de Divisia y en la descomposición aditiva de los cambios en el consumo agregado de energía en las contribuciones de las variaciones de tres factores: producción, estructura productiva e intensidades sectoriales de energía. Dada la imposibilidad práctica de conseguir información sobre la evolución en tiempo continuo de las variables relevantes, Liu *et al.* (1992) transforman el problema continuo en uno

discreto, derivando los dos métodos paramétricos generales que hemos mencionado. En función de las distintas ponderaciones que se asignen a las magnitudes en cada instante, es posible obtener, a su vez, distintos métodos particulares, que pueden conducir a resultados y conclusiones parcialmente diferentes en los análisis empíricos (*problema de la no unicidad*).

Por otra parte, en la aplicación de estos métodos aparece el inconveniente potencial de la existencia de un término residual, el cual hace que, en general, la variación del agregado no coincida con la suma o el producto de las componentes de dicho agregado. En principio, parece deseable que la descomposición sea exacta o completa, es decir, que no aparezca desviación de la suma o producto de sus componentes con respecto al agregado. En este sentido, un criterio útil para la selección del método de descomposición se basa en la desviación entre el término residual y su valor objetivo. Una gran desviación implica que una parte importante de la variación observada en la intensidad de energía agregada no viene explicada por ninguna de las componentes consideradas, lo cual podría afectar al propósito de la descomposición. Por el contrario, una desviación relativamente pequeña podría aparecer en dos situaciones bien distintas. Por un lado, podría ocurrir que la variación en el agregado viniese bien explicitada por las componentes, pero también podría ocurrir que se estuviesen cometiendo errores elevados en cada una de las componentes y que éstos se compensasen por agregación. Con todo ello, y aunque nada asegura la bondad de la descomposición, en principio resultarán más interesantes aquellos métodos que conduzcan a una menor desviación del término residual.

Ang (1994) plantea el denominado "enfoque de la intensidad de consumo", descomponiendo aditiva y multiplicativamente las variaciones en la ratio entre consumo de energía y producción, en

términos de las contribuciones de los efectos estructural e intensidad. Ang (1995) propone una nueva aproximación, el “enfoque de la elasticidad de energía”, el cual permite realizar estimaciones de los coeficientes de energía. Este método puede resultar más apropiado en el caso de que se precise obtener proyecciones de la demanda energética futura.

Ang y Choi (1997) proponen el método LMDI. Se trata de un enfoque “refinado” basado en índices de Divisia, de carácter no paramétrico, con ponderaciones de tipo media logarítmica, y que da lugar a descomposiciones exactas.

Sun (1998) plantea una técnica basada en la aplicación del principio de “creados conjuntamente e igualmente distribuidos”, en el que se asigna a cada factor su impacto correspondiente *ceteris paribus* más una fracción del impacto comúnmente creado, que se distribuye a partes iguales entre los distintos factores. Se trata de un método no paramétrico y exhaustivo¹, mejorado por diversos autores como Fernández (2004) dentro de los estudios input-output, adaptado posteriormente al ámbito del análisis de descomposición basado en índices en Fernández y Fernández (2008), y cuyo campo de aplicación incluye en la actualidad aplicaciones que abarcan desde el medio ambiente y la energía hasta la tecnología y la productividad.

Recientemente, Choi y Ang (2012) han extendido la metodología del análisis de descomposición de índices tipo Divisia a los estudios energéticos, cuantificando multiplicativamente la contribución individual de cada atributo al cambio porcentual de los factores. De este modo, se derivan dos nuevos indicadores: el índice de cambio estructural y el índice de intensidad real de energía.

¹ Sun plantea únicamente descomposiciones en forma aditiva.

1.3. METODOLOGÍA BASADA EN ÍNDICES TIPO DIVISIA

1.3.1. Introducción. Técnicas de descomposición estructural y en índices

Al analizar y descomponer los cambios históricos en los indicadores (medioambientales, socioeconómicos, económicos o laborales, entre otros) es útil el conocimiento y la evaluación de los factores determinantes que subyacen a estos cambios. Dos técnicas ampliamente utilizadas para llevar a cabo esta descomposición, a un nivel de agregación prefijado, son el análisis de descomposición estructural² (SDA) y el análisis de descomposición en índices (IDA). Ambos campos se han desarrollado de manera independiente; mientras que la literatura IDA ha estudiado en detalle las implicaciones de la teoría de índices y la especificación de la descomposición, el enfoque SDA se ha centrado en distinguir un gran número de efectos y factores determinantes. El SDA permite distinguir un amplio espectro de efectos tecnológicos y demandas finales, así como efectos indirectos de demanda que en un entorno IDA no son susceptibles de ser analizados. Sin embargo, dados sus menores requerimientos informativos, el IDA continúa siendo una herramienta muy popular (e.g., en estudios internacionales o análisis ampliamente detallados en términos temporales).

Por otra parte, la literatura IDA ha desarrollado la descomposición de las tres clases de indicadores (variación absoluta, ratio o elasticidad), mientras que (salvo en el caso de los estudios sobre productividad laboral; Dietzenbacher *et al.*, 2000) el SDA suele restringir su aplicación a los cambios en la variación absoluta de un indicador. Además, la

² El SDA es la técnica de uso más frecuente en los estudios de descomposición basados en tablas input-output, y por ello a veces es conocido como *análisis de descomposición input-output*.

literatura IDA utiliza tanto la descomposición aditiva como la multiplicativa, mientras que el SDA se centra habitualmente en la forma aditiva (la cual es mucho más sencilla de interpretar para los no expertos) y raramente aplica la multiplicativa.

Dadas las ventajas que presenta el enfoque IDA sobre el SDA, y teniendo en cuenta nuestro objetivo de estudio, nos centraremos en la metodología IDA, conocida también como “análisis de números índices” o simplemente como “descomposición de energía”, dado su amplio uso en los estudios medioambientales.

El IDA comporta esencialmente la aplicación de la teoría de los números índices económicos a la descomposición, en un conjunto de factores previamente definidos, de un indicador agregado. Desde una perspectiva metodológica, se trata de un problema análogo al clásico *problema de los números índices*,³ caracterizado por Irving Fisher (1922) y bien conocido en los ámbitos de la Economía y la Estadística.

1.3.2. Descomposición del cambio experimentado por un indicador

Sea V un agregado en el que intervienen n factores que contribuyen a su cambio a lo largo del tiempo. Para cada factor se consideran k categorías, y denotaremos por x_{ij} al valor del factor i para la categoría j , donde $i=1,\dots,n$, $j=1,\dots,k$. Por definición, se cumple la siguiente descomposición de V :

$$V = \sum_{j=1}^k V_j \quad (1.1)$$

³ Cuando se define una clase de índices económicos, ésta debe conservar toda la información y ser matemáticamente consistente. Diewert (1980, 1990) diversos desarrollos relevantes en la teoría económica de los números índices.

donde en cada categoría j se tiene

$$V_j = x_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} \quad (1.2)$$

Nuestro interés se centra en el estudio de los factores que intervienen en el cambio que experimenta el agregado V al pasar desde el período 0

$$(V^0 = \sum_{j=1}^k x_{1j}^0 x_{2j}^0 \dots x_{nj}^0) \text{ al período } T \text{ } (V^T = \sum_{j=1}^k x_{1j}^T x_{2j}^T \dots x_{nj}^T).$$
 Este

cambio, denominado efecto total, puede definirse para al menos tres tipos de indicador: variación absoluta, ratio y elasticidad. La elección del tipo de agregado dependerá del objetivo del estudio y conducirá a distintas formulaciones específicas, como se recoge en la parte metodológica correspondiente a los Capítulos 3 a 6.

1.3.3. Tipos de descomposición: aditiva y multiplicativa

La descomposición puede adoptar una forma aditiva o una multiplicativa.

La forma aditiva descompone la diferencia del indicador entre 0 y T en la suma del número de efectos considerados ($D_{iefecto}$):

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^n D_{iefecto} + D_{rsd} = \Delta x_{1efecto} + \Delta x_{2efecto} + \dots + \Delta x_{nefecto} + D_{rsd} \quad (1.3)$$

La forma multiplicativa descompone el crecimiento relativo de un indicador entre los períodos 0 y T en el producto del número de efectos considerados ($R_{iefecto}$):

$$R_{tot} = R_{1efecto} R_{2efecto} \dots R_{nefecto} R_{rsd} \quad (1.4)$$

En las dos expresiones anteriores, si la descomposición no es exacta, aparece un término residual (D_{rsd} y R_{rsd} , respectivamente).

1.3.4. Técnicas de descomposición basadas en índices tipo Divisia

En la literatura IDA, Liu *et al.* (1992) extienden la metodología basada en el uso de índices de Divisia al ámbito medioambiental. A partir de la misma se han desarrollado tres grupos de métodos: “convencionales”, de pesos adaptativos y “refinados”. Como hemos señalado más arriba, surge el problema de la “no unicidad”, pues disponemos de diversos métodos y enfoques alternativos que generalmente conducirán a resultados no coincidentes.

El índice de Divisia es una suma ponderada de tasas de crecimiento, donde las ponderaciones se corresponden con las participaciones de las distintas componentes en el valor total. Suponiendo que $\{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ es el vector de observaciones a indexar, siendo $\{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$ el vector asociado, el índice de Divisia (Hulten, 1973), en su forma continua, se define como:

$$D(\Gamma) = e^{\left\{ \int_{\Gamma} \varphi d\alpha(t) \right\}} = e^{\left\{ \int \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i(t) X_i(t) dX_i(t)}{\sum_{j=1}^k y_j(t) X_j(t) X_i(t)} \right) \right\}} \quad (1.5)$$

donde φ es un vector normalizado por la participación de las distintas componentes, $\alpha(t)$ representa la trayectoria seguida por las observaciones en el intervalo $[0, T]$ y Γ es la curva descrita por $\alpha(t)$, siendo $0 \leq t \leq T$.

Este índice verifica muchas de las propiedades deseables en un indicador económico (Ritcher, 1966): proporcionalidad, homogeneidad y, sobre todo, invarianza. Sin embargo, su mayor inconveniente reside en su dependencia de la trayectoria a lo largo de la cual se lleva a cabo

la integración. Este problema podría solventarse si pudiéramos asegurar la independencia de la integral Divisia respecto de su trayectoria. En este caso, el índice de Divisia conservaría toda la información y sería, según Richter (1966), igual o superior a cualquier otro índice.

En este sentido, se dice que una integral es independiente de su trayectoria si, en una región abierta S de \mathfrak{R}^n (para φ continuo en S , siendo x e y dos puntos en S) se cumple:

$$\int_{\Gamma(x,y)} \varphi d\alpha(t) = \int_{\Gamma_1(x,y)} \varphi d\beta(t) \quad (1.6)$$

para todas las trayectorias $\alpha(t)$, $\beta(t)$ que describen curvas Γ , Γ_1 , tales que $\Gamma \subset S$, $\Gamma_1 \subset S$, $\alpha \subset \Gamma$ y $\beta \subset \Gamma_1$.

Hulten (1973) demuestra que la integral de Divisia es independiente de la trayectoria en $S \subset \mathfrak{R}^n$ si y sólo si existe un agregado económico asociado con cada punto $\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \in S$. Esto plantea una relación directa entre la mayor desventaja de los índices de Divisia -el problema de la dependencia de la trayectoria- y la teoría de la agregación. En cualquier caso, esta condición es necesaria, pero no suficiente.

A partir de los resultados de Richter (1966), el propio Hulten (1973) deriva condiciones necesarias y suficientes para la independencia de la integral. En particular, se verificará: $D(\Gamma) = D(\Gamma_1) D(\Gamma_2) \dots D(\Gamma_t)$, siendo Γ_1 , Γ_2 y Γ_t las trayectorias seguidas por la variable analizada y siendo Γ la unión de las trayectorias anteriores, si y sólo si:

- a) existe un agregado definido en S .
- b) dicho agregado es linealmente homogéneo.
- c) existe un valor normal (observable) en cada punto de S , único para cada escalar multiplicado.

Una vez evitado el problema de la dependencia de la trayectoria, y sabiendo que conserva toda la información y verifica propiedades interesantes, el índice de Divisia es óptimo (Hulten, *ibídem*).

En la práctica, dado que los datos económicos no aparecen publicados en forma continua, se define también la forma discreta del índice de Divisia. La tasa de cambio de un índice tipo Divisia discreto se define del modo siguiente:

$$\log(D_t) - \log(D_{t-1}) = \sum_{i=1}^n [\rho_i V_{i,t} + \pi_i V_{i,t-1}] [\log(X_{i,t}) - \log(X_{i,t-1})] \quad (1.7)$$

donde $\rho_i + \pi_i = 1$, $V_{i,t} = \frac{y_{i,t} X_{i,t}}{\sum_{j=1}^n y_{j,t} X_{j,t}}$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

En su *Teoría de Números Índices*, Fisher (1922) compara resultados y propiedades de cientos de índices, concluyendo que es matemáticamente imposible encontrar un único índice que satisfaga simultáneamente todas las propiedades deseables. Se han propuesto muchos índices para su uso en el marco de las distintas técnicas de descomposición, especialmente en el IDA. A continuación detallamos algunos de los que aparecen más habitualmente en la literatura económica.

1.3.4.1. Métodos Divisia paramétricos. Algunos métodos clásicos

Considerado un determinado nivel de desagregación, podemos expresar el indicador V de la manera siguiente:

$$V = \sum_{j=1}^k x_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} \quad (1.8)$$

(Por brevedad, en esta expresión omitimos la dependencia temporal de las trayectorias y escribimos x_{ij} en lugar de $x_{ij}(t)$.)

Diferenciando la ecuación (1.8) con respecto al tiempo t , obtenemos:

$$V' = \sum_{j=1}^k x'_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} + \sum_{j=1}^k x_{1j} x'_{2j} \dots x_{nj} + \dots + \sum_{j=1}^k x_{1j} x_{2j} \dots x'_{nj} \quad (1.9)$$

donde x'_{ij} es la derivada de x_{ij} respecto al tiempo.

Integrando en ambos lados de (1.9) entre 0 y T resulta (en el caso de la descomposición aditiva):

$$\begin{aligned} \Delta V_0^T = D_{tot} = & \int_0^T \sum_{j=1}^k x'_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} dt + \int_0^T \sum_{j=1}^k x_{1j} x'_{2j} \dots x_{nj} dt + \dots + \\ & + \int_0^T \sum_{j=1}^k x_{1j} x_{2j} \dots x'_{nj} dt \end{aligned} \quad (1.10)$$

Dividiendo entre el indicador V e integrando en ambos lados desde 0 hasta T , se obtiene la descomposición multiplicativa:

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{V_T}{V_0} \right) = R_{tot} = & e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k x'_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} \frac{V_j(t)}{V(t)} dt \right)} \\ & e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k x_{1j} x'_{2j} \dots x_{nj} \frac{V_j(t)}{V(t)} dt \right)} \dots e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k x_{1j} x_{2j} \dots x'_{nj} \frac{V_j(t)}{V(t)} dt \right)} \\ & e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k x_{1j} x_{2j} \dots x_{nj} \frac{V'_j(t)}{V(t)} dt \right)} \end{aligned} \quad (1.11)$$

En la práctica, al no disponer de observaciones continuas en el tiempo, la integral curvilínea a lo largo de la trayectoria suele aproximarse mediante discretización. A partir de las ecuaciones (1.10) y (1.11), y bajo ciertas condiciones de homogeneidad lineal en las magnitudes agregadas (relativamente sencillas de asumir en intervalos temporales suficientemente pequeños), Liu *et al.* (1992) obtienen los *métodos Divisia paramétricos generales 1 y 2* (MDP1 y MDP2, respectivamente).⁴

⁴ En los capítulos siguientes utilizaremos ambos métodos. La formulación detallada de los mismos se recoge en las aplicaciones de los Capítulos 3 a 6, junto con sus especificidades en función del tipo de agregado a descomponer.

Ambos métodos difieren únicamente en su estructura de ponderaciones: mientras que en el primero se aplica el índice de Montgomery-Vartia, en el segundo se opta por el índice de Sato-Vartia.

Aquí consideraremos varios casos particulares de los métodos Divisia paramétricos generales:

1) *Método Divisia paramétrico 1 de Laspeyres (LAS-MDP1)*: es un caso especial del MDP1 con todas las ponderaciones iguales a 0. Se denomina tipo Laspeyres porque en él sólo se tiene en cuenta el valor de las magnitudes en el período inicial.

2) *Método Divisia paramétrico 1 de Paasche (PAA-MDP1)*: constituye un caso particular del MDP1 con todas las ponderaciones iguales a la unidad. Se le conoce como "Paasche" por considerar relevantes las magnitudes únicamente en el período final. Este método, tanto en su forma aditiva como multiplicativa, ha sido aplicado por Hoekstra *et al.* (2003).

3) *Método Divisia paramétrico 1 de Marshall-Edgeworth (AVE-MDP1)*: es un caso especial del MDP1 y resulta al utilizar una media aritmética de los índices tipo Laspeyres y Paasche. Todas las ponderaciones toman valor 0,5. En su forma multiplicativa, este método fue propuesto por Boyd *et al.* (1987).

4) *Método Divisia paramétrico 2 de Laspeyres (LAS-MDP2)*: es un caso particular del MDP2 con ponderaciones iguales a 0. Este es un método similar al propuesto por Howarth *et al.* (1991) y Jenne y Cattell (1983) en su forma aditiva, mientras que Hankinson y Rhys (1983) o Park (1992) lo proponen en versión multiplicativa.

5) *Método Divisia paramétrico 2 de Paasche (PAA-MDP2)*: constituye un caso especial del MDP2 con pesos unitarios.

6) *Método Divisia paramétrico 2 de Marshall-Edgeworth (AVE-MDP2)*: es un caso particular del MDP2 en el que las ponderaciones toman valor 0,5. Es un método equivalente a la propuesta planteada por Reitler *et al.* (1987).

7) *Método Divisia paramétrico de pesos adaptativos (AWT-MDP)*⁵: en este caso, los resultados de la descomposición son los mismos independientemente del método Divisia paramétrico general utilizado, ya que las ponderaciones se obtienen al igualar las expresiones de los Métodos Divisia Paramétricos 1 y 2 correspondientes. Omitiremos la referencia al MDP1 o MDP2, y hablaremos simplemente de MDP. Este método ha sido propuesto por Liu *et al.* (1992).

La selección del método de descomposición se convierte en una decisión fundamental, pues la aplicación de uno u otro método puede llevar a conclusiones contradictorias para un mismo conjunto de datos. Esta disparidad de resultados surge como consecuencia de las diferencias en los supuestos incorporados en las formulaciones de cada uno de los métodos. Como señalan Ang y Lee (1994), en general será preferible emplear el MDP1 si la relación entre la variable a descomponer y los factores predefinidos se aproxima a una forma logarítmica, mientras que se utilizará el MDP2 en el caso de que esta relación se aproxime a una forma lineal.

Por lo que respecta a las ponderaciones, la ventaja principal de los métodos basados en la media simple es que los resultados obtenidos

⁵ El término "adaptativo" se refiere al hecho de que los parámetros no se encuentran prefijados, sino que vienen determinados por los niveles de las magnitudes consideradas en los períodos 0 y T.

son simétricos respecto al tiempo, ya que no se especifica un año base sino que se utiliza una media aritmética de los valores en 0 y T de las variables relevantes. Boyd *et al.* (1988) y Reitler *et al.* (1987) consideran como características ventajosas esta naturaleza simétrica y el hecho de que los pesos no estén referidos a un año determinado.

En los métodos de tipo Laspeyres suelen obtenerse valores más elevados del término residual que en los restantes métodos considerados. La ventaja del método basado en Laspeyres es que aísla cada uno de los efectos. Se mide el cambio en la intensidad de un indicador agregado asociado con el cambio en las correspondientes variables entre los años 0 y T , manteniendo constantes el resto de las variables en sus respectivos valores en el año base. Park (1992) considera lógica esta forma de descomposición puesto que correspondería, en su opinión, al concepto económico del efecto marginal de una variable, de modo que los resultados de la descomposición pueden interpretarse con facilidad.

El método de los pesos adaptativos es considerado por Liu *et al.* (1992) como único en el sentido de que, a diferencia de los anteriores, el analista no decide arbitrariamente el valor de los parámetros. Sin embargo, la complejidad de cálculo es un inconveniente potencial del mismo.

Finalmente, la elección de los valores de los pesos o ponderaciones debe ser acorde con el objetivo del estudio. Así, si el objetivo consistiera, por ejemplo, en observar el patrón de comportamiento de algún indicador, valores de las ponderaciones como 0 y 0,5 podrían ser las mejores opciones. Por el contrario, si se pretende predecir, valores superiores a 0,5 o incluso 1 pueden resultar de utilidad. En el caso de

asignar el valor 1, tanto la descomposición como la predicción pueden ser llevadas a cabo con respecto al mismo período de referencia.

1.3.4.2. Método Divisia no paramétrico. El enfoque LMDI

Cuando los factores contemplados en la descomposición de una variable agregada no sufren cambios drásticos en el período de análisis, los estudios publicados sugieren que los métodos Divisia convencionales se comportan relativamente bien en términos de residuos. Sin embargo, cuando estas variaciones en los datos son considerables, situación que es probable en datos con un elevado nivel de desagregación o en la descomposición de la intensidad de una fuente de energía concreta, el método Divisia convencional podría no resultar adecuado puesto que suele conllevar un término residual relativamente elevado. En estas situaciones, el método del índice de Divisia refinado (o LMDI) sería preferible, ya que garantiza la inexistencia de un término residual en el resultado de la descomposición.

El método del índice de Divisia refinado fue introducido por Ang y Choi (1997), quienes proponen una nueva función de ponderación de tipo media logarítmica, la cual da lugar a una descomposición exacta. Esta idea se puede conectar con el trabajo de Sato (1976), que en su búsqueda de un índice ideal, propuso una función de pesos simétrica, obtenida a partir de la media logarítmica de x e y , que se define como⁶:

⁶ Törnqvist *et al.* (1985) exponen que esta función logarítmica fue originalmente planteada por el propio Törnqvist en 1935, aunque es en el trabajo de 1985 donde finalmente se especifica que:

a) x e y deberían de ser números positivos,

b) si $x \neq y$, el rango de función $L(x, y)$ debería ser $((xy)^{1/2}, (x + y)/2)$.

$$L(x, y) = \frac{(y - x)}{\ln\left(\frac{y}{x}\right)} \quad (1.12)$$

donde x e y son números positivos, $x \neq y$. Puede observarse que

$$L(x, x) = \lim_{y \rightarrow x} L(x, y) = x \quad (1.13)$$

Reemplazando x e y en la ecuación anterior por $w_{j,0}$ y $w_{j,T}$, respectivamente, se obtiene:

$$L(w_{j,0}, w_{j,T}) = \frac{(w_{j,T} - w_{j,0})}{\ln(w_{j,T}/w_{j,0})} \quad (1.14)$$

siendo $w_{j,0} = \frac{x_{j,0}y_{j,0}}{x_0y_0}$ y $w_{j,T} = \frac{x_{j,T}y_{j,T}}{x_Ty_T}$, donde $x_t = \sum_{j=1}^k x_{j,t}$ e

$y_t = \sum_{j=1}^k y_{j,t}$, $t = 0, T$, y k es el número de categorías.

Sin embargo, al aplicar literalmente esta formulación, y dado el rango de la media logarítmica, resulta que la suma de los pesos es ligeramente inferior a la unidad. Este inconveniente se solventa mediante una normalización. La función de pesos normalizada es la siguiente:

$$w_j^* = \frac{L(w_{j,0}, w_{j,T})}{\sum_{j=1}^k L(w_{j,0}, w_{j,T})}, j = 1, \dots, k \quad (1.15)$$

El método Divisia refinado es no paramétrico y, pese a que requiere mayor número de cálculos, ofrece una gran ventaja con respecto a los métodos convencionales: la descomposición es exacta. En aquellas situaciones en que las variaciones de los datos en el período analizado sean drásticas, esta ventaja adquiere una gran relevancia. Aún así,

autores como Sun (1998) consideran que el término residual debe ser un factor que ha de ser claramente explicitado, ya que podría indicar una interacción interesante que abra al analista un camino por el que proseguir su investigación.

1.3.5. Descomposición en distintos niveles de desagregación de la información

Un nivel específico de desagregación define el número de subcategorías que van a ser agregadas. La elección del nivel de desagregación influirá sobre los resultados y las conclusiones del estudio, de manera que puede ser interesante realizar el análisis a distintos niveles de desagregación, esto es, una descomposición multinivel. Autores como Morović *et al.* (1989), Li *et al.* (1990), Gardner (1993) o Sahu *et al.* (2010) han aplicado este enfoque.

Consideraremos únicamente dos niveles de desagregación, correspondiendo el nivel I a las distintas categorías (o grupos) y el II a las subcategorías (o sectores). La descomposición en los respectivos niveles vendrá dada por:

$$D_{tot} = D1_{1efecto} + D1_{2efecto} + \dots + D1_{nefecto} + D1_{rsd} \quad (1.16)$$

$$D_{tot} = D2_{1efecto} + D2_{2efecto} + \dots + D2_{nefecto} + D2_{rsd} \quad (1.17)$$

si la descomposición es aditiva, y por

$$R_{tot} = R1_{1efecto} R1_{2efecto} \dots R1_{nefecto} R1_{rsd} \quad (1.18)$$

$$R_{tot} = R2_{1efecto} R2_{2efecto} \dots R2_{nefecto} R2_{rsd} \quad (1.19)$$

si es multiplicativa.

Basándonos en Ang (1995), es posible descomponer el efecto de cada factor i en el nivel de desagregación superior ($D2_{iefecto}$ o $R2_{iefecto}$, efectos de sector) en: la participación de dicho factor en un nivel inferior ($D1_{iefecto}$ o $R1_{iefecto}$, efectos de grupo) y su participación al pasar de ese nivel inferior al superior ($D12_{iefecto}$ o $R12_{iefecto}$, efectos de subgrupo). Esto es

$$D2_{iefecto} = D1_{iefecto} + D12_{iefecto} \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (1.20)$$

si la descomposición es aditiva, y

$$R2_{iefecto} = R1_{iefecto} R12_{iefecto} \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (1.21)$$

si la descomposición es multiplicativa.

Generalizando lo anterior, y considerando un número h de niveles de desagregación, el efecto total podría expresarse como:

$$D_{tot} = (D1_{1efecto} + D12_{1efecto} + \dots + D\{h-1\}h_{1efecto}) + \dots + (D1_{nefecto} + D12_{nefecto} + \dots + D\{h-1\}h_{nefecto}) + Dh_{rsd} \quad (1.22)$$

en el caso de una descomposición aditiva, y

$$R_{tot} = (R1_{1efecto} R12_{1efecto} \dots R\{h-1\}h_{1efecto}) \dots (R1_{nefecto} R12_{nefecto} \dots R\{h-1\}h_{nefecto}) Rh_{rsd} \quad (1.23)$$

para una descomposición multiplicativa.

1.3.6. Descomposición en series temporales

Las técnicas de descomposición pueden aplicarse de forma estática (o *descomposición única*) a un intervalo determinado de tiempo, considerando únicamente los períodos inicial y final, o alternativamente se puede aplicar un enfoque dinámico (o *de series temporales*), que

considere el resultado final como una acumulación de lo que va sucediendo a lo largo de los períodos intermedios. En este segundo caso, la descomposición se lleva a cabo entre cada dos períodos consecutivos, $t-1$ y t , donde $t=1, \dots, T$. Sean $(C_{tot})_{0,T}$ el cambio total acumulado en el agregado V entre los períodos 0 y T , $(C_{iefecto})_{0,T}$ los efectos acumulados estimados para cada factor i , y $(C_{rsd})_{0,T}$ el término residual acumulado entre los años 0 y T . Se tiene:

a) Descomposición aditiva:

$$(C_{tot})_{0,T} = (D_{tot})_{0,1} + (D_{tot})_{1,2} + \dots + (D_{tot})_{T-1,T} \quad (1.24)$$

$$(C_{1efecto})_{0,T} = (D_{1efecto})_{0,1} + (D_{1efecto})_{1,2} + \dots + (D_{1efecto})_{T-1,T} \quad (1.25)$$

$$(C_{2efecto})_{0,T} = (D_{2efecto})_{0,1} + (D_{2efecto})_{1,2} + \dots + (D_{2efecto})_{T-1,T} \quad (1.26)$$

...

$$(C_{rsd})_{0,T} = (D_{rsd})_{0,1} + (D_{rsd})_{1,2} + \dots + (D_{rsd})_{T-1,T} \quad (1.27)$$

b) Descomposición multiplicativa:

$$(C_{tot})_{0,T} = (R_{tot})_{0,1} (R_{tot})_{1,2} \dots (R_{tot})_{T-1,T} \quad (1.28)$$

$$(C_{1efecto})_{0,T} = (R_{1efecto})_{0,1} (R_{1efecto})_{1,2} \dots (R_{1efecto})_{T-1,T} \quad (1.29)$$

$$(C_{2efecto})_{0,T} = (R_{2efecto})_{0,1} (R_{2efecto})_{1,2} \dots (R_{2efecto})_{T-1,T} \quad (1.30)$$

...

$$(C_{rsd})_{0,T} = (R_{rsd})_{0,1} (R_{rsd})_{1,2} \dots (R_{rsd})_{T-1,T} \quad (1.31)$$

Como se puede observar en las expresiones anteriores, en el análisis dinámico se tienen en cuenta todos los períodos intermedios, a diferencia de la descomposición única para el período, en la que sólo se consideran el primer (0) y el último (T) año del período de estudio. Obviamente, esta última opción requiere un menor esfuerzo en la obtención de datos y el cálculo de los resultados. Sin embargo, por

definición, la descomposición única ignora completamente los patrones de crecimiento de las magnitudes en los años intermedios. La descomposición en series temporales, pese a su mayor requerimiento de datos y cálculos, no sólo aventaja a la descomposición única en el hecho de que explota la información de los años intermedios, sino que además sus resultados parecen depender en menor medida del método de descomposición empleado, ya que la desviación del término residual suele ser menor. Ello se debe a que, en esta formulación, la trayectoria asumida implícitamente en el cálculo de la integral se interpola cada dos años consecutivos, en lugar de hacerlo sólo en los instantes 0 y T .

En cualquier caso, la descomposición única resulta práctica en aquellos casos en los que la disponibilidad de datos constituya un problema, entre otras causas, porque la descomposición se lleve a cabo a un nivel de desagregación muy elevado, o porque se realicen estudios comparativos entre países. Muchos estudios sobre descomposición del consumo industrial de energía aplican la descomposición única, en lugar de la de series temporales. Ejemplos de este tipo de análisis los encontramos, entre otros, en los trabajos de Ang y Skea (1994), Liu *et al.* (1992) y Park *et al.* (1991).

CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MATEMÁTICAS Y ESTADÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN

2.1. Introducción

2.2. Reconstrucción de trayectorias mediante interpolación. El método de los splines naturales

2.3. Propiedades matemáticas. Convergencia

2.3.1. La descomposición aditiva

2.3.2. La descomposición multiplicativa

2.4. Comportamiento en ambiente estocástico

2.5. Conclusiones

Anexo I: Demostraciones matemáticas del Capítulo 2

CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MATEMÁTICAS Y ESTADÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN

2.1. Introducción

Como se comentó en el Capítulo 1, el índice Divisia teórico se calcula a partir de las trayectorias de las variables observadas en tiempo continuo. No obstante, en la práctica sólo está disponible un número finito de observaciones discretas. En este capítulo analizaremos algunas propiedades de convergencia de las aproximaciones basadas en datos discretos a las descomposiciones teóricas estudiadas en el capítulo anterior. Nuestro análisis se centrará en el problema de la descomposición de una ratio (intensidad energética) en dos factores (efecto estructural y efecto intensidad), aunque los resultados teóricos son de validez al caso general de la descomposición en un número arbitrario finito de factores.

Para llevar a cabo nuestro análisis recurriremos a resultados clásicos de las teorías matemáticas de la interpolación de funciones y la aproximación (e.g., Powell, 1981, cap. 23), así como a ciertos análogos estocásticos de los mismos. Nuestro análisis comenzará por el estudio de las propiedades matemáticas de las descomposiciones aditiva y multiplicativa. El enfoque que aplicamos es directo: a partir de un conjunto de observaciones discretas plantearemos la reconstrucción de las trayectorias de las variables relevantes, y a partir de éstas la convergencia, a medida que el muestreo se lleva a cabo sobre mallas temporales cada vez más finas, hacia las descomposiciones exactas de la intensidad energética en tiempo continuo. A

continuación extenderemos el análisis al campo estocástico, por el procedimiento de reemplazar las funciones por procesos estocásticos en tiempo continuo con propiedades de regularidad adecuadas.

La reconstrucción de trayectorias puede llevarse a cabo mediante técnicas de interpolación, con dos condiciones básicas que se derivan de las características de la descomposición teórica: (a) los interpoladores deben ser capaces de aproximar las *trayectorias y sus derivadas* hasta el segundo orden (como veremos, este requerimiento viene dictado por el uso de la integración por partes en la descomposición exacta), y (b) deben dar lugar a descomposiciones exactas de la variación de la intensidad energética.¹

Nuestro enfoque puede calificarse como no paramétrico, pues no se asume ninguna forma funcional prefijada para las trayectorias (deterministas o estocásticas) a reconstruir, imponiéndose sólo el requisito de convergencia de la descomposición aproximada basada en interpoladores a la descomposición teórica en tiempo continuo.

2.2. Reconstrucción de trayectorias mediante interpolación. El método de los splines naturales

En nuestro caso consideraremos splines de una variable t (el tiempo), donde $-\infty \leq a \leq t \leq b \leq \infty$, siendo a y b arbitrarios. Siguiendo la definición usual (e.g., Powell, 1981, cap. 3, pág. 29), una función $Q(t)$, polinomial por tramos, se denomina spline de grado K en $[a, b]$ si en cada tramo $Q(t)$ es un

¹ Diversas técnicas de aproximación de funciones, como los polinomios de Bernstein o las redes neuronales artificiales, verifican el requisito (a), aunque su lenta velocidad de convergencia (en el caso de los polinomios de Bernstein) o su mayor complejidad (en el caso de las redes neuronales) desaconsejan su uso para nuestros propósitos. Por otra parte, el uso de la interpolación frente al ajuste o suavizado de datos (por ejemplo el ajuste mediante mínimos cuadrados ordinarios) impone el requerimiento de que las funciones o procesos estocásticos a interpolar sean suficientemente suaves o regulares, como se verá más abajo.

polinomio de grado K y posee en el intervalo $[a,b]$ derivadas continuas hasta el orden $K-1$. (Formalmente diremos que $Q(t)$ pertenece al espacio $C^{K-1}[a,b]$, formado por todas las funciones con derivadas continuas hasta el orden $K-1$ en $[a,b]$. Siguiendo la convención usual, identificaremos la derivada de orden cero con la propia función.) Nos interesaremos en particular por las capacidades de aproximación de los splines en el intervalo $[0,1]$. En este caso, todo spline de grado K viene caracterizado por un conjunto $N_n = \{t_1, \dots, t_n\}$ de puntos llamados *nudos*, de modo que $-\infty \leq a < 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n = 1 < b \leq \infty$ y puede expresarse del modo siguiente:

$$Q(t) = \sum_{j=0}^K c_j t^j + \sum_{i=2}^{n-1} d_i (t - t_i)_+^K \quad (2.1)$$

donde c_j y d_j son constantes y $(\cdot)_+^K$ es la potencia truncada de grado K , es decir $(z)_+^K = [\max(0, z)]^K$.

Los splines son estructuras muy flexibles que permiten interpolar funciones, así como preservar características de interés, como la monotonía o la convexidad de las funciones interpoladas (e.g., DeVore y Lorentz, 1993, cap. 13). Dentro de las técnicas de aproximación e interpolación basadas en splines, resultan de particular interés los llamados *splines naturales*, que como veremos poseen capacidades de aproximación especialmente fuertes.

En lo que sigue denominaremos $W^m[a,b]$ al espacio de Sobolev formado por todas las funciones con derivadas continuas en $[a,b]$ hasta el orden $m-1$ (es decir, pertenecientes a $C^{m-1}[a,b]$) y cuya derivada de orden m es de cuadrado integrable en $[a,b]$ (e.g., Adams, 1975, cap. 3).

Los splines naturales fueron propuestos por I. Schoenberg (1964), como

solución al siguiente problema variacional (adaptamos la formulación general de Schoenberg a nuestro problema): se desea obtener una función \hat{f} perteneciente a $W^m[a, b]$ que haga mínima la expresión

$$\min_{\hat{f} \in W^m[a, b]} \int_a^b (D^m \hat{f}(t))^2 dt \quad (2.2)$$

sujeto a la condición $\hat{f}(t_i) = f(t_i)$, donde $i = 1, \dots, n$ y $-\infty \leq a < 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n = 1 < b \leq \infty$. (En nuestro caso, interesa que \hat{f} sea una función suave que interpole con la mínima oscilación posible a la función f , de la cual se dispone de un conjunto de observaciones $D_n = \{(t_i, f(t_i)), t_i = (i-1)/(n-1), i = 1, 2, \dots, n\}$.)

Resultados clásicos (e.g., Powell, 1981, cap. 23, Teoremas 23.1-23.2) demuestran que, cuando el número de observaciones es $n > m$ el problema variacional anterior tiene solución única, la cual es un spline natural de orden m , es decir, un spline de grado $2m-1$ y derivadas continuas hasta el orden $2m-2$.

Una propiedad especialmente interesante de los splines naturales de orden m es que son capaces de aproximar uniformemente a una función arbitraria suave y sus derivadas hasta el orden $m-1$. La Proposición 1 que sigue precisa esta propiedad. Se trata de una particularización, adaptada a nuestro problema, de una propiedad general de los splines naturales (Wahba, 1990; véase también Schultz, 1973): consideraremos de nuevo el problema de aproximar en el intervalo $0 \leq t \leq 1$, a partir de una muestra de n observaciones, una función f que pertenece al espacio de Sobolev $W^m[a, b]$, con $-\infty \leq a < 0 \leq t \leq 1 < b \leq \infty$. (Por simplicidad notacional consideraremos datos espaciados uniformemente en el tiempo, aunque los resultados de este capítulo son válidos para observaciones espaciadas no uniformemente,

bajo la condición de que la distancia máxima entre los instantes de observaciones consecutivas converja a cero a medida que n tiende a infinito.) Denotaremos por $D^\alpha f$ a la derivada de orden α de f , con la convención usual $D^0 f = f$.

Proposición 1 (Wahba, 1990, págs. viii-ix) : Sea f una función de $W^m[a, b]$. Entonces, para una constante $L < \infty$, el spline natural \hat{f} (de orden m y grado $2m-1$) que interpola a f en $N_n = \{t_i = (i-1)/(n-1), i = 1, \dots, n\}$ cumple,

$$\max_{0 \leq \alpha \leq m-1} \sup_{0 \leq t \leq 1} |D^\alpha \hat{f}(t) - D^\alpha f(t)| \leq L(n-1)^{-(m-\alpha)} \quad (2.3)$$

□

La Proposición 1 garantiza que, bajo condiciones muy generales, si la función a reconstruir es una función suave, el spline natural \hat{f} (y sus derivadas hasta el orden $m-1$) converge uniformemente hacia f y sus derivadas, a medida que la función se muestrea de manera más fina. Esta propiedad puede aplicarse a la aproximación de trayectorias en el problema de Divisia (y en particular a la descomposición de la variación de la intensidad energética), y como veremos permite garantizar de forma simple que la descomposición basada en splines naturales converge a la solución teórica (en tiempo continuo) del problema de Divisia.² A este nuevo método de descomposición, alternativo a los desarrollados hasta ahora en la literatura IDA, lo denominaremos *método de los splines naturales* (MSN). Aplicaremos este enfoque como parte del estudio empírico recogido en el Capítulo 6.

A modo de ilustración, en la Figura 2.1 se recoge la reconstrucción mediante

² En funciones suaves, con observaciones espaciadas uniformemente, las reconstrucciones basadas en splines naturales son más precisas que las basadas en otras técnicas, como la interpolación lineal (e.g., Powell, 1978). Por otra parte, los interpoladores lineales no poseen el grado de diferenciabilidad requerido en nuestro problema.

splines naturales de la función $f(t) = (t + 0,02)^{1/2}$, $0 \leq t \leq 1$, a partir de $D_n = \{(t_i, f(t_i)), t_i = (i - 1)/(n - 1), i = 1, 2, \dots, n\}$, utilizando sólo $n=4$ observaciones.

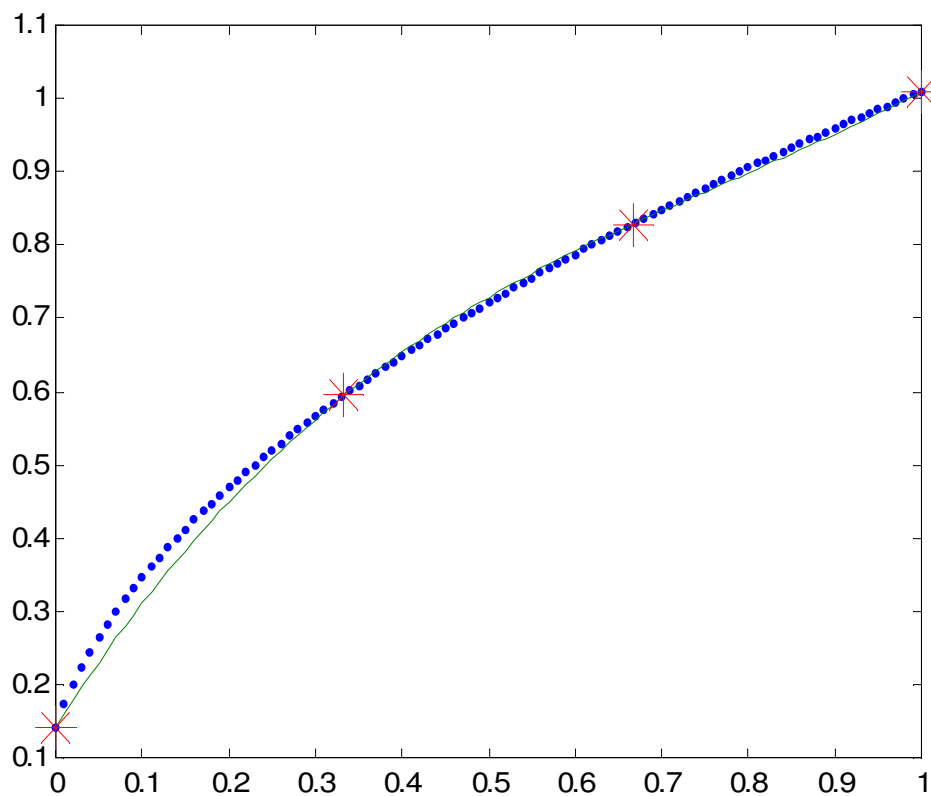


Figura 2.1. La función $f(t) = (t + 0,02)^{1/2}$ (línea punteada) y su interpolador de splines naturales (línea continua) con $n=4$ nudos (representados en forma de asteriscos).

Como se aprecia en la Figura 2.1, la desviación entre el spline natural y la función interpolada es casi imperceptible en el gráfico.

2.3. Propiedades matemáticas. Convergencia

Consideraremos el caso (representativo) de la descomposición de la variación de la intensidad energética en el intervalo temporal $0 \leq t \leq 1$, a partir de un conjunto discreto de observaciones llevadas a cabo en dicho intervalo. (Consideramos $a < 0 \leq t \leq 1 < b$, siendo a y b arbitrarios, y todas las funciones están definidas en (a, b) , aunque sólo nos interesen sus restricciones en $[0,1]$.) Consideraremos r sectores ($j = 1, \dots, r$) y usaremos la siguiente notación, donde $0 \leq t \leq 1$:

$e_j(t)$: tasa instantánea de consumo de energía en el sector j evaluada en el instante t ,

$y_j(t)$: tasa instantánea de producción del sector j en el instante t ,

$E_j(t)$: consumo acumulado de energía desde 0 a t en el sector j ,

$Y_j(t)$: producción acumulada desde 0 a t en el sector j ,

$E(t) = \sum_{j=1}^r E_j(t)$: consumo total acumulado de energía desde 0 a t ,

$Y(t) = \sum_{j=1}^r Y_j(t)$: producción total acumulada desde 0 a t .

Bajo condiciones que se detallarán más abajo se tiene $E_j(t) = \int_0^t e_j(s) ds$, y

$e_j(t) = D^1 E_j(t)$ es la derivada primera del consumo acumulado respecto al

tiempo. Del mismo modo se cumple $Y_j(t) = \int_0^t y_j(s) ds$, siendo $y_j(t) = D^1 Y_j(t)$ la

derivada primera respecto al tiempo de la producción acumulada del sector

j . Además, $E(t) = \int_0^t e(s) ds$, siendo $e(t) = \sum_{j=1}^r e_j(t)$, y finalmente

$Y(t) = \int_0^t y(s) ds$, con $y(t) = \sum_{j=1}^r y_j(t)$.

2.3.1. La descomposición aditiva

Dados los instantes t y $t + \Delta t$, con $0 \leq t < t + \Delta t \leq 1$, se define la intensidad de energía en el intervalo $(t, t + \Delta t]$ del modo habitual:

$$I(t, \Delta t) = \frac{\Delta E}{\Delta Y} = \frac{E(t + \Delta t) - E(t)}{Y(t + \Delta t) - Y(t)} = \frac{\frac{\Delta E}{\Delta t}}{\frac{\Delta Y}{\Delta t}} \quad (2.4)$$

Como $\Delta E = \sum_{j=1}^r \Delta E_j = \sum_{j=1}^r (E_j(t + \Delta t) - E_j(t))$, se obtiene directamente la descomposición siguiente:

$$I(t, \Delta t) = \sum_{j=1}^r \frac{\Delta E_j}{\Delta Y} = \sum_{j=1}^r \frac{\Delta E_j}{\Delta Y_j} \frac{\Delta Y_j}{\Delta Y} = \sum_{j=1}^r \frac{\frac{\Delta E_j}{\Delta t}}{\frac{\Delta Y_j}{\Delta t}} \frac{\frac{\Delta Y_j}{\Delta t}}{\frac{\Delta Y}{\Delta t}} = \sum_{j=1}^r I_j(t, \Delta t) \cdot S_j(t, \Delta t) \quad (2.5)$$

donde $I_j(t, \Delta t) = (\Delta E_j / \Delta t) / (\Delta Y_j / \Delta t)$ es la intensidad energética del sector j en el intervalo $(t, t + \Delta t]$ y $S_j(t, \Delta t) = (\Delta Y_j / \Delta t) / (\Delta Y / \Delta t)$ es la participación del sector j en la producción total del período $(t, t + \Delta t]$.

A partir de $I_j(t, \Delta t)$ y $S_j(t, \Delta t)$ se obtienen para $0 \leq t \leq 1$,³ tomando límites cuando $\Delta t \rightarrow 0$, las siguientes funciones:

$I_j(t) = e_j(t) / y_j(t)$: intensidad instantánea de energía en el sector j ,

$I(t) = e(t) / y(t)$: intensidad agregada instantánea de energía,

$S_j(t) = y_j(t) / y(t)$: participación del sector j en la producción total del

³ Al inicio de la sección se han definido todas las magnitudes instantáneas en el intervalo $[a, b]$, que contiene a $[0, 1]$ en su interior, de modo que los límites en 0 y 1 no plantean problemas de ambigüedad en su definición.

instante t .

Bajo las Condiciones 1 y 2 que se detallan más abajo, la intensidad $I(t)$ tiene derivada continua en $[0,1]$, de modo que su derivada admite la descomposición usual:

$$D^1 I(t) = \sum_{j=1}^r D^1 I_j(t) \cdot S_j(t) + \sum_{j=1}^r I_j(t) \cdot D^1 S_j(t) \quad (2.6)$$

la cual da lugar a la descomposición aditiva de la variación de la intensidad:

$$I_1 - I_0 = ET = EI + EE \quad (2.7)$$

donde $I_0 = I(0)$, $I_1 = I(1)$, ET es el efecto total o variación de la intensidad

entre 0 y 1, $EI = \int_0^1 \left(\sum_{j=1}^r D^1 I_j(t) S_j(t) \right) dt$ es el efecto intensidad acumulado de

0 a 1, y $EE = \int_0^1 \left(\sum_{j=1}^r I_j(t) \cdot D^1 S_j(t) \right) dt$ es el efecto estructural acumulado en el

mismo intervalo.

Más generalmente, la variación de la intensidad total de 0 a t , $ET(t)$, donde $0 \leq t \leq 1$, se descompone como $ET(t) = EI(t) + EE(t)$, siendo

$EI(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r D^1 I_j(u) S_j(u) du$ el efecto intensidad acumulado hasta t y

$EE(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r D^1 S_j(u) I_j(u) du$ el efecto estructural acumulado en el mismo

período, de modo que evidentemente $ET(1) = I_1 - I_0 = ET$.

Consideraremos las aproximaciones mediante splines naturales para las

trayectorias acumuladas $E_j(t) = \int_0^t e_j(u) du$ e $Y_j(t) = \int_0^t y_j(u) du$, $0 \leq t \leq 1$.

Denominaremos a estos interpoladores $\hat{E}_j(t)$ e $\hat{Y}_j(t)$, respectivamente.

Observemos que, por definición, los valores iniciales acumulados son nulos, $E_j(0) = 0$ e $Y_j(0) = 0$, de manera que ésta es siempre la primera observación disponible en la construcción de los interpoladores para las trayectorias de los consumos y producciones acumulados.

A continuación, construiremos aproximadores para el consumo total acumulado $E(t)$ y la producción total acumulada $Y(t)$. Utilizaremos los interpoladores $\hat{E}(t) = \sum_{j=1}^r \hat{E}_j(t)$ e $\hat{Y}(t) = \sum_{j=1}^r \hat{Y}_j(t)$, que coinciden con los splines naturales para la interpolación de $E(t)$ e $Y(t)$, y bajo las condiciones de la Proposición 1 que aparece más abajo convergerán uniformemente hacia $E(t)$ e $Y(t)$, respectivamente, y sus derivadas respectivas hasta el orden 2. Los aproximadores para las intensidades y las participaciones instantáneas se definen directamente (aunque no son splines naturales, sino cocientes de splines). En particular:

$\hat{I}_j(t) = \hat{e}_j(t) / \hat{y}_j(t)$: aproximador para la intensidad instantánea de energía en el sector j ,

$\hat{I}(t) = \hat{e}(t) / \hat{y}(t)$: aproximador para la intensidad agregada instantánea de energía.

$\hat{S}_j(t) = \hat{y}_j(t) / \hat{y}(t)$: aproximador para la participación instantánea del sector j en la producción.

El mecanismo de interpolación anterior garantiza que no sólo se interpolan los consumos acumulados, sino también sus variaciones entre los períodos de observación, así como las intensidades y las participaciones de cada período. Esto se ilustra fácilmente: si se dispone de observaciones para dos períodos, t y $t+1$, el consumo del sector j en el intervalo $(t, t+1]$ es

$E_j(t+1) - E_j(t) = \hat{E}_j(t+1) - \hat{E}_j(t)$, y una propiedad análoga se cumple para la producción. De este modo, la intensidad de energía en j en el intervalo $(t, t+1]$ es

$$I_j(t, \Delta t = 1) = \sum_{j=1}^r \frac{\frac{\Delta E_j}{\Delta t} \frac{\Delta Y_j}{\Delta Y}}{\frac{\Delta t}{\Delta t}} = \sum_{j=1}^r \frac{\frac{\Delta \hat{E}_j}{\Delta t} \frac{\Delta \hat{Y}_j}{\Delta \hat{Y}}}{\frac{\Delta t}{\Delta t}} \quad (2.8)$$

y un comportamiento análogo se observa para la cuota de producción del sector j en el intervalo $(t, t+1]$:

$$S_j(t, \Delta t = 1) = \frac{Y_j(t+1) - Y_j(t)}{Y(t)} = \frac{\hat{Y}_j(t+1) - \hat{Y}_j(t)}{\hat{Y}(t)} \quad (2.9)$$

Por tanto, aunque utilizamos los splines naturales para interpolar y aproximar un conjunto de magnitudes definidas en tiempo continuo, a la vez se garantiza automáticamente la interpolación de las observaciones periódicas (consumos, producciones, intensidades, participaciones) que se observan al analizar la intensidad de energía en tiempo discreto.

A continuación consideraremos aproximadores analógicos para las funciones

$$EI(t), \quad EE(t) \quad \text{y} \quad ET(t), \quad \text{respectivamente,} \quad \hat{EI}(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r D^1 \hat{I}_j(u) \hat{S}_j(u) du,$$

$$\hat{EE}(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r \hat{I}_j(u) D^1 \hat{S}_j(u) du \quad \text{y} \quad \hat{ET}(t) = \hat{EI}(t) + \hat{EE}(t), \quad \text{donde} \quad 0 \leq t \leq 1.$$

Evidentemente, $\hat{EI} = \hat{EI}(1)$, $\hat{EE} = \hat{EE}(1)$ y $\hat{ET} = \hat{ET}(1)$ serán, respectivamente, los aproximadores analógicos para los efectos EI , EE y ET .

Al objeto de garantizar que los interpoladores anteriores cumplen la Proposición 1 impondremos las siguientes condiciones de regularidad a las trayectorias que deseamos reconstruir:

Condición 1: Para todo $j = 1, \dots, r$: (i) el consumo acumulado E_j tiene derivadas continuas hasta el orden 2 en $[0,1]$, siendo $\int_0^1 (D^3 E_j(t))^2 dt \leq c < \infty$, e (ii) $\inf_{0 \leq t \leq 1} e_j(t) \geq m > 0$.

□

Condición 2: Para todo $j = 1, \dots, r$, (i) la producción acumulada Y_j tiene derivadas continuas hasta el orden 2 en $[0,1]$, siendo $\int_0^1 (D^3 y_j(t))^2 dt \leq c < \infty$, e (ii) $\inf_{0 \leq t \leq 1} y_j(t) \geq m > 0$.

□

La proposición siguiente muestra que estos aproximadores convergen a los efectos teóricos (EI , ES y ET , respectivamente) a medida que el número de observaciones (n) crece.

Proposición 2 (Convergencia de la descomposición aditiva): Bajo las

Condiciones 1 y 2, sea $ET_n = \int_0^1 \sum_{j=1}^r [D^1 \hat{I}_j(t) \hat{S}_j(t) + \hat{I}_j(t) D^1 \hat{S}_j(t)] dt$ el

aproximador analógico de ET , construido mediante splines naturales de interpolación (de orden 3 y grado 5) aplicados al conjunto de observaciones $D_n = \{(t_i, E_1(t_i), \dots, E_r(t_i), Y_1(t_i), \dots, Y_r(t_i)), t_i = (i-1)/(n-1); i = 1, \dots, n\}$.

Se cumple:

(a) $ET_n \rightarrow ET$ cuando $n \rightarrow \infty$, y en particular

(b) $|ET_n - ET| \leq L_1(n-1)^{-1}$ para cierto $L_1 < \infty$ y todo n suficientemente grande.

□

Un resultado análogo se cumple para los aproximadores de EI y EE (véase la

demostración de la Proposición 2 en el Anexo I).

2.3.2. La descomposición multiplicativa

De modo análogo se obtiene la descomposición multiplicativa. Consideraremos el efecto total logarítmico:

$$ETL = ETL(1) = \ln(I_1 / I_0) = \int_0^1 D^1 \ln I(t) dt = \int_0^1 \sum_{j=1}^r \frac{D^1 I_j(t) S_j(t)}{I(t)} dt + \int_0^1 \sum_{j=1}^r \frac{I_j(t) D^1 S_j(t)}{I(t)} dt \quad (2.10)$$

El efecto intensidad acumulado hasta t es $R_{int}(t) = \exp(EIL(t))$, siendo

$$EIL(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r \frac{D^1 I_j(u) S_j(u)}{I(u)} du$$

el efecto intensidad logarítmico. De modo

análogo el efecto estructural acumulado hasta t es $R_{str}(t) = \exp(EEL(t))$,

$$EEL(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^r \frac{I_j(t) D^1 S_j(t)}{I(t)} dt$$

el efecto estructural logarítmico.

El efecto total acumulado hasta t es simplemente $R(t) = R_{int}(t)R_{str}(t)$, siendo $R(1) = I_1 / I_0$ el ratio de las intensidades en 1 y 0, que es la magnitud a descomponer.

Aproximaremos ETL mediante su análogo basado en splines naturales:

$$ETL_n = \int_0^1 \sum_{j=1}^r \frac{D^1 \hat{I}_j(t) \hat{S}_j(t)}{\hat{I}(t)} dt + \int_0^1 \sum_{j=1}^r \frac{\hat{I}_j(t) D^1 \hat{S}_j(t)}{\hat{I}(t)} dt \quad (2.11)$$

La aproximación (2.11) verifica el siguiente resultado, análogo al caso aditivo.

Proposición 3 (Convergencia de la descomposición multiplicativa):

Bajo las Condiciones 1 y 2, sea ETL_n el aproximador analógico de ETL construido mediante splines naturales de interpolación (de orden 3 y grado 5) a partir del conjunto de observaciones

$$D_n = \{(t_i, E_1(t_i), \dots, E_r(t_i), Y_1(t_i), \dots, Y_r(t_i)), t_i = (i - 1)/(n - 1); i = 1, \dots, n\}.$$

Se cumple:

(a) $ETL_n \rightarrow ETL$ cuando $n \rightarrow \infty$, y en particular

(b) $|ETL_n - ETL| \leq L_1(n - 1)^{-1}$ para cierto $L_1 < \infty$ y todo n suficientemente grande.

□

Por tanto, el efecto logarítmico total (y también los de intensidad y estructural) se aproximan uniformemente mediante sus análogos de splines naturales.

2.4. Comportamiento en ambiente estocástico

En esta sección analizamos el comportamiento de ET_n y ETL_n en un entorno probabilístico, cuando los datos utilizados en la reconstrucción de las trayectorias vienen generados por un proceso estocástico. Demostraremos que, bajo condiciones generales, estos aproximadores son variables aleatorias y que, cuando $n \rightarrow \infty$, convergen con probabilidad 1 (y por tanto en distribución) hacia ET y ETL , respectivamente, los cuales son también variables aleatorias.

Consideraremos un espacio probabilístico completo (Ω, \mathbf{A}, P) . El conjunto de trayectorias acumuladas en $[0,1]$ viene dado por el vector de funciones $Z = (z_1, \dots, z_{2r})$, donde $z_j = E_j$, $z_{r+j} = Y_j$, $j = 1, \dots, r$, son las trayectorias acumuladas de los consumos energéticos y las producciones de cada uno de

los r sectores. Por tanto, para cada (t, ω) , donde $t \in [0, 1]$ y $\omega \in \Omega$, se tiene $Z(t, \omega) = (E_1(t, \omega), \dots, E_r(t, \omega), Y_1(t, \omega), \dots, Y_r(t, \omega))$, que es un vector de observaciones en el instante t , y permitiendo a t variar entre 0 y 1 se obtiene un vector de trayectorias. Respecto del conjunto de trayectorias, asumiremos como en la sección anterior que, para todo $\omega \in \Omega$ fijo, cada componente de $Z = Z(t, \omega)$ posee derivadas continuas hasta el orden 2 en $[0, 1]$. Abreviadamente, diremos que Z toma valores en el espacio $S = \prod_{i=1}^{2r} C^2[0, 1]$. Equiparemos S con la métrica inducida por la norma $\|Z\| = \max_{j=1, \dots, 2r} \max_{0 \leq a \leq 2} \max_{0 \leq t \leq 1} |D^a z_j(t)|$. Equipado con esta norma, S es un espacio métrico completo y separable.⁴

Denominaremos $\mathbf{B}(S)$ a la σ -álgebra topológica en S , es decir la σ -álgebra minimal que contiene todos los subconjuntos abiertos (en el sentido de la métrica inducida por la norma $\|\cdot\|$) de S . El par ordenado $(S, \mathbf{B}(S))$ es un espacio probabilizable. Asumiremos que el proceso estocástico Z es un elemento aleatorio de S , es decir, que se obtiene mediante una aplicación medible de Ω en S . Por tanto, para todo suceso B en $\mathbf{B}(S)$, existe un conjunto A en \mathbf{A} tal que $X(A) = B$. Observemos que la norma $\|\cdot\|$ es una función $\mathbf{B}(S)$ -medible. La relación $P'(X(B)) = P(X^{-1}(B))$, $B \in \mathbf{B}(S)$, define una medida de probabilidad P' inducida por X , y un espacio probabilístico final $(S, \mathbf{B}(S), P')$. (Por simplicidad usaremos el mismo símbolo, P , para denotar también a P' ; el contexto permitirá distinguir en cada caso la medida a la que nos referimos.)

Para todo $m > 0$ denominaremos A_m al conjunto de trayectorias $Z = (z_1, \dots, z_{2r}) \in S$ tales que $\min_{j=1, \dots, 2r} \min_{0 \leq t \leq 1} D^1 z_j(t) \geq m$. Impondremos la

⁴ Véase Dudley (1973) para conjuntos de condiciones que aseguran la diferenciabilidad, continuidad y la propiedad de Lipschitz para las trayectorias de procesos estocásticos, Gaussianos y no Gaussianos.

siguiente condición, que es un análogo estocástico de las Condiciones 1 y 2:

Condición 1': Para todo $\omega \in \Omega$, (i) cada componente de $Z(\cdot, \omega)$ pertenece a $W^3[a, b]$, e (ii) para cierto $m > 0$, no dependiente de $\omega \in \Omega$, se cumple $Z(\cdot, \omega) \in A_m$.⁵

□

Bajo la condición 1', los efectos totales, ET y ETL , pueden expresarse como $ET = g(Z)$ y $ETL = h(Z)$ respectivamente, donde $g(\cdot)$ y $h(\cdot)$ son funciones de Z , cuyas expresiones vienen dadas por las Proposiciones 2 y 3, respectivamente. Se comprueba directamente que tanto g como h son aplicaciones (funcionales) continuas en el conjunto A_m , es decir, para todo $Z, Z' \in A_m$, $\|Z' - Z\| \rightarrow 0$ implica $|g(Z') - g(Z)| \rightarrow 0$ y $|h(Z') - h(Z)| \rightarrow 0$. (Esto se deduce directamente, mediante el mismo procedimiento utilizado para la demostración de las Proposiciones 2 y 3 y los Lemas A.1 a A.3 en el Anexo I.) Como Z es $\mathbf{B}(S)$ -medible, la continuidad de $g(\cdot)$ y $h(\cdot)$ implica que $ET = g(Z)$ y $ETL = h(Z)$ son variables aleatorias (e.g., Billingsley, 1968, Apéndice II, pág. 222), es decir son funciones medibles respecto de la σ -álgebra $\mathbf{B}(\mathfrak{R})$, definida sobre la recta real \mathfrak{R} .

Consideraremos ahora el comportamiento probabilístico de los aproximadores ET_n y ETL_n , construidos como se indica en la sección anterior. Bajo la Condición 1' derivaremos fácilmente el carácter de variables aleatorias de ET_n y ETL_n . Bajo la Condición 1', para cada $\omega \in \Omega$, las realizaciones $ET_n(\omega)$ y $ETL_n(\omega)$ de las integrales estocásticas ET_n y ETL_n son integrales clásicas de Riemann, por lo que la extensión es directa.⁶

⁵ Los resultados de esta sección se obtienen igualmente asumiendo que la Condición 1' se cumple excepto en un conjunto $N \in \mathbf{A}$ tal que $P(N) = 0$.

⁶ El uso que hacemos del Teorema de la Aplicación Continua en principio requiere que las integrales estén definidas en el sentido convencional para cada $\omega \in \Omega$, no siendo suficiente

Proposición 4: *Bajo la Condición 1':*

(a) *Para todo n suficientemente grande ET_n y ETL_n son $\mathbf{B}(\mathfrak{R})$ -medibles.*

(b) *Cuando $n \rightarrow \infty$, se cumple con probabilidad 1 (y por tanto en distribución): $ET_n \rightarrow ET$ y $ETL_n \rightarrow ET$.*

2.5. Conclusiones

En este capítulo hemos establecido, utilizando el problema de la descomposición de la intensidad del consumo de energía, que las descomposiciones exactas -basadas en aproximaciones mediante splines naturales a las trayectorias o series temporales acumuladas- convergen hacia los valores teóricos de la teoría de Divisia en tiempo continuo, que por tanto son límites (deterministas y estocásticos, respectivamente) de las aproximaciones construidas a partir de splines naturales. Nuestra propuesta incorpora una serie de ventajas, que incluyen el carácter no paramétrico del método, su naturaleza objetiva o automática (en el sentido de que no depende de parámetros que deba elegir subjetivamente el investigador), así como el hecho de que es un método exhaustivo (ausencia de residuo) y verifica de manera natural la propiedad circular de los números índices, permitiendo la descomposición en series temporales. El método es aplicable (incluso en descomposiciones multinivel), con la única condición de que se disponga de series temporales de suficiente longitud para todas las magnitudes que entran en la descomposición. Aplicaremos el MSN en el Capítulo 6, donde el análisis se basa en series temporales relativamente largas.

Para obtener estos resultados hemos explotado propiedades matemáticas

el uso de integrales más generales en media cuadrática, que por otra parte requieren ciertas condiciones restrictivas, como la finitud de la varianza (e.g., Tanaka, 1996, cap. 3, pag. 71).

clásicas de los splines. Aproximaciones más sencillas como la interpolación lineal por tramos no poseen, en principio, el grado de diferenciabilidad requerido para aproximar simultáneamente las trayectorias y sus derivadas hasta el orden 2, tal y como se requiere en este problema.

Finalmente, los resultados de este capítulo se pueden extender directamente al caso de la descomposición (aditiva o multiplicativa) de la variación del producto de un número finito de componentes o trayectorias temporales (e.g., Fernández y Fernández, 2008), así como al caso más general de la descomposición de funcionales diferenciables de un vector de trayectorias suaves.

Anexo I: Demostraciones matemáticas del Capítulo 2

Para demostrar la Proposición 2 necesitamos los siguientes lemas.

Lema A.1. *Bajo las Condiciones 1 y 2, existe una constante $B < \infty$ tal que, para $j = 1, \dots, r$ y $0 \leq \alpha \leq 2$ se cumple:*

$$(a) \max_{t \in [0,1]} |D^\alpha \hat{E}_j(t) - D^\alpha E_j(t)| \leq B(n-1)^{-(3-\alpha)}, \text{ y}$$

$$(b) \max_{t \in [0,1]} |D^\alpha \hat{Y}_j(t) - D^\alpha Y_j(t)| \leq B(n-1)^{-(3-\alpha)}.$$

□

Demostración: El Lema es una consecuencia directa de la Proposición 1. □

Lema A.2. *Bajo las Condiciones 1 y 2, existen constantes $B_k < \infty, k = 1, \dots, 4$, tales que, para todo $j = 1, \dots, r$ y $0 \leq \alpha \leq 2$, se cumple lo siguiente para todo $0 \leq t \leq 1$ y $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, donde B es como en el Lema A.1 y no depende de t :*

$$(a) |\hat{I}_j(t) - I_j(t)| \leq B_1(n-1)^{-2},$$

$$(b) |\hat{S}_j(t) - S_j(t)| \leq B_2(n-1)^{-2},$$

$$(c) |D^1 \hat{I}_j(t) - D^1 I_j(t)| \leq B_3(n-1)^{-1},$$

$$(d) |\hat{S}_j^{(1)}(t) - S_j^{(1)}(t)| \leq B_4(n-1)^{-1}.$$

□

Demostración:

En la demostración de este lema (y en el resto de este Anexo) haremos uso de la propiedad de que cualquier función continua en $[0,1]$ está acotada en dicho intervalo. De ahí se deriva, bajo las Condiciones 1(i) y 2(i), que existe una

constante $M < \infty$ tal que $\max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{0 \leq t \leq 1} |D^\alpha E_j(t)| \leq M$ y $\max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{0 \leq t \leq 1} |D^\alpha Y_j(t)| \leq M$ para todo $j = 1, \dots, r$. Lo mismo se cumple para las funciones de consumo y producción agregadas acumuladas (respectivamente, $E(t)$ e $Y(t)$).

Seleccionemos un punto arbitrario $t \in [0, 1]$. Respecto al enunciado (a), tenemos:

$$|\hat{I}_j(t) - I_j(t)| = \left| \frac{\hat{e}_j(t)}{\hat{y}_j(t)} - \frac{e_j(t)}{y_j(t)} \right| \leq A_I + A_{II}, \text{ donde } A_I = \left| \frac{\hat{e}_j(t)}{\hat{y}_j(t)} - \frac{e_j(t)}{\hat{y}_j(t)} \right| \text{ y } A_{II} = \left| \frac{e_j(t)}{\hat{y}_j(t)} - \frac{e_j(t)}{y_j(t)} \right|.$$

Respecto a A_I , el Lema A.1 implica que $\hat{y}_j(t) = y_j(t) + A_{III}$, donde el valor absoluto de $A_{III} = \hat{y}_j(t) - y_j(t)$ es no superior a $B(n-1)^{-2}$. Por tanto, A_{III} puede hacerse arbitrariamente pequeño, y en particular menor que $m/2$, simplemente con tomar $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$. Como la condición 2(ii) es que $y_j(t) \geq m > 0$, se obtiene que para todo n suficientemente grande se cumple $\hat{y}_j(t) = y_j(t) + A_{III} \geq m - m/2 = m/2 > 0$. De ahí se obtiene

$$A_I = \left| \frac{\hat{e}_j(t) - e_j(t)}{\hat{y}_j(t)} \right| \leq \frac{B}{m/2} (n-1)^{-2}.$$

Respecto a A_{II} tenemos:

$$A_{II} = |e_j(t)| \cdot \left| \frac{y_j(t) - \hat{y}_j(t)}{y_j(t)\hat{y}_j(t)} \right|$$

Como $|e_j(t)| \leq M < \infty$ debido a su continuidad en $[0, 1]$, se obtiene, aplicando el Lema A.1(b), para $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, que $A_{II} \leq \frac{M}{m^2/2} B(n-1)^{-2}$.

Por tanto $A_I + A_{II} \leq B_1(n-1)^{-2}$ para todo n suficientemente grande. Como t es arbitrario se obtiene la convergencia uniforme y queda demostrado el enunciado (a).

Respecto a (b), para cualquier $t \in [0, 1]$ tenemos

$$|\hat{S}_j(t) - S_j(t)| = \left| \frac{\hat{y}_j(t)}{\hat{y}(t)} - \frac{y_j(t)}{y(t)} \right| \leq A_I + A_{II},$$

$$\text{donde } A_I = \frac{|\hat{y}_j(t) - y_j(t)|}{\hat{y}(t)} \text{ y } A_{II} = \left| y_j(t) \frac{y(t) - \hat{y}(t)}{y(t)\hat{y}(t)} \right|.$$

Para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$ se cumple

$$\hat{y}(t) = \sum_{j=1}^r \hat{y}_j(t) = \sum_{j=1}^r y_j(t) + \sum_{j=1}^r (\hat{y}_j(t) - y_j(t)) \geq rm + rm/2 = rm/2 > 0.$$

Por tanto, $A_I \leq \frac{2}{rm} B(n-1)^2$ y $A_{II} \leq \frac{2M}{r^2 m^2} B(n-1)^2$, de modo que para todo

$n > 1 + (2B/m)^{1/2}$ se cumple

$$|\hat{S}_j(t) - S_j(t)| \leq B_2(n-1)^2.$$

De nuevo, como t es arbitrario la convergencia es uniforme.

Con relación a (c), tomemos un t arbitrario en $[0,1]$ y apliquemos las reglas de la derivación de cocientes de funciones. Tenemos $|D^1 \hat{I}_j(t) - D^1 I_j(t)| = |A_I - A_{II}|$, donde

$$A_I = \frac{D^1 \hat{e}_j(t) \hat{y}_j(t) - \hat{e}_j(t) D^1 \hat{y}_j(t)}{(\hat{y}_j(t))^2}$$

y

$$A_{II} = \frac{D^1 e_j(t) y_j(t) - e_j(t) D^1 y_j(t)}{(y_j(t))^2}.$$

Aplicando la desigualdad triangular, se cumple $|A_I - A_{II}| \leq |A_I - A_{III}| + |A_{III} - A_{II}|$, siendo

$$A_{III} = \frac{D^1 e_j(t) y_j(t) - e_j(t) D^1 y_j(t)}{(\hat{y}_j(t))^2}.$$

Se obtiene directamente que, para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, existe un $B_5 < \infty$ tal que $|A_I - A_{II}| \leq B_5(n-1)^{-1}$.

Del mismo modo, la continuidad (y por tanto acotación en $[0,1]$) de las derivadas hasta el orden 2 de Y_j y E_j implica, para un $M < \infty$, que

$$|D^1 e_j(t) y_j(t) - e_j(t) D^1 y_j(t)| \leq |D^1 e_j(t)| \cdot |y_j(t)| + |e_j(t)| \cdot |D^1 y_j(t)| \leq 2M^2.$$

De ahí se deduce, para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$ y un $B_6 < \infty$, que $|A_{II} - A_{III}| \leq \frac{4M^2}{m^2} B(n-1)^{-2}$. Por tanto, $|A_I - A_{II}| \leq |A_I - A_{III}| + |A_{III} - A_{II}| \leq B_3(n-1)^{-1}$ para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, siendo la convergencia uniforme.

Respecto a (d), se aplica un procedimiento de prueba similar. Tenemos

$$|D^1 \hat{S}_j(t) - D^1 S_j(t)| \leq |A_I - A_{III}| + |A_{III} - A_{II}|, \quad \text{donde} \quad A_I = \frac{D^1 \hat{y}_j(t) \hat{y}(t) - \hat{y}_j(t) D^1 \hat{y}(t)}{(\hat{y}(t))^2},$$

$$A_{II} = \frac{D^1 y_j(t) y(t) - y_j(t) D^1 y(t)}{(y(t))^2} \quad \text{y} \quad A_{III} = \frac{D^1 y_j(t) y(t) - y_j(t) D^1 y(t)}{(\hat{y}(t))^2}.$$

De nuevo se obtiene que, para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, existe un $B_6 < \infty$ tal que $|A_I - A_{II}| \leq B_6(n-1)^{-1}$. Dado que, para un $M < \infty$, se cumple $|D^1 y_j(t) y(t) - y_j(t) D^1 y(t)| \leq |D^1 y_j(t)| \cdot |y(t)| + |y_j(t)| \cdot |D^1 y(t)| \leq rM^2$, y como $|(y(t))^2 - (\hat{y}(t))^2| = |y(t) + \hat{y}(t)| \cdot |y(t) - \hat{y}(t)| \leq (2M + B(n-1)^{-2}) B(n-1)^{-2}$, resulta para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$:

$$|A_{III} - A_{II}| \leq \frac{|D^1 y_j(t) y(t) - y_j(t) D^1 y(t)| \cdot |(y(t))^2 - (\hat{y}(t))^2|}{(y(t))^2 (\hat{y}(t))^2} \leq \frac{4rM^2(2M+1)}{r^4 m^4} (2M + B(n-1)^{-2}) B(n-1)^{-2}$$

de manera que para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$ y cualquier $0 \leq t \leq 1$ existe $B_4 < \infty$ (no dependiente de t), tal que $|A_I - A_{II}| \leq |A_I - A_{III}| + |A_{III} - A_{II}| \leq B_3(n-1)^{-1}$.

□

Lema A.3. Sean

$$D^1 I(t) = \sum_{j=1}^r (D^1 I_j(t) S_j(t) + I_j(t) D^1 S_j(t))$$

y

$$D^1\hat{I}(t) = \sum_{j=1}^r (D^1\hat{I}_j(t)\hat{S}_j(t) + \hat{I}_j(t)D^1\hat{S}_j(t)).$$

Bajo las Condiciones 1 y 2, existe una constante $B_5 < \infty$ tal que, para todo $0 \leq t \leq 1$ y todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, donde B es como en el Lema A.1, se cumple

$$|D^1\hat{I}_j(t) - D^1I_j(t)| \leq B_5(n-1)^{-1}.$$

□

Demostración:

Es una consecuencia directa del Lema A.2, que establece que cada componente de $D^1\hat{I}(t)$ converge uniformemente hacia su análogo de $D^1I(t)$. A efectos de establecer la convergencia uniforme debe observarse que todas las magnitudes que aparecen en $D^1I(t)$ están acotadas uniformemente en $0 \leq t \leq 1$. En particular:

$$|I_j(t)| = \left| \frac{e_j(t)}{y_j(t)} \right| \leq \frac{M}{m}, \quad |S_j(t)| = \left| \frac{y_j(t)}{y(t)} \right| \leq \frac{M}{rm}, \quad |D^1I_j(t)| = \frac{|D^1e_j(t)y_j(t) - e_j(t)D^1y_j(t)|}{(y_j(t))^2} \leq \frac{2M^2}{m^2} \quad \text{y}$$

$$|D^1S_j(t)| = \frac{|D^1y_j(t)y(t) - y_j(t)D^1y(t)|}{(y(t))^2} \leq \frac{2M^2}{r^2m^2}.$$

Cotas uniformes similares se obtienen para las componentes de $D^1\hat{I}(t)$, pues de acuerdo al Lema A.2, cuando $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, se tiene para todo $0 \leq t \leq 1$,

$$|\hat{I}_j(t)| \leq |I_j(t)| + |\hat{I}_j(t) - I_j(t)| \leq \frac{M}{m} + B_1(n-1)^{-2},$$

$$|\hat{S}_j(t)| \leq |S_j(t)| + |\hat{S}_j(t) - S_j(t)| \leq \frac{M}{rm} + B_2(n-1)^{-2},$$

$$|D^1\hat{I}_j(t)| \leq |D^1I_j(t)| + |D^1\hat{I}_j(t) - D^1I_j(t)| \leq \frac{2M^2}{m^2} + B_3(n-1)^{-1}$$

y

$$|D^1\hat{S}_j(t)| \leq |D^1S_j(t)| + |D^1\hat{S}_j(t) - D^1S_j(t)| \leq \frac{2M^2}{r^2m^2} + B_4(n-1)^{-1}.$$

Utilizando la descomposición $D^1\hat{I}(t) - D^1I(t) = A_I + A_{II}$, donde

$$A_I = \sum_{j=1}^r (D^1\hat{I}_j(t)\hat{S}_j(t) + \hat{I}_j(t)D^1\hat{S}_j(t)) - \sum_{j=1}^r (D^1I_j(t)S_j(t) + I_j(t)D^1S_j(t))$$

y

$$A_{II} = \sum_{j=1}^r (D^1 \hat{I}_j(t) S_j(t) + \hat{I}_j(t) D^1 S_j(t)) - \sum_{j=1}^r (D^1 I_j(t) S_j(t) + I_j(t) D^1 S_j(t)),$$

y aplicando las acotaciones anteriores, se obtiene directamente que existe un $B_5 < \infty$ tal que, para todo t en $[0,1]$ y $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, se cumple $|D^1 \hat{I}(t) - D^1 I(t)| \leq |A_I| + |A_{II}| \leq B_5(n-1)^{-1}$.

□

Demostración de la Proposición 2

Es una consecuencia directa del Lema A.3. Se comprueba fácilmente que $D^1 I(t)$ es continua en $[0,1]$, y por tanto acotada e integrable, pues es un cociente de funciones continuas y estrictamente positivas. Para todo t en $[0,1]$ se cumple

$$|D^1 I(t)| = \frac{|D^1 e(t)y(t) - e(t)D^1 y(t)|}{(y(t))^2} \leq \frac{2M^2}{m^2}. \text{ Un resultado análogo se obtiene para } D^1 \hat{I}(t)$$

cuando $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, pues entonces $\hat{y}(t) \geq rm/2 > 0$ y así $D^1 \hat{I}(t)$ es un cociente de funciones continuas cuyo denominador es estrictamente positivo (con una cota inferior positiva no dependiente de n).

Aplicando el Lema 3, se obtiene

$$|ET_n - ET| = \left| \int_0^1 D^1 \hat{I}(t) dt - \int_0^1 D^1 I(t) dt \right| \leq \int_0^1 |D^1 \hat{I}(t) - D^1 I(t)| dt \leq B_5(n-1)^{-1} \int_0^1 dt = B_5(n-1)^{-1}$$

para todo $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, lo que demuestra la parte (b), y por tanto la (a).

□

Demostración de la Proposición 3

Es una consecuencia directa del Lema A.3. Seleccionemos un t arbitrario en $[0,1]$ y

$$\text{apliquemos la descomposición } \left| \frac{D^1 \hat{I}(t)}{\hat{I}(t)} - \frac{D^1 I(t)}{I(t)} \right| \leq A_I + A_{II}, \text{ donde } A_I = \frac{|D^1 \hat{I}(t) - D^1 I(t)|}{\hat{I}(t)}$$

$$\text{y } A_{II} = \left| \frac{D^1 I(t)}{\hat{I}(t)} - \frac{D^1 I(t)}{I(t)} \right|.$$

En la demostración del Lema A.3 se obtuvo, para todo t en $[0,1]$ y $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$, la expresión $|D^1\hat{I}(t) - D^1I(t)| \leq B_5(n-1)^{-1}$. Por otra parte, $\frac{m}{M} \leq \frac{1}{I(t)} = \frac{y(t)}{e(t)} \leq \frac{M}{m}$.

Por un procedimiento similar la del Lema A.2 (a) se puede demostrar que, para todo t en $[0,1]$ y $n > 1 + (2B/m)^{1/2}$ se cumple $|\hat{I}(t) - I(t)| \leq B_6(n-1)^{-2}$, para $B_6 < \infty$ no dependiente de t .

Por otra parte, se tiene $\frac{1}{\hat{I}(t)} = \frac{1}{I(t)} + \frac{I(t) - \hat{I}(t)}{I(t)\hat{I}(t)}$, y para todo n suficientemente grande se obtiene $|\hat{I}(t) - I(t)| \leq B_6(n-1)^{-2} \leq \frac{m}{2M}$ (basta tomar $n \geq \sqrt{B_6 \frac{2M}{m}} - 1$). De ahí, $\hat{I}(t) = I(t) + (\hat{I}(t) - I(t)) \geq \frac{m}{M} + \frac{2}{2M} = \frac{m}{2M}$.

Por tanto, se cumple:

$$\left| \frac{1}{\hat{I}(t)} \right| = \left| \frac{1}{I(t)} + \frac{I(t) - \hat{I}(t)}{I(t)\hat{I}(t)} \right| \leq \frac{M}{m} + \frac{2M^2}{m^2} B_6(n-1)^{-2}$$

Y así, para todo n suficientemente grande, se tiene

$$A_I = \frac{|D^1\hat{I}(t) - D^1I(t)|}{\hat{I}(t)} \leq \left(1 + \frac{M}{m}\right) B_5(n-1)^{-1}.$$

Respecto de A_{II} , tenemos $A_{II} = \frac{|D^1I(t)| \cdot |I(t) - \hat{I}(t)|}{I(t)\hat{I}(t)}$. Como aparece en la demostración

de la Proposición 2, para todo n suficientemente grande se cumple $|D^1I(t)| \leq \frac{2M^2}{m^2}$, y aplicando las acotaciones que acabamos de obtener para las componentes de A_I resulta:

$$A_{II} = \frac{|D^1 I(t)| \cdot |I(t) - \hat{I}(t)|}{I(t)\hat{I}(t)} \leq \frac{2M^2}{m} \times M \left(1 + \frac{M}{m}\right) B_6 (n-1)^{-2}$$

Por tanto, existe $B_7 < \infty$ tal que, para todo t en $[0,1]$, obtenemos

$$\left| \frac{D^1 \hat{I}(t)}{\hat{I}(t)} - \frac{D^1 I(t)}{I(t)} \right| \leq B_7 (n-1)^{-1}.$$

Se demuestra, por el mismo procedimiento que en la Proposición 2, que para todo t en $[0,1]$ se cumple $I(t) > 0$, y lo mismo ocurre en el caso de $\hat{I}(t)$, para todo n grande. Esto garantiza que la siguiente integral de Riemann es finita y

$$|E\hat{T}L_n - ETL| = \left| \int_0^1 (D^1 \ln \hat{I}(t) - D^1 \ln I(t)) dt \right| \leq \int_0^1 |D^1 \ln \hat{I}(t) - D^1 \ln I(t)| dt \leq B_7 (n-1)^{-1} \int_0^1 dt = B_5 (n-1)^{-1}$$

para todo n grande, lo que demuestra las dos partes de la proposición.

□

Demostración de la Proposición 4

Comenzamos por demostrar (a), que el vector de trayectorias acumuladas interpoladas, $\hat{Z}_n = (\hat{z}_{1,n}, \dots, \hat{z}_{2r,n})$, para cualquier conjunto de nudos $N_n = \{t_i = (i-1)/(n-1), i = 1, \dots, n\}$, con n fijo, es $\mathbf{B}(S)$ -medible. Utilizaremos la notación $(\cdot)_n$ para referirnos al operador que asocia a cada trayectoria en $C^2[0,1]$ su interpolador de splines naturales con n nudos, situados en N_n . Así, $\hat{z}_{j,n} = (z_j)_n$ es el spline natural que interpola la trayectoria z_j en N_n .

Es suficiente demostrar que $(\cdot)_n$ es una aplicación continua de $C^2[0,1]$ en $C^2[0,1]$, lo cual implica que también es continua como función vectorial de S en S , y que por tanto $\hat{Z}_n = (Z)_n$ es $\mathbf{B}(S)$ -medible. Tomemos dos funciones arbitrarias $f, f' \in C^2[0,1]$, equipada con la norma $\|\cdot\|$ (para el caso de 1 sola trayectoria). Nos basta demostrar que, dado n fijo (y por tanto un conjunto de nudos fijo), $\|f - f'\| \rightarrow 0$ implica $\|\hat{f} - \hat{f}'\| \rightarrow 0$. Esto se deduce de que, como veremos, $(\cdot)_n$ es un operador lineal continuo.

En efecto, se puede demostrar que el conjunto de splines naturales de orden 2 (éste es el grado de derivabilidad continua que requerimos) y nudos en N_n forman un espacio vectorial de dimensión n . Esto significa que el interpolador $\hat{f}_n(t)$ de tipo spline natural para la función $f \in C^2[0,1]$ es único (Powell, 1981, cap. 23, Teorema 23.1) y tiene la expresión siguiente:

$$\hat{f}_n(t) = \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_{i,n} \phi_{i,n}(t)$$

donde $(\phi_{1,n}, \dots, \phi_{n,n})$ es un vector de n funciones linealmente independientes de $C^2[0,1]$. Los valores de $\hat{\beta}_n = (\hat{\beta}_{1,n}, \dots, \hat{\beta}_{n,n})^T$ se obtienen al imponer las n condiciones de interpolación en N_n , a saber, $f(t_i) = \hat{f}(t_i), i = 1, \dots, n$; las cuales equivalen a resolver el sistema de ecuaciones lineales $f_n = \Phi_n \hat{\beta}_n$, donde $f_n = (f(t_1), \dots, f(t_n))^T$ y $\Phi_n = [c_{i,k}]$; $i, k = 1, \dots, n$, es una matriz cuadrada cuyos elementos son de la forma $c_{i,k} = \phi_{i,n}(t_k)$. La unicidad de la solución del problema implica que la matriz Φ_n es no singular, de modo que $\hat{\beta}_n = \Phi_n^{-1} f_n$, con la condición de que $n > 3$ (al ser 3 el orden del spline natural) y que $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n = 1$, lo cual N_n cumple automáticamente.

Consideremos ahora otra función $f' \in C^2[0,1]$, y sea $\hat{f}'_n(t) = \sum_{i=1}^n \hat{\beta}'_{i,n} \phi_{i,n}(t)$ su interpolador de spline natural en N_n , con $\hat{\beta}'_n = (\hat{\beta}'_{1,n}, \dots, \hat{\beta}'_{n,n})^T$. Para cualquier $0 \leq \alpha \leq 2$, sea $0 \leq t \leq 1$ arbitrario. Tenemos:

$$\begin{aligned} |D^\alpha f'_n(t) - D^\alpha f_n(t)| &= \left| \sum_{i=1}^n D^\alpha \phi_{i,n}(t) (\beta'_{i,n} - \beta_{i,n}) \right| \leq \sum_{i=1}^n |D^\alpha \phi_{i,n}(t)| |\beta'_{i,n} - \beta_{i,n}| \leq \\ \max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{i=1, \dots, n} |D^\alpha \phi_{i,n}(t_i)| \cdot \sum_{i=1}^n |\hat{\beta}'_{i,n} - \hat{\beta}_{i,n}| &\leq \max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{t \in [0,1]} |D^\alpha \phi_{i,n}(t)| n n^{-1} \sum_{i=1}^n |\hat{\beta}'_{i,n} - \hat{\beta}_{i,n}| \leq \\ \max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{t \in [0,1]} |D^\alpha \phi_{i,n}(t)| n \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{\beta}'_{i,n} - \hat{\beta}_{i,n})^2} & \end{aligned}$$

Como $\hat{\beta}'_n - \hat{\beta}_n = \Phi_n^{-1} e_n$, donde $e_n = f'_n - f_n$, tenemos

$$\sqrt{(\hat{\beta}'_n - \hat{\beta}_n)^T (\hat{\beta}'_n - \hat{\beta}_n)} = \sqrt{e_n^T (\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1} e_n}.$$

Dado que la matriz $(\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1}$ es simétrica y definida positiva, admite la descomposición ortogonal $(\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1} = P_n^T \Lambda_n P_n$, donde $P_n^T P_n = I_n$, siendo I_n la matriz unitaria de orden n y Λ_n una matriz diagonal en cuya diagonal principal se hallan los valores propios de $(\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1}$. Se obtiene directamente que $[e_n^T (\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1} e_n]^{1/2} = [e_n^T P_n^T \Lambda_n P_n e_n]^{1/2} \leq \lambda_1^{1/2} [e_n^T e_n]^{1/2}$, donde λ_1 es el mayor valor propio de $(\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1}$.

Por tanto, tenemos

$$\begin{aligned} \sqrt{(\hat{\beta}'_n - \hat{\beta}_n)^T (\hat{\beta}'_n - \hat{\beta}_n)} &= \sqrt{e_n^T (\Phi_n^{-1})^T \Phi_n^{-1} e_n} \leq \sqrt{\lambda_1} \sqrt{e_n^T e_n} = \sqrt{\lambda_1} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f'(t_i) - f(t_i))^2} \\ &\leq \sqrt{\lambda_1 n} \max_{i=1, \dots, n} |f'(t_i) - f(t_i)| \leq \sqrt{\lambda_1 n} \cdot \|f' - f\| \end{aligned}$$

y se cumple $|D^\alpha \hat{f}'_n(t) - D^\alpha \hat{f}_n(t)| \leq \max_{0 \leq \alpha \leq 2} \max_{t \in [0,1]} |D^\alpha \phi_{i,n}(t)| n \sqrt{\lambda_1} \|f' - f\|$. Como tanto α como t son arbitrarios la cota anterior es uniforme, y por tanto $\|\hat{f}'_n - \hat{f}_n\| \rightarrow 0$ cuando $\|f' - f\| \rightarrow 0$, lo que implica la continuidad (en términos de la distancia inducida por la norma $\|f\| = \max_{0 \leq \alpha \leq 1} \max_{0 \leq t \leq 1} |D^\alpha f(t)|$ en $C^2[0,1]$) del interpolador de splines naturales \hat{f}_n . Esto implica evidentemente que la aplicación de S en S definida por la operador interpolador de spline natural con nudos en N_n , aplicada elemento a elemento de $Z = (z_1, \dots, z_{2r})$, es decir, $\hat{Z}_n = (Z)_n = ((z_1)_n, \dots, (z_{2r})_n)$, es continua con relación a la métrica inducida por la norma $\|Z\| = \max_{j=1, \dots, 2r} \max_{0 \leq \alpha \leq 1} \max_{0 \leq t \leq 1} |D^\alpha z_j(t)|$. (Utilizamos por brevedad el mismo símbolo, $\|\cdot\|$, para las normas en $C^2[0,1]$ y S ; el contexto permite fácilmente identificar la definición aplicable en cada caso.)

Dado que hemos asumido que el vector Z de trayectorias aleatorias es $\mathbf{B}(S)$ -medible, el vector aproximador \hat{Z}_n , construido mediante interpolación de splines naturales, también es $\mathbf{B}(S)$ -medible, al obtenerse mediante una transformación continua (y por tanto medible) de Z .

La parte (b) del enunciado se obtiene directamente. Para $n > 3$ el interpolador de splines naturales \hat{Z}_n es único y $\mathbf{B}(S)$ -medible, según hemos establecido en la parte (a) de la Proposición. Seleccionemos un punto arbitrario $\omega \in \Omega$. Por la Condición 1'.(i) cada componente del vector de trayectorias observado $Z(\cdot, \omega)$ pertenece a $W^3[0,1]$, y la Proposición A.1 establece, dado $\omega \in \Omega$, la convergencia (uniforme en t) $\|\hat{Z}_n(\cdot, \omega) - Z(\cdot, \omega)\| \rightarrow 0$ cuando $n \rightarrow \infty$. Dado que la Condición 1'.(ii) establece que para algún $m > 0$ y todo $\omega \in \Omega$ se cumple $\min_{0 \leq t \leq 1} D^1 z_j(t, \omega) \geq m$, se obtiene entonces que, para todo j y $n = n(\omega)$ suficientemente grande se tiene (uniformemente en t), $D^1 \hat{Z}_j(t, \omega) = D^1 z_j(t, \omega) + (D^1 \hat{Z}_j(t, \omega) - D^1 z_j) \geq m - m/2 = m' > 0$. Ello se debe a que $\min_{j=1, \dots, 2r} \min_{0 \leq t \leq 1} D^1 z_j(t, \omega) \geq m$ por la Condición 1'.(ii) y $\max_{0 \leq t \leq 1} |D^1 \hat{Z}_j(t, \omega) - D^1 z_j(t, \omega)| \rightarrow 0$ cuando $n \rightarrow \infty$ por la Proposición A.1. Por tanto, para todo $\omega \in \Omega$ y $n = n(\omega)$ suficientemente grande se cumple $\min_{j=1, \dots, 2r} \min_{0 \leq t \leq 1} D^1 \hat{Z}_j(t, \omega) \geq m' > 0$, es decir $\hat{Z}_n(\cdot, \omega) \in A_{m'}$.

Se comprueba fácilmente que, para cualquier $m' > 0$, los funcionales $g(Z)$ y $h(Z)$ que definen, respectivamente, a ET y ETL , son continuos (y por tanto $\mathbf{B}(S)$ -medibles en $A_{m'}$, que es, a su vez, un subconjunto cerrado con interior no vacío de S , formado por las funciones Z en S cuyas coordenadas están en $W^3[0,1]$ y cumplen $\min_{j=1, \dots, 2r} \min_{0 \leq t \leq 1} D^1 z_j(t, \omega) \geq m'$ para $m' > 0$ prefijado no dependiente de ω .

Por tanto, para todo $\omega \in \Omega$ y $n = n(\omega)$ suficientemente grande, la realización del interpolador de Z también tiene derivada primera uniformemente mayor que algún $m' > 0$, es decir, $\hat{Z}_n(\cdot, \omega) \in A_{m'}$. Por tanto, con probabilidad 1, se cumple $\hat{Z}_n \in A_{m'}$ cuando $n \rightarrow \infty$, y $ET_n = g(\hat{Z}_n)$ y $ETL_n = h(\hat{Z}_n)$ son funciones continuas (y por tanto $\mathbf{B}(\mathfrak{R})$ -medibles) de \hat{Z}_n para todo n suficientemente grande.

Una vez establecido que ET_n y ETL_n son, para n suficientemente grande, variables aleatorias, su convergencia con probabilidad 1 hacia ET y ETL se establece por el

mismo procedimiento utilizado en las Proposiciones 2 y 3, aplicado a una realización arbitraria $\omega \in \Omega$, dado que las integrales de Riemann que definen ET y ETL están definidas (en el sentido matemático clásico) para cada realización $\omega \in \Omega$. Las demostraciones de los Lemas A.1-A.3 y las Proposiciones 2 y 3 se extienden íntegramente al caso aleatorio, con la única particularidad de que los coeficientes de Lipschitz (B_1, \dots, B_6) que aparecen en las acotaciones de los errores de aproximación varían con cada realización ω del experimento aleatorio.

CAPÍTULO 3.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS EMISIONES TOTALES DE CO₂ DE LA UE-27 EN EL PERÍODO 2001-2008

3.1. Introducción

3.2. Exposición de la metodología

3.2.1. Descomposición multiplicativa mediante el método LMDI

3.2.2. Descomposición aditiva mediante el método LMDI

3.3. Análisis empírico: la variación de las emisiones totales de CO₂ en la UE-27

3.3.1. Resultados de la descomposición multiplicativa

3.3.2. La descomposición aditiva

3.4. Conclusiones

CAPÍTULO 3.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS EMISIONES TOTALES DE CO₂ DE LA UE-27 EN EL PERÍODO 2001-2008

3.1. Introducción

El análisis de los indicadores de energía y medio ambiente, así como de los cambios que éstos experimentan en el tiempo y las diferencias en los mismos entre países son cuestiones importantes en el análisis de la política energética. En particular, en este capítulo nos centraremos en los cambios en las emisiones de CO₂.

Como se ha expuesto en el Capítulo 1, existen básicamente dos formas de descomposición basadas en índices: (a) la descomposición multiplicativa, en la que los efectos son el resultado de la factorización de un índice, siendo por tanto adimensionales, y (b) la descomposición aditiva, en la que los efectos se cuantifican en las unidades de medida en que viene expresada la magnitud a descomponer.

En este capítulo se aborda la descomposición multiplicativa y aditiva de la variación de las emisiones totales de CO₂ de la Unión Europea (UE-27) para el período 2001-2008. Nuestro propósito es identificar, cuantificar y explicar los factores relacionados con estas variaciones. Generalmente, en la literatura medioambiental y energética, la descomposición de las variaciones de un

indicador se plantea en dos o tres factores.¹ Nosotros proponemos una descomposición en cinco factores determinantes que nos conducirá a medir los efectos que denominaremos población, renta per cápita, intensidad, mezcla de combustibles y carbonización. Para ello adaptaremos la metodología general del Capítulo 1, centrándonos en el método de Divisia con función de peso tipo media logarítmica (o LMDI, en la nomenclatura abreviada propuesta por Ang y Choi, 1997).

3.2. Exposición de la metodología

3.2.1. Descomposición multiplicativa mediante el método LMDI

Suponiendo que la descomposición se aplica a k regiones (o países) y m tipos de combustible, podemos expresar la emisión total de CO₂ (C) en la forma siguiente:

$$C = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m C_{jr} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m P_j \frac{Y_j}{P_j} \frac{E_j}{Y_j} \frac{E_{jr}}{E_j} \frac{C_{jr}}{E_{jr}} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m P_j G_j I_j M_{jr} U_{jr} \quad (3.1)$$

donde C_{jr} es la emisión de CO₂ para el combustible r en la región j , Y_j denota la producción industrial de la región j , P_j representa su población, E_j es el consumo total de energía de la región, $G_j = Y_j/P_j$ recoge su producción *per cápita*, $I_j = E_j/Y_j$ denota su intensidad energética, $M_{jr} = E_{jr}/E_j$ representa la variable mezcla de combustibles (distribución de los consumos de cada combustible en relación al total) y $U_{jr} = C_{jr}/E_{jr}$ denota el factor de

¹ La excepción son algunos estudios como Ang (1999) o Cheng y Rhee (2001), que utilizan cuatro factores, o aquéllos que descomponen separadamente el sector residencial (e.g., Freitas y Kaneko, 2011).

carbonización (ratio de masa de gas emitido por cada unidad de combustible consumido), referidos ambos al combustible r y la región j .

Tomando derivadas logarítmicas con respecto al tiempo en la ecuación (3.1) se obtiene:

$$\frac{d \ln C}{dt} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \frac{P_j G_j I_j M_{jr} U_{jr}}{C} \left(\frac{d \ln P_j}{dt} + \frac{d \ln G_j}{dt} + \frac{d \ln I_j}{dt} + \frac{d \ln M_{jr}}{dt} + \frac{d \ln U_{jr}}{dt} \right) \quad (3.2)$$

Integrando la ecuación (3.2) resulta:

$$\ln \frac{C_T}{C_0} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \left(\frac{d \ln P_j(t)}{dt} + \frac{d \ln G_j(t)}{dt} + \frac{d \ln I_j(t)}{dt} + \frac{d \ln M_{jr}(t)}{dt} + \frac{d \ln U_{jr}(t)}{dt} \right) dt \quad (3.3)$$

donde

$$w_{jr}(t) = \frac{P_j(t) G_j(t) I_j(t) M_{jr}(t) U_{jr}(t)}{C(t)} = \frac{P_j(t) G_j(t) I_j(t) M_{jr}(t) U_{jr}(t)}{\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m P_j(t) G_j(t) I_j(t) M_{jr}(t) U_{jr}(t)} \quad (3.4)$$

Aplicando la función exponencial a (3.3) obtenemos:

$$\frac{C_T}{C_0} = e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \frac{d \ln P_j(t)}{dt} dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \frac{d \ln G_j(t)}{dt} dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \frac{d \ln I_j(t)}{dt} dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \frac{d \ln M_{jr}(t)}{dt} dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t) \frac{d \ln U_{jr}(t)}{dt} dt \right)} \quad (3.5)$$

En los estudios empíricos se suele recurrir a una aproximación discreta de la expresión (3.5). En particular, se puede utilizar la siguiente fórmula para el cambio logarítmico:

$$\frac{C_T}{C_0} = e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t^*) \ln \left(\frac{P_{j,T}}{P_{j,0}} \right) dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t^*) \ln \left(\frac{G_{j,T}}{G_{j,0}} \right) dt \right)}$$

$$e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t^*) \ln \left(\frac{I_{j,T}}{I_{j,0}} \right) dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t^*) \ln \left(\frac{M_{jr,T}}{M_{jr,0}} \right) dt \right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T w_{jr}(t^*) \ln \left(\frac{U_{jr,T}}{U_{jr,0}} \right) dt \right)}$$
(3.6)

donde $w_{jr}(t^*)$ es una función de peso que viene dada por la ecuación (3.4), evaluada en el punto $t^* \in [0, T]$. Como este punto es en principio desconocido, podemos considerar varias funciones de peso, que nos conducirán a diferentes métodos de descomposición específicos.² Centrándonos en el método refinado desarrollado por Ang y Choi (1997), que utiliza la función de peso de tipo media logarítmica propuesta por Törnquist (1935) y Vartia (1974), la expresión de las ponderaciones es la siguiente:

$$w_{jr}(t^*) = \frac{L(w_{jr,0}, w_{jr,T})}{\sum_{j=1}^k L(w_{jr,0}, w_{jr,T})}$$
(3.7)

donde

$$w_{jr,0} = \frac{C_{jr,0}}{C_{j,0}}, \quad w_{jr,T} = \frac{C_{jr,T}}{C_{j,T}}$$

Sato (1976) y descrita en el Capítulo 1 (ecuación (1.14)).

Vartia (1974) y Sato (1976) propusieron el uso del valor agregado total como argumento de la función de pesos. En este caso se obtiene:

² Desde una perspectiva histórica, las primeras propuestas se basaban en índices de Laspeyres (Park, 1992) y Marshall-Edgeworth (Boyd *et al.*, 1987; Ang y Lee, 1994). Más recientemente, los trabajos de Liu *et al.* (1992), Ang (1995), Ang *et al.* (1998) y Sun (1998) han llevado a cabo una mejora notable de esta metodología, hasta el punto de que se proponen funciones de pesos que permiten adaptarse a las variaciones de las magnitudes y conducen a descomposiciones exactas.

$$L\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m C_{jr,0}, \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m C_{jr,T}\right) = L(C_0, C_T) \quad (3.8)$$

y

$$\tilde{w}_{jr}(t^*) = \frac{L(C_{jr,0}, C_{jr,T})}{L(C_0, C_T)} \quad (3.9)$$

Insertando la ecuación (3.9) en (3.6) obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{C_T}{C_0} = & e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T \tilde{w}_{jr}(t^*) \ln\left(\frac{P_{j,T}}{P_{j,0}}\right) dt\right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T \tilde{w}_{jr}(t^*) \ln\left(\frac{G_{j,T}}{G_{j,0}}\right) dt\right)} \\ & e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T \tilde{w}_{jr}(t^*) \ln\left(\frac{I_{j,T}}{I_{j,0}}\right) dt\right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T \tilde{w}_{jr}(t^*) \ln\left(\frac{M_{jr,T}}{M_{jr,0}}\right) dt\right)} e^{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m \int_0^T \tilde{w}_{jr}(t^*) \ln\left(\frac{U_{jr,T}}{U_{jr,0}}\right) dt\right)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

La expresión (3.10) puede reescribirse como:

$$R_{tot} = R_{pop} R_{ypc} R_{int} R_{mix} R_{car} \quad (3.11)$$

donde $R_{tot} = C_T/C_0$ es el cambio total de C entre los años 0 y T (*efecto total*), R_{pop} denota el impacto asociado al cambio de la población (*efecto población*), R_{ypc} refleja la influencia del PIB per cápita (*efecto PIB per cápita*), R_{int} denota el impacto de la intensidad energética regional (*efecto intensidad*), R_{mix} cuantifica la importancia de la mezcla regional de combustibles (*efecto mix de combustibles*) y R_{car} denota el impacto de la intensidad de carbono de la energía (*efecto carbonización*).

En el contexto del análisis de descomposición, y sin renunciar en ciertos casos específicos a la posibilidad de emplear otros métodos igualmente válidos, Ang *et al.* (1998), Ang y Liu (2001) y Ang (2004) demostraron la superioridad del método LMDI. Sus principales ventajas son: (a) la inexistencia de componente residual (descomposición exacta), (b) el cumplimiento de las propiedades de

reversión temporal y de factores, (c) la existencia de una relación sencilla entre los enfoques aditivo y multiplicativo, (d) la capacidad de tratar la presencia de ceros en el conjunto de datos, y (e) la consistencia en la agregación.

3.2.2. Descomposición aditiva mediante el método LMDI

Sea $D_{tot} = C_T - C_0$ el cambio en el total de emisiones de CO₂ en el período comprendido entre los años 0 y T . De nuevo, deseamos descomponer esta diferencia en las contribuciones de cinco factores: población, PIB per cápita, intensidad de energía, mezcla de combustibles y carbonización. Una derivación análoga al caso multiplicativo proporciona la expresión:

$$D_{tot} = D_{pop} + D_{ypc} + D_{int} + D_{mix} + D_{car} \quad (3.12)$$

La propiedad aditiva del método LMDI (Ang, 2005) garantiza la equivalencia entre las descomposiciones multiplicativa y aditiva, lo que en puridad hace redundante el uso simultáneo de ambos esquemas. No obstante, en las secciones siguientes se exponen los resultados de ambos enfoques con el fin de proporcionar resultados más informativos.

3.3. Análisis empírico: la variación de las emisiones totales de CO₂ en la UE-27

En esta sección aplicamos la metodología LMDI que acabamos de describir al análisis de la variación de las emisiones de CO₂ en la UE-27 entre 2001 y

2008. Las fuentes de datos³ son las siguientes:

- Agencia Internacional de la Energía (OCDE 2008, 2010): proporciona datos sobre las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles en cada país (en millones de toneladas de CO₂). Estas emisiones están clasificadas en función de la procedencia de las mismas: carbón/turba, petróleo, gas y otros (resto de combustibles).
- Eurostat (Comisión Europea, 2011a-b): recoge información sobre la población de cada país, su Producto Interior Bruto a precios corrientes en paridad de poder de compra (en millones de euros), el consumo de energía del país y el desglose del consumo de energía por tipo de combustible y país (estos últimos en miles de toneladas equivalentes de petróleo).⁴

3.3.1. Resultados de la descomposición multiplicativa

El análisis de la información anterior indica que, en primer lugar, las emisiones totales de dióxido de carbono de la UE-27 sufren una caída del 1,448% entre 2001 y 2008 (R_{tot} , ver Tabla 3.1). Los efectos de la población, el PIB per cápita y la carbonización han resultado todos positivos, indicando una relación directa con el nivel de emisiones. Sin embargo, el peso de cada uno de ellos difiere considerablemente. La población -y especialmente la carbonización- parecen contribuir positivamente al incremento de las emisiones de dióxido de carbono

³ Aunque existen otras bases de datos -Marland *et al.* (2012), *Gapminder*, *Millennium Development Goals* o *United Nations Statistics Division (Environment and Energy Statistics)*, entre otras- requerimos el nivel de emisiones de CO₂ desagregado en función de los distintos tipos de combustibles, y ésta es precisamente la forma en que viene recogido en la fuente finalmente consultada -AIE (OCDE)-. Esta desagregación limita considerablemente el período de estudio debido a la menor disponibilidad de datos.

⁴ La disponibilidad conjunta de todas las series de datos necesarias para llevar a cabo la aplicación alcanzaba, en el momento de realización de esta tesis, hasta 2008.

de la UE-27 (en un 2,864% y un 13,262%, respectivamente), pero es el PIB per cápita el que presenta la contribución más importante (34,439%).

Por otro lado, los efectos de la intensidad y el factor de *mix* de combustibles han sido ambos negativos, contribuyendo a reducir las emisiones totales de CO₂ en el periodo analizado. La intensidad presenta el efecto cuantitativamente más importante (26,102%), mientras que el efecto de la mezcla de combustibles es algo menor (14,855%.)

Tabla 3.1. Descomposición multiplicativa de los cambios en las emisiones de dióxido de carbono en la UE-27, 2001-2008. Método LMDI.

R_{pop}	R_{ypc}	R_{int}	R_{mix}	R_{car}	R_{tot}
1,02864	1,34439	0,73898	0,85145	1,13262	0,98552

Teniendo en cuenta todos los efectos en conjunto, la ratio de emisiones de dióxido de carbono muestra una reducción en el período analizado, siendo los índices con valor por debajo de la unidad más relevantes que aquéllos con valores superiores a uno. La Figura 3.1 recoge un gráfico de tipo radial que resume el análisis multiplicativo.

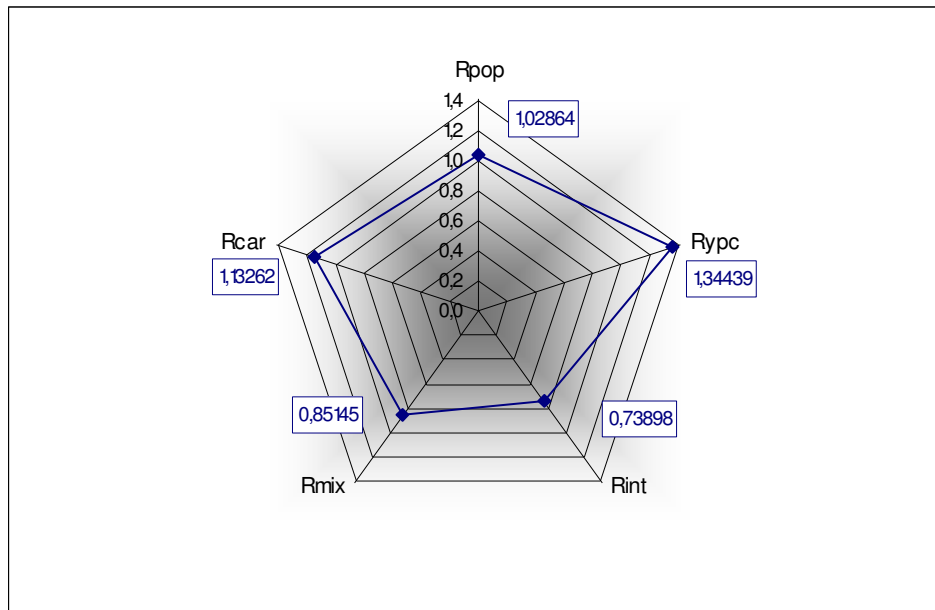


Figura 3.1. Gráfico de radar de la Tabla 3.1 para la descomposición multiplicativa de los cambios en las emisiones de CO₂.

Respecto a la evolución del PIB per cápita en la UE-27 (véase la Figura 3.2 más abajo), observamos que algunos países de Europa central y oriental (Bulgaria, República Checa, Estonia, Letonia, Lituania, Rumanía y Eslovaquia) han aumentado rápidamente su PIB por habitante desde 2001 a 2008, en proporción mucho mayor que otros países de la UE-27. Se podría argumentar que estos países están económicamente menos desarrollados, su punto de partida es más bajo, y por lo tanto es más fácil que crezcan a tasas superiores.

Por otra parte, debemos considerar que el incremento en las tasas de crecimiento de estos países del centro y este de Europa coincide con su entrada en la Unión Europea, y es bien sabido que, en general, el crecimiento económico se ve reforzado por el aumento del tamaño del mercado, así como por la inversión extranjera, atraída por los bajos costes de la mano de obra.

Ambos factores, más que las potenciales mejoras en la tecnología o en la eficiencia podrían explicar una gran parte de las variaciones del PIB en esos países, y por tanto de las emisiones de CO₂.

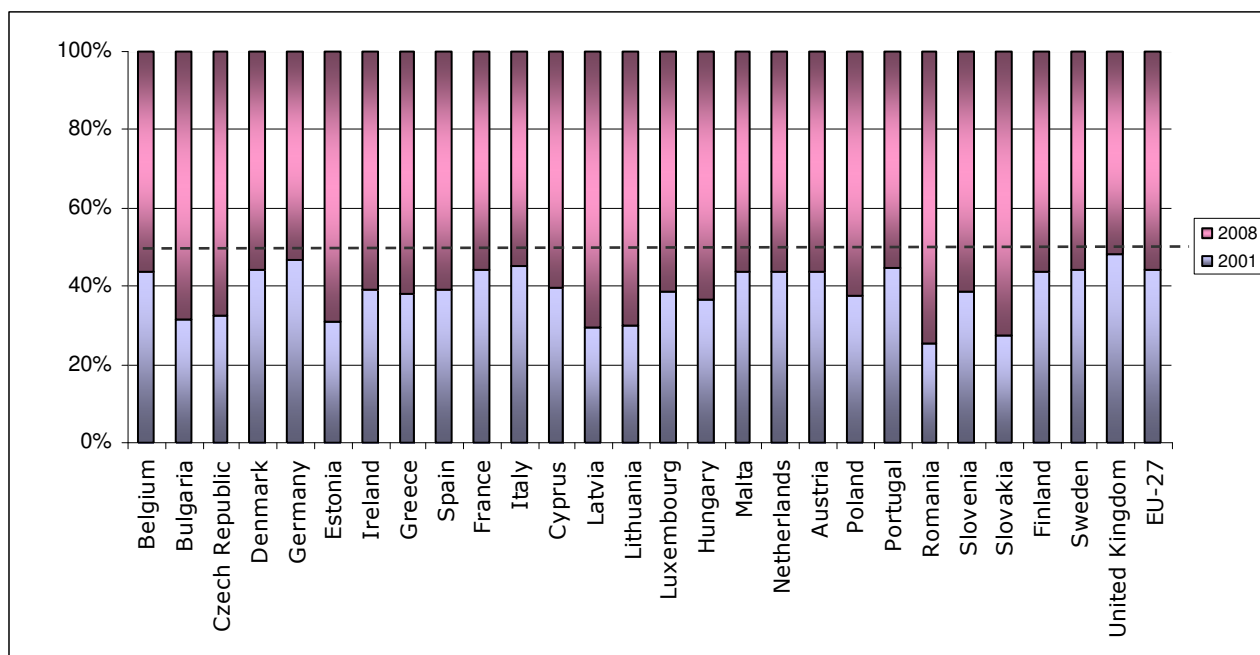


Figura 3.2. Comparación (%) de los PIB per cápita de 2001 y 2008 (la línea del 50% corresponde al caso PIB per cápita 2008 = PIB per cápita 2001).

Por otra parte, los combustibles considerados (petróleo, gas, carbón/turba y otros) han sufrido incrementos dispares en sus precios entre 2001 y 2008 (CE, 2011), siendo el más destacado el aumento del precio del crudo (más de cuatro veces su valor inicial). Este hecho podría haber desempeñado un papel importante, motivando la inversión en innovación así como una mejor aplicación de la tecnología existente y un uso de técnicas más eficientes y energías menos contaminantes. En resumen, parece razonable pensar que las diferencias en la evolución de los precios, en favor de energías menos contaminantes, pueden influir en los efectos intensidad y mezcla de

combustibles, y de este modo podrían haber contribuido indirectamente a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono en la UE-27.

Otro punto a considerar es el Protocolo de Kioto, adoptado el 11 de noviembre de 1997, pero cuya entrada en vigor no se produce hasta el 16 de febrero de 2005. Su objetivo principal es disminuir el cambio climático relacionado con la actividad humana, comprometiéndose los países signatarios a reducir, en al menos un 5% en promedio para el período 2008-2012, las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a las de 1990. La UE-15, como agente especialmente activo, se comprometió a reducir sus emisiones para ese período en un 8% respecto a las de 1990, repartiendo la carga de modo desigual según los estados miembros. El intento de adaptación de la economía europea para implantar este acuerdo internacional también podría estar correlacionado con la importancia observada de los efectos intensidad y mezcla de combustibles en la reducción de las emisiones de CO₂ en la UE-27 entre 2001 y 2008.

3.3.2. La descomposición aditiva

En primer lugar, hemos de destacar que las emisiones de CO₂ del conjunto de la UE-27 han sufrido una caída de 56,5699 millones de toneladas entre 2001 a 2008 (D_{tot} , véase Tabla 3.2). Los efectos de la población, el PIB per cápita y la carbonización han sido todos positivos, contribuyendo a aumentar las emisiones de dióxido de carbono. Como en el caso multiplicativo, la importancia relativa de cada uno de estos efectos ha sido muy diferente. Mientras que la población no parece tener un impacto muy relevante, el efecto de la carbonización ha sido muy notable (más de cuatro veces superior al

anterior), siendo el PIB per cápita el que proporciona la contribución más destacada (más de diez veces la magnitud del primero). En concreto, los tres efectos han contribuido a aumentar las emisiones de dióxido de carbono de la UE-27 en 109,5018, 482,9184 y 1.147,5809 millones de toneladas, respectivamente.

En cambio, los efectos intensidad y mezcla de combustibles han sido negativos, contribuyendo a reducir las emisiones de CO₂ en este período en 1.172,983 y 623,588 millones de toneladas, respectivamente.

Tabla 3.2. Descomposición aditiva de los cambios en las emisiones de dióxido de carbono (en millones de toneladas) en la UE-27, 2001-2008. Método LMDI.

D_{pop}	D_{ypc}	D_{int}	D_{mix}	D_{car}	D_{tot}
109,5018	1.147,5809	-1.172,9830	-623,5880	482,9184	-56,5699

Teniendo en cuenta todos los efectos en su conjunto, la suma de los efectos negativos es superior a la de los positivos (D_{tot} , véase la Figura 3.3), produciéndose una reducción en las emisiones totales de CO₂. Evidentemente, el análisis de los resultados de la descomposición aditiva nos lleva a las mismas conclusiones que las obtenidas en el caso multiplicativo.

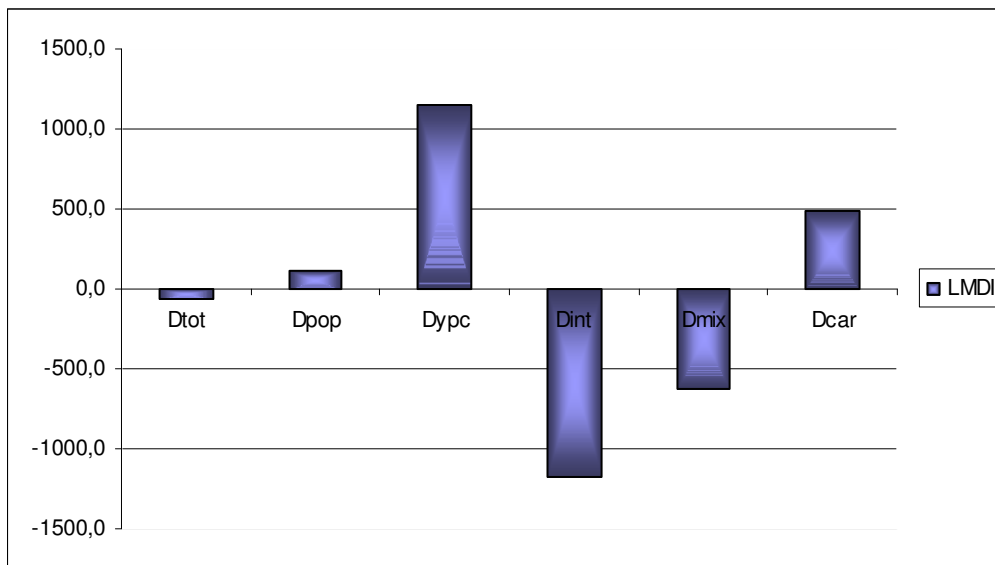


Figura 3.3. Gráfico de barras para la descomposición aditiva LMDI de la variación en las emisiones de CO₂.

Independientemente de la forma aditiva o multiplicativa de la descomposición, podemos realizar un análisis individualizado para cada uno de los países con el fin de estudiar las contribuciones de los distintos factores a los cambios en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Los resultados de la descomposición aditiva⁵ aparecen recogidos en la Tabla 3.3.

⁵ La descomposición multiplicativa llevaría a resultados equivalentes, Ang (2005).

Tabla 3.3. Descomposición aditiva por países de los cambios en las emisiones de dióxido de carbono (en millones de toneladas) mediante LMDI, 2001-2008.

	<i>D_{pop}</i>	<i>D_{ypc}</i>	<i>D_{int}</i>	<i>D_{mix}</i>	<i>D_{car}</i>	<i>D_{rsd}</i>	<i>D_{tot}</i>
Alemania	23,313	113,796	-159,791	-89,638	70,811	0,000	-41,509
Austria	1,912	17,178	-12,604	-13,371	10,256	0,000	3,372
Bélgica	3,241	29,389	-36,623	-17,752	13,588	0,000	-8,157
Bulgaria	1,321	36,268	-36,115	-5,852	8,310	0,000	3,932
Chipre	0,193	2,885	-1,931	0,406	-0,140	0,000	1,414
Dinamarca	1,420	11,639	-13,827	-11,890	9,039	0,000	-3,618
Eslovaquia	1,055	36,749	-39,251	-8,787	7,971	0,000	-2,263
Eslovenia	0,447	7,315	-5,567	-0,934	0,540	0,000	1,801
España	8,437	133,352	-107,535	-37,908	35,875	0,000	32,221
Estonia	0,459	13,014	-11,313	-2,521	3,034	0,000	2,673
Finlandia	1,638	14,501	-10,998	-21,206	13,314	0,000	-2,751
Francia	10,635	88,687	-88,893	-25,749	-0,265	0,000	-15,585
Grecia	2,579	43,563	-37,664	-9,450	4,788	0,000	3,816
Holanda	5,033	45,805	-41,774	-42,534	33,420	0,000	-0,050
Hungría	1,534	29,795	-28,662	-18,339	13,116	0,000	-2,554
Irlanda	1,226	18,792	-17,773	-7,189	5,638	0,000	0,693
Italia	12,113	86,525	-84,360	-112,332	99,516	0,000	1,462
Letonia	0,214	6,647	-5,985	-4,050	3,862	0,000	0,688
Lituania	0,370	10,962	-9,787	-9,636	10,303	0,000	2,212
Luxemburgo	0,264	4,262	-2,782	0,545	-0,274	0,000	2,016
Malta	0,084	0,779	-0,735	-7,875	7,843	0,000	0,095
Polonia	8,319	148,645	-132,521	-16,928	1,133	0,000	8,647
Portugal	1,564	12,316	-14,563	-11,170	5,363	0,000	-6,491
Reino Unido	14,813	37,569	-85,380	-105,914	112,943	0,000	-25,969
Rep. Checa	3,369	87,838	-81,394	-15,885	1,482	0,000	-4,591
Rumanía	2,564	97,621	-91,489	-24,005	13,617	0,000	-1,691
Suecia	1,384	11,688	-13,665	-3,626	-2,167	0,000	-6,385
UE-27	109,502	1.147,58	-1.172,98	-623,588	482,918	0,000	-56,570

Las emisiones de dióxido de carbono han experimentado una disminución en la mayor parte de los países de la UE-27, especialmente en grandes economías como Alemania, Reino Unido y Francia. Únicamente en países tales como

Polonia, Bulgaria, Grecia, Estonia, Italia, Chipre, Letonia, Luxemburgo, Austria, Eslovenia, Irlanda, Lituania o Malta, y especialmente una gran economía como España, se produjo un incremento en las emisiones de CO₂.

El notable descenso en el nivel de las emisiones de dióxido de carbono en países como Alemania, Francia y Reino Unido ha sido consecuencia de los elevados efectos intensidad y mezcla de combustible. En el caso de Alemania y Francia el primero ha tenido una contribución muy superior a la del segundo, mientras que en el Reino Unido el efecto mezcla de combustible ha sido el principal contribuyente a la reducción. Por otro lado, España es la única gran economía que ha experimentado un incremento importante en el nivel de emisiones de CO₂, debido al efecto renta per cápita, que ha elevado de manera notable el nivel de emisiones, contrarrestando los esfuerzos de los efectos intensidad y mezcla de combustibles.

Realizando el análisis para cada uno de los factores, observamos que el efecto población contribuyó positivamente a incrementar el nivel de emisiones de este gas de efecto invernadero en todos los países de la UE-27, siendo especialmente importante en los casos de Alemania, Francia, Italia, Reino Unido, España y Polonia. El incremento de la población en algunos de estos países, como consecuencia de la inmigración, ejerce presión sobre el nivel de emisiones de CO₂.

Por lo que respecta al efecto de la renta per cápita también es positivo en todos los países, identificándose diferencias entre algunos países en los que la inercia del crecimiento global de la UE-27 parece tener consecuencias más notables sobre su nivel de emisiones de dióxido de carbono. Es el caso de España, Alemania y Polonia, y en menor medida Rumania, Italia, Francia y la

República Checa.

El efecto intensidad muestra una contribución negativa de todos los miembros de la UE-27 a las variaciones en las emisiones de CO₂, siendo de pequeña magnitud los impactos de países como Chipre, Malta, Luxemburgo, Lituania, Letonia, Eslovenia, Estonia, Finlandia, Dinamarca, Suecia o Portugal, y de especial relevancia los de Alemania, Polonia y España.

El factor mezcla de combustibles ha contribuido notablemente a la reducción del nivel de emisiones en todos los países analizados – especialmente Italia y Reino Unido – con las únicas excepciones de Chipre y Luxemburgo. Por el contrario, el factor carbonización apunta a una contribución positiva de la mayoría de los países al incremento en las emisiones de dióxido de carbono (de especial en el caso del Reino Unido, Italia y Alemania), siendo negativo únicamente en Chipre, Luxemburgo y Suecia.

La Figura 3.4 ilustra los resultados de la descomposición aditiva por países en el período 2001-2008.

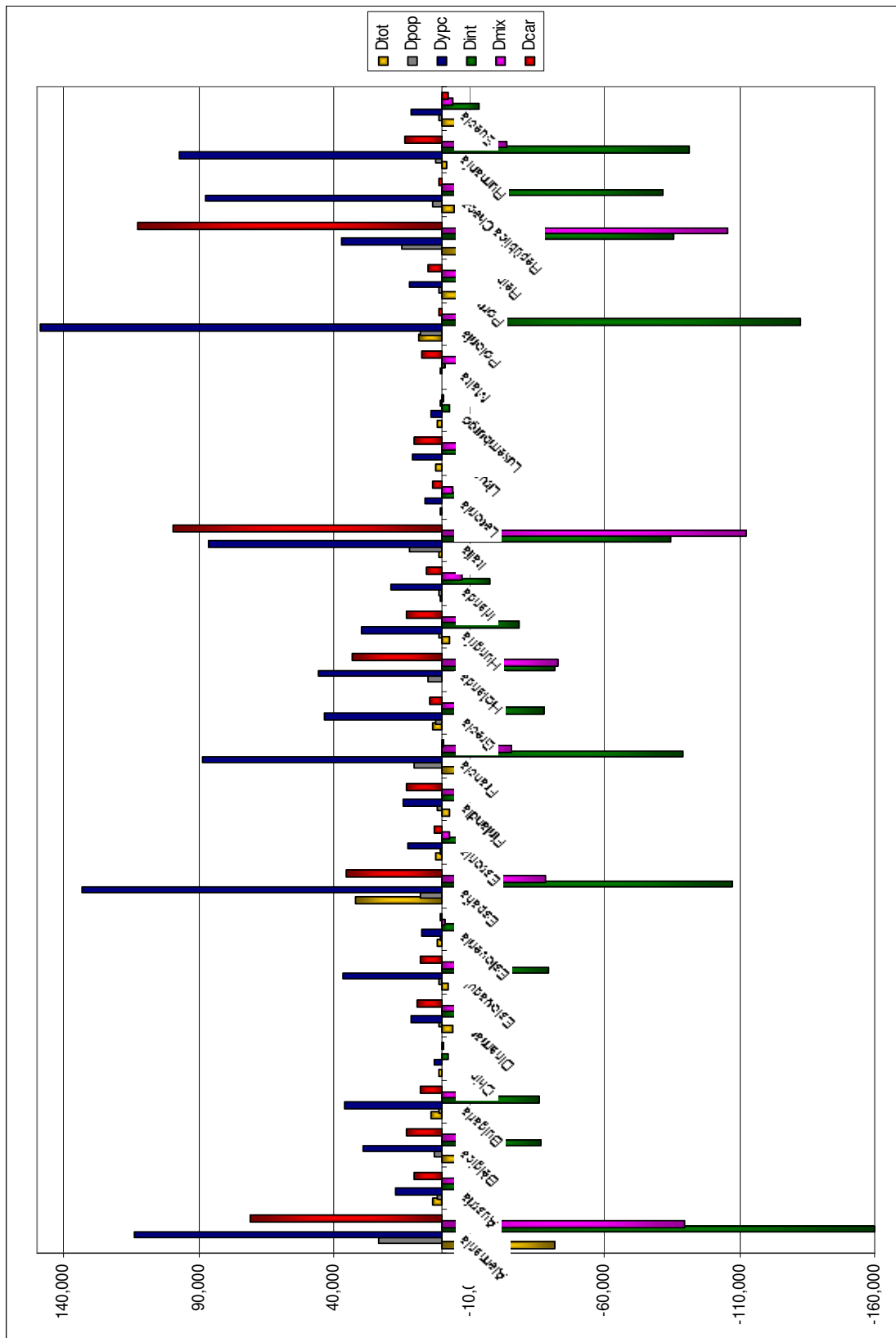


Figura 3.4. Gráfico de barras para la descomposición aditiva LMDI de la variación en las emisiones de CO₂ por países, 2001-2008.

3.4. Conclusiones

El total de las emisiones de dióxido de carbono en la UE-27 ha disminuido en un 1,448% (en términos absolutos, 56,570 millones de toneladas) entre 2001 y 2008, como consecuencia del impacto negativo de los efectos intensidad y mezcla de combustibles y del impacto positivo de los efectos de la población, el PIB per cápita y la carbonización. La relevancia de los diversos impactos es muy diferente: mientras que los efectos intensidad y PIB per cápita han tenido las contribuciones más notables, otros como la población mantienen una influencia poco relevante (apenas una décima parte de los anteriores).

La consideración de variables como las diferencias interregionales en el crecimiento económico, las diferencias en la evolución de los precios de cada combustible o las políticas energéticas y medioambientales (*e.g.*, para la prevención del cambio climático) parecen confirmar los resultados de la descomposición LMDI. Por un lado, las diferencias interregionales en el crecimiento económico influyen positivamente en el efecto PIB por habitante, ya que son precisamente los países menos desarrollados los que experimentan el mayor crecimiento relativo en el período 2001-2008. Como es bien sabido, a menudo las consideraciones medioambientales se sacrifican en aras de un crecimiento rápido. A este respecto, tendría sentido que los cambios estructurales contribuyesen a incrementar el nivel de emisiones de la UE-27 en su conjunto.

Por otra parte, la evolución diferenciada de los precios de los distintos combustibles en este mismo período podría haber provocado el impacto negativo de los efectos intensidad y mezcla de combustibles sobre el nivel global de emisiones de CO₂ al inducir a la inversión en I+D, a un mejor uso de

la tecnología y al empleo de técnicas más eficientes y energías menos contaminantes.

De acuerdo a nuestros resultados, la reducción de las emisiones de CO₂ viene motivada básicamente por el efecto intensidad y, en consecuencia, requerirá principalmente capacidad de adaptación a técnicas más eficientes, además del cambio técnico y la innovación como alternativas efectivas para reducir las emisiones globales de este tipo de gas de efecto invernadero. En principio, no cabe esperar que factores como el crecimiento económico per cápita, el crecimiento de la población o el factor carbonización –difícil éste de influenciar a través de actuaciones políticas- puedan reducir el nivel de estas emisiones.

En síntesis, los resultados de este capítulo abogan claramente por la inversión en innovación, desarrollo, difusión y acceso a las tecnologías más eficientes, el cambio tecnológico y la investigación en energías de más calidad como fuentes principales para lograr una reducción importante de las emisiones de CO₂ en el futuro.

CAPÍTULO 4.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA UE-15 EN LOS AÑOS 90. EL MÉTODO DE SUN Y EL MÉTODO BASADO EN LA TRAYECTORIA

4.1. Introducción

4.2. Exposición de la metodología

4.2.1. El método de descomposición de Sun

4.2.2. El método basado en la trayectoria

4.3. Análisis de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero de la UE-15 en los años 90

4.3.1. Contribuciones de los cambios en los factores

4.3.2. Comparación con una descomposición en series anuales

4.4. Conclusiones

CAPÍTULO 4.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA UE-15 EN LOS AÑOS 90. EL MÉTODO DE SUN Y EL MÉTODO BASADO EN LA TRAYECTORIA

4.1. Introducción

A partir de las técnicas de descomposición básicas, que incluyen las basadas en los índices de Laspeyres, Paasche y Marshall-Edgeworth, se han ido desarrollando, ampliando y proponiendo nuevos modelos¹. Ang (2004) compara diferentes métodos de descomposición, incluyendo algunas recomendaciones para su aplicación.

En este capítulo aplicamos dos técnicas de descomposición exhaustivas alternativas al método LMDI aditivo. En concreto, se trata de las soluciones planteadas por Sun (1998), y Fernández y Fernández (2008), basadas en el principio de "creados conjuntamente y distribuidos por igual" y en la modelización de la trayectoria (BT²), respectivamente. Este último método resulta una alternativa interesante cuando se dispone de información adicional sobre algunas de las variables en los períodos intermedios. Esta información se utiliza en un procedimiento de estimación de Máxima Entropía (ME), al objeto de estimar los parámetros que determinan las trayectorias temporales seguidas por los factores.

¹ Por ejemplo, Albrecht *et al.* (2002) presentan una técnica basada en la Identidad de Kaya que lleva a una descomposición perfecta y simétrica.

² El método BT aparece como PB (*Path Based*) en publicaciones en lengua inglesa.

Una vez expuesta la metodología, se aplica a un análisis empírico de los cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE-15 en el período 1990-2002, considerando como factores determinantes el PIB del conjunto de la UE-15, el peso de cada país en el PIB europeo y la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero. Llevaremos a cabo descomposiciones aditivas completas a través de los métodos de Sun, BT y LMDI, bajo tres situaciones informativas de partida, según se disponga de: (a) los valores de las magnitudes consideradas en los períodos extremos, (b) las series trienales de todas las variables (o al menos de alguna de ellas para el caso del enfoque BT), o (c) las series anuales de todas las magnitudes consideradas. Los resultados para los casos (b) y (c), más informativos, se compararán con los obtenidos en el (a), persiguiendo como objetivo comprobar cuál de los métodos aplicados, y bajo qué circunstancias, proporciona una solución “más precisa”.

4.2. Exposición de la metodología

Se considera una variable endógena V cuyo valor viene dado por el producto de n variables exógenas o factores determinantes:

$$V = x_1 x_2 \dots x_n \quad (4.1)$$

Supondremos que cada factor determinante puede cambiar sin que necesariamente varíen los valores de los otros factores, y que los incrementos de V presentan dependencia temporal.

Centrándonos en una descomposición aditiva, se define la variación de V entre los instantes 0 y 1:

$$\Delta V = V^1 - V^0 = x_1^1 x_2^1 \dots x_n^1 - x_1^0 x_2^0 \dots x_n^0 \quad (4.2)$$

donde x_i^t es el valor de x_i en el instante t ; $i=1,\dots,n$; $t=0,1$.

Considerando el caso particular en el que hay sólo dos factores, x e y , tenemos:

$$\Delta V = V^1 - V^0 = x^1 y^1 - x^0 y^0 \quad (4.3)$$

Se pueden obtener dos formas de descomposición para ΔV en (4.3), a saber:

$$\Delta V = \Delta x y^0 + x^0 \Delta y + \Delta x \Delta y \quad (4.4)$$

y

$$\Delta V = \Delta x y^1 + x^1 \Delta y - \Delta x \Delta y \quad (4.5)$$

La ecuación (4.4) utiliza una estructura de ponderaciones de Laspeyres, mientras que (4.5) corresponde a una descomposición de Paasche. Ambas expresiones son "aproximadas" o "no exhaustivas", ya que la suma de los efectos de los factores no es necesariamente igual al cambio en la variable endógena V . En principio, las descomposiciones exactas son preferibles a las no exhaustivas, salvo en aquellos casos en los que habiendo pocos factores la interpretación de los términos residuales podría resultar clara e interesante. Como hemos visto, el método LMDI es una técnica de descomposición exacta. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, existen numerosas fórmulas aproximadamente equivalentes cuya aplicación conduce generalmente a resultados que difieren en mayor o menor medida. Dada esta no unicidad en los resultados, en este capítulo expondremos otros métodos alternativos al LMDI. Otro enfoque que conduce a una descomposición exhaustiva es el que se basa en la especificación previa de la trayectoria temporal que siguen los factores. Del mismo se derivan el método de descomposición de Sun (1998) y el basado en la trayectoria (Fernández y Fernández, 2008).

4.2.1. El método de descomposición de Sun

Como hemos visto más arriba, la especificación de una cierta trayectoria temporal para los factores determinantes implica una forma específica de reparto del término de interacción en la descomposición.

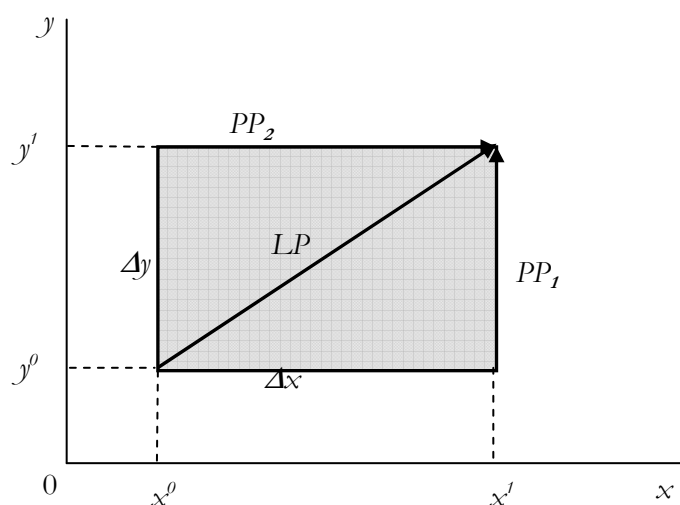


Figura 4.1. Líneas de trayectoria polar y directa.

Como hemos señalado más arriba, el método³ de Sun (1998) aplica como solución el principio de "creados conjuntamente e igualmente distribuidos". Este principio sugiere que la parte de la variación total que es consecuencia de la interacción conjunta de dos o más efectos se distribuya entre los mismos a partes iguales. Así, en el caso de dos factores, se considera la media de las dos trayectorias extremas (PP_1 y PP_2), dividiendo con ello en dos partes iguales el rectángulo de interacción (véase la Figura 4.1). La aplicación de este principio conduce a una descomposición completa, sin término residual, en la que la interacción de todos los factores contemplados da lugar al efecto total.

En el caso general (4.1) donde V es el producto de n factores determinantes, el

³ En el campo Input-Output, Dietzenbacher y Los (1998) han propuesto una solución similar para el análisis de descomposición estructural.

efecto de los cambios en cada factor x_i vendrá dado por la expresión siguiente (Sun, 1998):

$$\begin{aligned}
 D_i = \Delta x_i \text{ Efecto} &= \int_0^1 \prod_{j \neq i}^n x_j \frac{dx_i}{dt} dt = \left[\prod_{j < i}^{i-1} x_j^0 \right] \Delta x_i \left[\prod_{j > i}^n x_j^0 \right] \\
 &+ \sum_{j \neq i}^n \left[\frac{1}{2} \prod_{k < i}^{i-1} x_k^0 \Delta x_i \prod_{i < k < j}^{j-1} x_k^0 \Delta x_j \prod_{k > j}^n x_k^0 \right] \\
 &+ \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq j, i}^n \left[\frac{1}{3} \prod_{k < i}^{i-1} x_k^0 \Delta x_i \prod_{i < k < j}^{j-1} x_k^0 \Delta x_j \prod_{j < k < l}^{l-1} x_k^0 \Delta x_l \prod_{k > l}^n x_k^0 \right] \\
 &\dots \\
 &+ \frac{1}{n} \left[\prod_{j=1}^n \Delta x_j \right]
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

En este enfoque se cumple que $\sum_{i=1}^n \Delta x_i \text{ Efecto} = \Delta V$, por lo que se trata de un método exacto, que elimina el término residual repartiéndolo entre todos los factores determinantes x_i .

Nuestro punto de partida en este capítulo es la ecuación que expresa la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero en el país j (C_j) como el producto de tres factores: el PIB del conjunto de la UE-15 (Y), el peso del PIB del país j en el PIB del conjunto de la UE-15 (S_j) y, finalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero del país j por unidad del PIB nacional (I_j). La relación admite la expresión siguiente:

$$C_j = Y S_j I_j \tag{4.7}$$

donde $S_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^{15} Y_j} = \frac{Y_j}{Y}$ e $I_j = \frac{C_j}{Y_j}$, siendo Y_j el PIB del país j . Nuestro objetivo

es descomponer aditivamente la variación de las emisiones de cada país entre 1990 y 2002, $D_{tot} = \Delta C_j = C_j^{2002} - C_j^{1990}$, en los tres componentes siguientes:

$$D_{tot} = D_{act} + D_{str} + D_{int} \quad (4.8)$$

Según la ecuación (4.6), las contribuciones de los cambios de Y , S_j e I_j a la variación de C_j se pueden expresar como:

$$D_{act} = I_j^{1990} S_j^{1990} \Delta Y + \frac{1}{2} \Delta I_j S_j^{1990} \Delta Y + \frac{1}{2} I_j^{1990} \Delta S_j \Delta Y + \frac{1}{3} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.9)$$

$$D_{str} = I_j^{1990} \Delta S_j Y^{1990} + \frac{1}{2} \Delta I_j \Delta S_j Y^{1990} + \frac{1}{2} I_j^{1990} \Delta S_j \Delta Y + \frac{1}{3} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.10)$$

$$D_{int} = \Delta I_j S_j^{1990} Y^{1990} + \frac{1}{2} \Delta I_j \Delta S_j Y^{1990} + \frac{1}{2} \Delta I_j S_j^{1990} \Delta Y + \frac{1}{3} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.11)$$

donde $\Delta Y = Y^{2002} - Y^{1990}$, $\Delta I_j = I_j^{2002} - I_j^{1990}$ y $\Delta S_j = S_j^{2002} - S_j^{1990}$.

4.2.2. El método basado en la trayectoria

En conexión con el trabajo de Harrison *et al.* (2000), que desarrolla ideas de Vogt (1978), Fernández (2004) propone un método exhaustivo que desarrolla en el ámbito del SDA y que denomina *método de descomposición basado en la trayectoria* (BT). Posteriormente, en Fernández y Fernández (2008) introducimos este método en el ámbito del IDA. Su principal ventaja reside en

que, no sólo resulta más flexible, sino que permite utilizar la información adicional (aun cuando ésta sea parcial y sólo esté disponible para uno de los factores), permitiendo reducir el grado de arbitrariedad del análisis.

El enfoque BT parte del supuesto de que los factores determinantes (x_i) cambian continuamente en el tiempo (t), que varía entre 0 y 1. Por lo tanto, se puede escribir:

$$V(t) = x_1(t)x_2(t)\dots x_n(t) \quad (4.12)$$

Asumiendo la diferenciabilidad de cada factor $x_i(t)$, un cambio infinitesimal en V se puede expresar como:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} dt + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt} dt \quad (4.13)$$

Finalmente, el cambio total en V puede expresarse como la "suma" de todos los cambios infinitesimales entre 0 y 1:

$$\Delta V = \int_0^1 \frac{dV}{dt} dt = \int_0^1 \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} dt \quad (4.14)$$

Los efectos de los factores determinantes se pueden escribir como:

$$\Delta x_i \text{Efecto} = \int_0^1 \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} dt = \int_0^1 \prod_{j \neq i} x_j \frac{dx_i}{dt} dt, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) muestra que las derivadas respecto a t de los factores determinantes juegan un papel central en la determinación de la magnitud de los efectos atribuidos a los cambios en dichos factores. En consecuencia, la especificación de la trayectoria temporal que sigue cada factor entre los períodos inicial y final, $x_i(t) = f_i(t)$, puede tener un gran impacto sobre la medición de los efectos, que en conjunto constituyen la variación de V .

Harrison *et al.* (2000) proponen asumir trayectorias rectilíneas para las variables, o sea,

$$x_i(t) = x_i^0 + (x_i^1 - x_i^0)t = x_i^0 + \Delta x_i t, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.16)$$

Se puede demostrar que este enfoque proporciona la misma solución que el método de Sun (1998). Sin embargo, los valores de los factores en puntos intermedios de las trayectorias podrían diferir de los que vienen dados por la línea recta. Al relajar el supuesto de linealidad de las funciones $f_i(t)$ y admitir formas funcionales más flexibles, el método BT permite utilizar de modo explícito la información disponible, facilitando la distribución de los efectos de interacción entre los factores determinantes. En particular, considera una clase específica de funciones:

$$x_i(t) = x_i^0 + \Delta x_i t^{\theta_i}; \quad 0 \leq t \leq 1, \theta_i > 0 \quad (4.17)$$

Esta familia de trayectorias está formada por funciones monótonas desde x^0 a x^1 que no presentan puntos de inflexión (Figura 4.2). Aunque esto impone algunas restricciones, se trata en todo caso de un enfoque considerablemente más flexible que el modelo lineal. La trayectoria temporal de x_i es una línea recta si $\theta_i = 1$. Si esto se cumple para todo x_i ($i = 1, \dots, n$), la solución obtenida por la metodología BT coincidirá con la de Sun (1998).

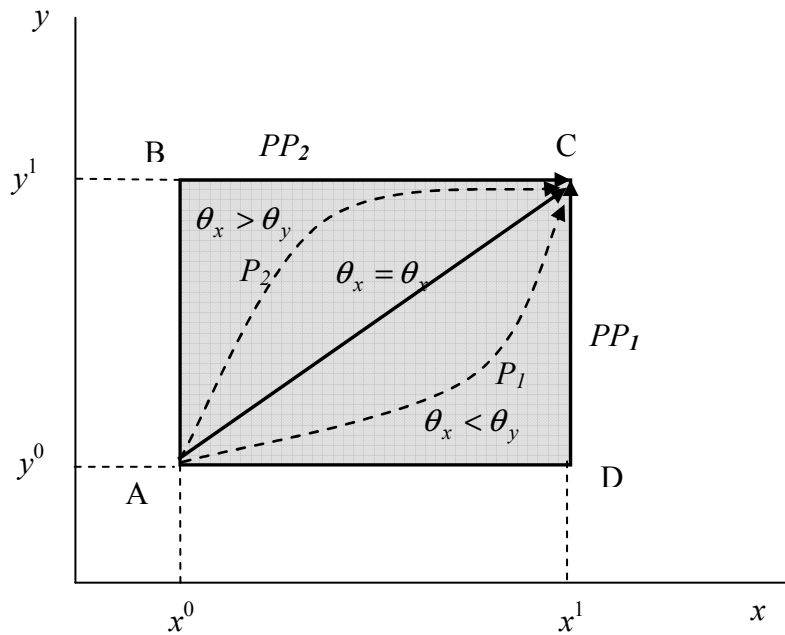


Figura 4.2. Trayectorias temporales monótonas generalizadas.

La idea básica del enfoque BT es que los parámetros θ_i determinan las trayectorias y las participaciones de los distintos factores determinantes en el efecto interacción. Las trayectorias PP_1 (si $\theta_x/\theta_y \rightarrow 0$), PP_2 (si $\theta_x/\theta_y \rightarrow \infty$) y la trayectoria en línea recta (*i.e.*, $\theta_x/\theta_y = 1$) se incluyen como casos particulares de esta familia de funciones. P_1 y P_2 son situaciones intermedias entre PP_1 y PP_2 .

Sustituyendo las trayectorias temporales de la ecuación (4.17) en (4.15) se obtiene la ecuación (4.18), que recoge la expresión de las contribuciones para un conjunto arbitrario de trayectorias temporales, en el que el cambio en V se descompone en los efectos de n factores determinantes.:

$$\Delta x_i \text{ Efecto} = \int_0^1 \prod_{j \neq i}^n x_j \frac{dx_i}{dt} dt = \left[\prod_{j < i}^{i-1} x_j^0 \right] \Delta x_i \left[\prod_{j > i}^n x_j^0 \right] \quad (4.18)$$

$$+ \sum_{j \neq i}^n \left[\frac{\theta_i}{\theta_i + \theta_j} \prod_{k < i}^{i-1} x_k^0 \Delta x_i \prod_{i < k < j}^{j-1} x_k^0 \Delta x_j \prod_{k > j}^n x_k^0 \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq j, i}^n \left[\frac{\theta_i}{\theta_i + \theta_j + \theta_l} \prod_{k < i}^{i-1} x_k^0 \Delta x_i \prod_{i < k < j}^{j-1} x_k^0 \Delta x_j \prod_{j < k < l}^{l-1} x_k^0 \Delta x_l \prod_{k > l}^n x_k^0 \right] \\
 & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 & + \frac{\theta_i}{\sum_{j=1}^n \theta_j} \left[\prod_{j=1}^n \Delta x_j \right]
 \end{aligned}$$

El efecto de los parámetros θ_i sobre las contribuciones de los factores determinantes es claro. Cuanto mayor sea el valor de θ_i en comparación con los restantes θ_j , mayor será la participación atribuida a x_i en los efectos interacción, y por lo tanto, su contribución al cambio en la variable V será más elevada.

Ciertamente, si no se dispone de información relativa a la evolución temporal de los factores determinantes, una hipótesis plausible sería que los parámetros de las trayectorias temporales sean todos iguales ($\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n$). Sin embargo, si la información acerca de la evolución de todos los factores determinantes se encuentra disponible para los períodos intermedios, un uso eficiente de la misma llevaría a una descomposición dinámica de series temporales. Por desgracia, en la mayor parte de las ocasiones sólo se dispone de información parcial acerca de algunos de los factores determinantes en los períodos intermedios. Para tales situaciones, en Fernández y Fernández (2008) se propone una metodología que explota dicha información parcial, conduciendo en general a resultados más precisos que cuando no se incorpora.

Los parámetros de la trayectoria temporal (θ_i) se estiman mediante Máxima Entropía Generalizada (MEG)⁴. El objetivo es estimar los parámetros de un modelo⁵ lineal en el que la variable (y) depende de H variables explicativas:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{e} \quad (4.19)$$

donde \mathbf{y} es un vector ($T \times 1$) de observaciones, \mathbf{X} es una matriz ($T \times H$) de variables explicativas para cada observación, $\boldsymbol{\theta}$ es el vector ($H \times 1$) de parámetros a estimar, y \mathbf{e} es un vector ($T \times 1$) de perturbaciones aleatorias. El modelo (4.19) se puede estimar utilizando el estimador propuesto⁶ por Golan *et al.* (1996).

En nuestro caso particular, y siguiendo el método BT, se especifican las siguientes trayectorias temporales para los factores:

$$I_j(t) = I_j^{1990} + \Delta I_j t^{\theta_{I_j}} \quad (4.20)$$

$$S_j(t) = S_j^{1990} + \Delta S_j t^{\theta_{S_j}}, \quad j = 1, \dots, 15 \quad (4.21)$$

$$Y(t) = Y^{1990} + \Delta Y t^{\theta_Y} \quad (4.22)$$

A continuación se estiman los θ_i y, particularizando la expresión (4.18), las contribuciones respectivas de los cambios de Y , S_j e I_j a las variaciones de C_j se pueden expresar del modo siguiente:

$$D_{act} = I_j^{1990} S_j^{1990} \Delta Y + \frac{\theta_Y}{\theta_{I_j} + \theta_Y} \Delta I_j S_j^{1990} \Delta Y + \frac{\theta_Y}{\theta_{S_j} + \theta_Y} I_j^{1990} \Delta S_j \Delta Y + \frac{\theta_Y}{\theta_{I_j} + \theta_{S_j} + \theta_Y} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.23)$$

⁴ Para un análisis detallado de las propiedades de los estimadores obtenidos por medio de estas técnicas, véanse Kapur y Kesavan (1993) y Golan *et al.* (1996).

⁵ Una descripción detallada de este modelo y su estimación aparece recogida en Fernández y Fernández (2008).

⁶ Varios trabajos aplicados han utilizado este estimador. Véase, por ejemplo, Paris y Howitt (1998), Fraser (2000), Golan *et al.* (2001) y Gardebroek y Lansink (2004).

$$D_{str} = I_j^{1990} \Delta S_j Y^{1990} + \frac{\theta_{S_j}}{\theta_{I_j} + \theta_{S_j}} \Delta I_j \Delta S_j Y^{1990} + \frac{\theta_{S_j}}{\theta_{S_j} + \theta_Y} I_j^{1990} \Delta S_j \Delta Y$$

$$+ \frac{\theta_{S_j}}{\theta_{I_j} + \theta_{S_j} + \theta_Y} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.24)$$

$$D_{int} = \Delta I_j S_j^{1990} Y^{1990} + \frac{\theta_{I_j}}{\theta_{I_j} + \theta_{S_j}} \Delta I_j \Delta S_j Y^{1990} + \frac{\theta_{I_j}}{\theta_{I_j} + \theta_Y} \Delta I_j S_j^{1990} \Delta Y$$

$$+ \frac{\theta_{I_j}}{\theta_{I_j} + \theta_{S_j} + \theta_Y} \Delta I_j \Delta S_j \Delta Y \quad (4.25)$$

Obsérvese que, como hemos señalado más arriba, si los componentes del vector de parámetros θ fueran iguales para todos los factores ($\theta_{I_j} = \theta_{S_j} = \theta_Y, \forall j$) llegaríamos a la solución de Sun (1998).

4.3. Análisis de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero de la UE-15 en los años 90

En este epígrafe estudiaremos las contribuciones de los tres factores citados (el PIB del conjunto de la UE-15, el peso de cada país en el PIB europeo y la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero) a los cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE-15⁷ entre 1990 y 2002. Los datos se obtuvieron de la base de datos Cronos de Eurostat y coinciden con los utilizados por Fernández y Fernández (2008), lo cual facilita la comparación de resultados.

⁷ Los países incluidos en el estudio son: Bélgica (B), Dinamarca (DK), Alemania (D), Grecia (EL), España (E), Francia (F), Irlanda (IRL), Italia (I), Luxemburgo (L), Países Bajos (NL), Austria (A), Portugal (P), Finlandia (FIN), Suecia (S) y Reino Unido (UK).

4.3.1. Contribuciones de los cambios en los factores

En primer lugar, procedemos a la descomposición aditiva de la variación en las emisiones, siguiendo tres enfoques diferentes –Sun, BT y LMDI– y planteando tres posibles situaciones informativas (descomposición como suma de etapas anuales, como suma de etapas trienales y descomposición única). Optamos por la suma de etapas trienales para mantener la misma estructura temporal de Fernández y Fernández (2008), lo cual facilita la comparación con el método LMDI además de permitirnos estudiar una situación intermedia entre la descomposición única y la suma de etapas anuales.

Por otra parte, para la aplicación del enfoque BT consideramos información adicional de tipo parcial: el PIB nacional para cada país de la UE-15 en los años 1993, 1996 y 1999. Por tanto, en los años intermedios se dispone únicamente de información sobre dos de los factores, S_j e Y , careciéndose de información sobre el factor I_j . Los parámetros θ_{S_j} y θ_Y se estiman utilizando el método de la Máxima Entropía Generalizada, asignando a la estimación de θ_{I_j} el valor 1 para cada país (véanse los resultados detallados y su justificación en Fernández y Fernández, 2008).

Tabla 4.1. Información adicional^a y estimación de los parámetros^b, enfoque BT^b.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
País	Y_j (1993)	Y_j (1996)	Y_j (1999)	$\hat{\theta}_{I_j}$	$\hat{\theta}_{S_j}$	$\hat{\theta}_Y$
B	184.466,3	212.421,5	235.683,0	1,00	10 ²⁰	1,27
DK	118.541,2	144.155,2	162.430,1	1,00	0,684	1,27

^a Damos las gracias al Doctor Esteban Fernández Vázquez, que ha realizado las estimaciones MEG incluidas en este capítulo y nos ha permitido amablemente su uso.

D	1.711.383,9	1.921.660,5	2.012.000,0	1,00	10 ²⁰	1,27
EL	79.771,3	97.972,9	117.849,5	1,00	0,907	1,27
E	425.936,0	480.535,4	565.419,0	1,00	10 ²⁰	1,27
F	1.089.369,4	1.224.606,3	1.355.102,0	1,00	3,618	1,27
IRL	42.569,9	57.468,8	89.457,0	1,00	2,186	1,27
I	849036,8	971.065,0	1.107.994,2	1,00	0,373	1,27
L	11.804,7	14.297,3	18.739,1	1,00	0,819	1,27
NL	276.821,7	324.479,1	374.070,0	1,00	0,681	1,27
A	161.880,6	186.282,8	200.025,3	1,00	0,298	1,27
P	73.635,4	88.309,8	108.029,9	1,00	0,678	1,27
FIN	73.770,7	100.623,6	119.985,0	1,00	0,298	1,27
S	169.274,6	213.177,1	235.767,8	1,00	0,414	1,27
UK	822.693,5	937.100,4	1.371.052,3	1,00	4,384	1,27

^a Los valores de las columnas (1) a (3) vienen expresados en millones de euros.

^b Resultados extraídos de Fernández y Fernández (2008).

Las Tablas 4.2 a 4.4 recogen las descomposiciones aditivas de los cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero bajo diversos grados de información: período único (enfoques de Sun y LMDI), series triales con información parcial (enfoque BT) y con información completa (enfoques de Sun y LMDI), y series anuales (enfoques de Sun y LMDI). Obsérvese que la descomposición es exhaustiva en todos los métodos aplicados, ya que la suma de los efectos coincide con la variación total en las emisiones de gases. Sin embargo, no hay unicidad en los resultados, ya que se obtienen valores ligeramente distintos en función del enfoque y del escenario informativo planteado.

Tabla 4.2. Descomposición^a aditiva de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero en la UE-15 entre 1990 y 2002. Enfoque BT^b.

Efecto/ Descomp.	Actividad	Estructural	Intensidad	Total
Trienal (parc.)	2.233.440,00	74.227,90	-2.415.123,40	-107.455,44

^a Los valores de los efectos vienen expresados en miles de toneladas equivalentes de CO₂.

^b Los efectos del enfoque BT se obtienen al incluir las estimaciones de los parámetros de la Tabla 4.1 en la descomposición (ecuaciones 4.23-4.25).

Tabla 4.3. Descomposición^a aditiva de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero en la UE-15 entre 1990 y 2002. Enfoque de Sun.

Efecto/ Descomp.	Actividad	Estructural	Intensidad	Total
Única	2.329.969,18	85.242,62	-2.522.667,24	-107.455,44
Trienal	2.193.012,68	98.584,99	-2.399.053,11	-107.455,44
Anual	2.188.296,01	95.476,80	-2.391.228,25	-107.455,44

^a Los valores vienen expresados en miles de toneladas equivalentes de CO₂.

Tabla 4.4. Descomposición^a aditiva de la variación en la emisión de gases de efecto invernadero en la UE-15 entre 1990 y 2002. Enfoque LMDI.

Efecto/ Descomp.	Actividad	Estructural	Intensidad	Total
Única	2.199.753,98	68.157,81	-2.375.367,23	-107.455,44
Trienal	2.182.121,14	93.207,82	-2.382.784,40	-107.455,44
Anual	2.186.471,68	94.207,14	-2.388.134,26	-107.455,44

^a Los valores vienen expresados en miles de toneladas equivalentes de CO₂.

En primer lugar, se observa una importante reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE-15 entre 1990 y 2002 (107.455,44 miles de toneladas equivalentes de CO₂). Independientemente del enfoque aplicado,

esta reducción se debe a la notable influencia negativa que el efecto intensidad tiene sobre dichas emisiones. Por ejemplo, y según la descomposición anual a través de LMDI, la adopción de tecnologías menos contaminantes habría conllevado, *ceteris paribus*, una reducción de 2.388.134,26 miles de toneladas equivalentes de CO₂ en las emisiones de gases de efecto invernadero en el conjunto de la UE-15. Completando el análisis, podemos estudiar el comportamiento de este efecto en cada país. A modo de ilustración, recogemos en la Tabla 4.5 los resultados de la descomposición, obtenidos a través del método LMDI como suma de series anuales.

Tabla 4.5. Resultados^{a,b} de la descomposición aditiva (en series anuales) por países, período 1990-2002. Enfoque LMDI.

País	<i>D_{act}</i>	<i>D_{str}</i>	<i>D_{int}</i>	<i>D_{tot}</i>
B	79.715,29	-1.760,08	-73.697,85	4.257,36
DK	40.127,97	1.616,56	-42.004,48	-259,95
D	578.559,48	-49.485,66	-761.680,17	-232.606,35
EL	61.827,04	27.091,29	-58.321,13	30.597,20
E	174.690,72	16.431,63	-75.945,58	115.176,77
F	299.778,87	-35.187,10	-275.436,60	-10.844,83
IRL	32.187,52	44.550,76	-61.283,15	15.455,13
I	276.710,00	-77.015,58	-154.839,55	44.854,87
L	5.611,91	4.843,30	-12.375,59	-1.920,38
NL	115.806,33	26.571,87	-139.997,10	2.381,09
A	42.476,67	-489,66	-35.113,91	6.873,09
P	36.370,00	19.547,06	-32.209,21	23.707,85
FIN	40.933,40	-18.801,11	-16.939,40	5.192,89
S	38.107,82	-15.576,43	-25.070,27	-2.538,88
UK	363.568,66	151.870,30	-623.220,26	-107.781,30
UE-15	2.186.471,68	94.207,14	-2.388.134,26	-107.455,44

^a Los valores vienen expresados en miles de toneladas equivalentes de CO₂.

^b Debido al redondeo, la suma de los factores presenta ligeras diferencias respecto al efecto total.

Se observa que la influencia reductora del efecto intensidad viene propiciada principalmente por las grandes economías como Alemania, Reino Unido o

incluso Francia, constituyendo la suma de las participaciones germana y británica casi la mitad del total. Italia, España y Holanda también tienen una participación significativa.

En segundo lugar, el efecto de la actividad resulta positivo y de elevada magnitud, contribuyendo a incrementar de manera importante las emisiones y amortiguando el impulso reductor del efecto intensidad. Estos resultados sugieren que el crecimiento del PIB del conjunto de la UE-15 mantiene una inercia que conduce a incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero. Si observamos la Tabla 4.5, esto sucedió así en todos los países miembros.

Por último, el efecto estructural del conjunto de la UE-15 resulta modestamente positivo, incrementando el nivel de emisiones contaminantes en menor medida que el efecto actividad. De hecho, en la Tabla 4.5, se observa que en países como Finlandia, Suecia, Bélgica, Austria y, especialmente, Italia, Alemania y Francia, el efecto estructural ha sido incluso negativo. En otros como Dinamarca, Luxemburgo, España, Portugal, Holanda, Grecia, Irlanda y Reino Unido ha resultado positivo. En estos dos últimos países, las presiones alcistas sobre las emisiones de gases de efecto invernadero fueron de tal magnitud que habrían sido capaces, por sí solas, de contrarrestar los influjos reductores que han experimentado otros países de la UE-27.

4.3.2. Comparación con una descomposición en series anuales

Como hemos comentado más arriba, un enfoque dinámico en el que se consideren periodos intermedios reduciría la gravedad del problema de la no unicidad (véase Fernández y Fernández, 2008). Las desventajas potenciales de

la descomposición dinámica son básicamente la necesidad de una gran cantidad de información y su coste computacional.

En nuestro estudio, se dispone de datos anuales desde 1990 a 2002, facilitados por Eurostat. Compararemos los distintos enfoques (Sun, BT y LMDI) bajo las diferentes situaciones de información de partida descritas anteriormente: (a) descomposición única (en el sentido de que sólo se dispone de información sobre los períodos extremos, situación de "menor información"), (b) descomposición a partir de las etapas intermedias (con información trienal⁹, situación de "información intermedia") y (c) descomposición en series anuales (información para todos los períodos intermedios, situación de "mayor información"). Consideraremos como metodología exhaustiva "más precisa" aquélla que obtenga resultados más próximos a los derivados de las situaciones con "mayor información" (*i.e.*, al enfoque de Sun o al LMDI en series anuales).

Las Figuras 4.3 a 4.5 recogen, respectivamente, los efectos actividad, estructural e intensidad estimados a través de los distintos enfoques.

⁹ En el enfoque BT es suficiente con disponer de información trienal de algunos factores (información adicional parcial).

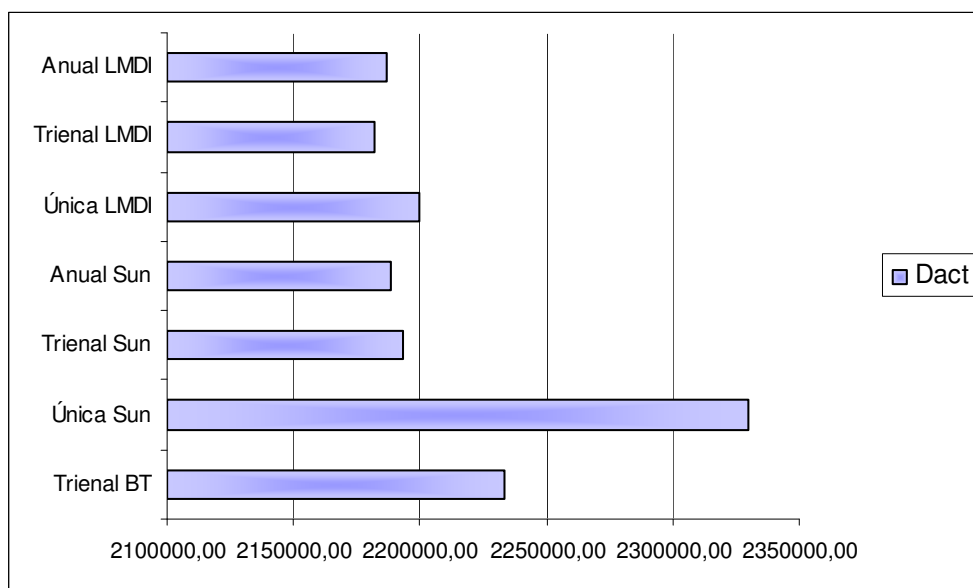


Figura 4.3. Efecto actividad (estimado bajo diferentes situaciones informativas a partir de los diversos enfoques) entre 1990 y 2002 para el conjunto de la UE-15.

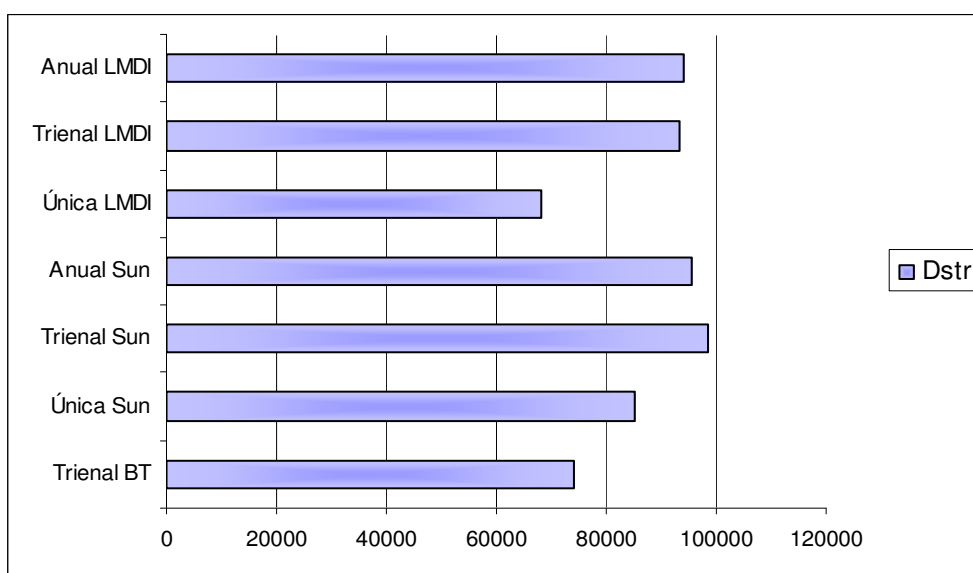


Figura 4.4. Efecto estructural (estimado bajo diferentes situaciones informativas a partir de los diversos enfoques) entre 1990 y 2002 para el conjunto de la UE-15.

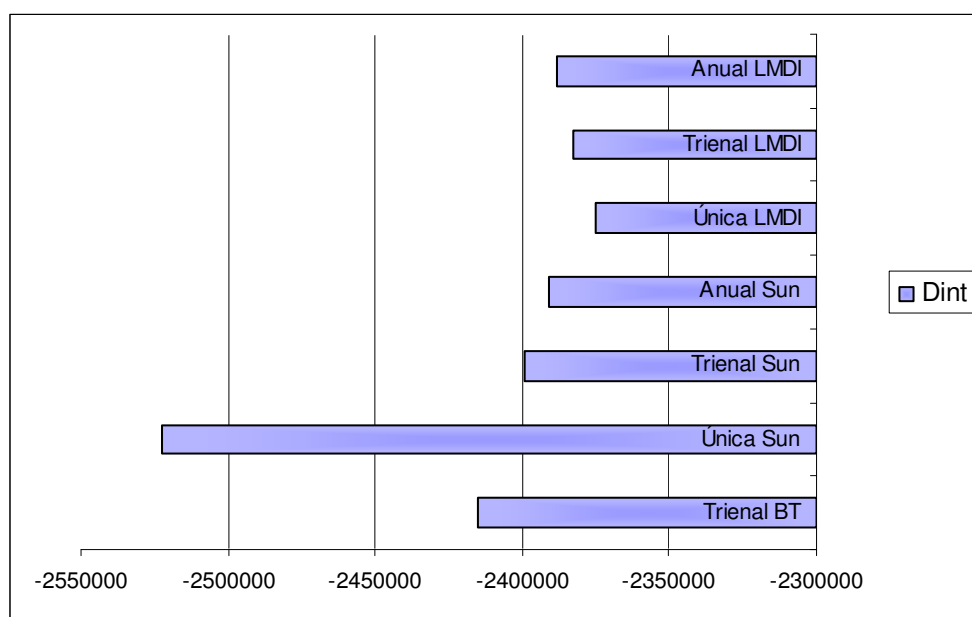


Figura 4.5. Efecto intensidad (estimado bajo diferentes situaciones informativas a partir de los diversos enfoques) entre 1990 y 2002 para el conjunto de la UE-15.

Como se esperaba a priori, las Figuras 4.3-4.5 muestran que las técnicas que parecen ofrecer resultados más extremos son las de descomposición única (enfoque de Sun para los efectos actividad e intensidad, LMDI para el efecto estructural).

En las Tablas 4.6 y 4.7 se comparan los resultados de la aplicación de las distintas metodologías cuando la descomposición es única y a partir de etapas intermedias (información trienal), con respecto a la descomposición en series anuales. Las ratios ρ_i realizan esta comparación en porcentaje, calculándose

$$\text{como } \rho_i = \frac{D_i^{\text{Método}}}{D_i^{\text{Sun anual}}} \times 100 \text{ o } \rho_i = \frac{D_i^{\text{Método}}}{D_i^{\text{LMDI anual}}} 100, \quad i = \text{act}, \text{str}, \text{int}.$$

Tabla 4.6. Comparación entre los resultados de diversas metodologías y el método de Sun en series anuales.

Anual Sun	ρ_{act}	ρ_{str}	ρ_{int}
Trienal (parc.) BT	102,06%	77,74%	100,99%
Única Sun	106,47%	89,28%	105,49%
Trienal Sun	100,21%	103,25%	100,32%
Única LMDI	100,52%	71,38%	99,33%
Trienal LMDI	99,71%	97,62%	99,64%
Anual LMDI	99,91%	98,67%	99,87%

Tabla 4.7. Comparación entre los resultados de diversas metodologías y el método LMDI en series anuales.

Anual LMDI	ρ_{act}	ρ_{str}	ρ_{int}
Trienal (parc.) BT	102,14%	78,79%	101,13%
Única Sun	106,56%	90,48%	105,63%
Trienal Sun	100,29%	104,64%	100,45%
Anual Sun	100,08%	101,34%	100,13%
Única LMDI	100,60%	72,34%	99,46%
Trienal LMDI	99,80%	98,93%	99,77%

Un factor de ρ_i próximo a 100 implicaría resultados casi-coincidentes aplicando los métodos comparados, esto es, la disponibilidad de información anual no conduciría a resultados notablemente diferentes a los que se obtendrían bajo una situación de "menor información" (descomposición única) o de "información intermedia" (información trienal).

En términos generales, los resultados obtenidos a través de los tres enfoques son muy similares para D_{act} y D_{int} . Sólo encontramos cierta diferencia en D_{str} , cuando se considera una descomposición única en lugar de en suma de etapas intermedias. En este caso, los datos correspondientes a los valores extremos no parecen captar adecuadamente los cambios estructurales ocurridos a lo

largo del período. En cambio, la información adicional (datos trienales y anuales) sí recogería los movimientos experimentados en este factor.

Las Tablas 4.8 y 4.9 muestran las sumas de los errores cuadráticos (*SEC*) obtenidas al comparar los efectos estimados mediante los diferentes métodos en las distintas situaciones informativas, con respecto a los obtenidos en una descomposición en series anuales (situación de "mayor información") a través de los métodos de Sun y LMDI, respectivamente.

Tabla 4.8. Suma de errores cuadráticos de los efectos bajo distintos enfoques con respecto a una descomposición anual (mediante el método de Sun) de las variaciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Período 1990-2002.

Anual Sun	<i>SEC_{act}</i>	<i>SEC_{str}</i>	<i>SEC_{int}</i>	SUMA^a
Trienal (parc.) BT	2.037.979.557,5	451.515.770,2	570.978.026,2	3.060.473.353,9
Única Sun	20.071.288.064,0	104.738.442,2	17.276.208.963,1	37.452.235.469,4
Trienal Sun	22.246.978,0	9.660.867,8	61.228.494,9	93.136.340,8
Única LMDI	131.285.139,3	746.327.039,7	251.571.766,9	1.129.183.946,0
Trienal LMDI	38.129.020,1	5.148.268,6	71.298.597,8	114.575.886,6

^a Debido al redondeo, la columna SUMA presenta ligeras diferencias respecto a la suma de las restantes columnas.

Tabla 4.9. Suma de errores cuadráticos de los efectos bajo distintos enfoques con respecto a una descomposición anual (mediante el método LMDI) de las variaciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Período 1990-2002.

Anual LMDI	SEC_{act}	SEC_{str}	SEC_{int}	SUMA^a
Trienal (parc.) BT	2.206.023.034,4	399.170.053,7	728.413.618,8	3.333.606.707,1
Única Sun	20.591.534.210,7	80.362.622,7	18.099.124.246,6	38.771.021.080,1
Trienal Sun	42.784.717,0	19.165.601,6	119.221.422,8	181.171.741,5
Única LMDI	176.419.633,2	678.567.433,0	162.996.841,8	1.017.983.908,2
Trienal LMDI	18.927.176,7	998.640,0	28.620.973,1	48.546.789,8

^a Debido al redondeo, la columna SUMA presenta ligeras diferencias respecto a la suma de las restantes columnas.

Primero, la posibilidad que ofrece el enfoque BT de aprovechar cualquier información adicional disponible, y con ello de realizar una descomposición trienal incluso con información parcial, conduce a resultados "más precisos" que la aplicación del método de Sun en una descomposición única (Tablas 4.8 y 4.9). Esta es una gran ventaja frente al método de Sun. En cambio, cuando la comparación se realiza con el método LMDI de período único, este último parece ofrecer mejores resultados (véanse las sumas de los errores cuadráticos en las Tablas 4.8 y 4.9).¹⁰ De cualquier modo, el método BT se perfila como una alternativa de especial interés en los estudios realizados a nivel regional o a pequeña escala, donde la falta de información para todos los factores provoca que, a menudo, no sea posible la aplicación de una descomposición dinámica.

¹⁰ Una línea futura de interés incluiría ampliar el análisis a otras bases de datos, así como la realización de estudios de simulación de Monte Carlo, al objeto de contrastar el grado de validez general de las conclusiones obtenidas a partir del problema analizado en este capítulo.

En segundo lugar, en el caso de “menor información” (descomposición única), el enfoque LMDI parece resultar notablemente “más preciso” que el de Sun, con independencia del método de descomposición (Sun o LMDI) en series anuales que tomemos como referencia.

Por último, en una situación de “información intermedia” (datos trienales), el método “más preciso” depende de la técnica de descomposición en series anuales que se tome como referencia. Si la comparación se realiza con el método de Sun, la descomposición trienal con ese mismo enfoque conduce a resultados “más precisos” (excepto para el caso del efecto estructural). En cambio, si el enfoque de referencia es el LMDI, éste será el de “mayor precisión”. Obviamente, la validez de las conclusiones queda nuevamente limitada a este estudio.

4.4. Conclusiones

Un problema práctico bien conocido en los análisis de descomposición es que, pese a las numerosas fórmulas son equivalentes desde un punto de vista teórico, con frecuencia los resultados del estudio dependen considerablemente de la fórmula de descomposición elegida. Sun (1998) propuso una solución a este problema de no unicidad: el principio de “creados conjuntamente e igualmente distribuidos”. Por su parte, Fernández (2004) utiliza la econometría de la Máxima Entropía Generalizada (MEG) para seleccionar la fórmula de descomposición que proporciona un ajuste óptimo a la información empírica adicional. Su punto de partida es el método basado en trayectorias (BT) que, como hemos visto, se puede considerar como una generalización de la metodología de Sun. Las soluciones del método BT dependen de parámetros desconocidos que caracterizan las trayectorias de los factores determinantes. Estos parámetros se pueden estimar, incluso si la información disponible es muy limitada. En el caso de disponer de información adicional para los factores

determinantes en períodos intermedios, una extensión no lineal del método MEG permite estimar dichos parámetros y obtener una descomposición “más precisa” que las resultantes de una descomposición de período único mediante métodos como el de Sun o el LMDI.

En este capítulo hemos aplicado las dos metodologías anteriores, junto con el enfoque LMDI, con el objetivo de cuantificar las contribuciones de tres factores determinantes (el PIB del conjunto de la UE-15, el peso del PIB nacional en el PIB de la UE-15 y las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de PIB nacional) sobre los cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE-15 en el período 1990-2002. La descomposición se llevó a cabo bajo distintas situaciones informativas de partida: (a) se desconocen los datos relativos a los períodos intermedios, (b) se incluye información adicional correspondiente a 1993, 1996 y 1999, y (c) se conocen los datos anuales de todos los períodos intermedios.

Independientemente de la metodología utilizada y la situación informativa de partida, los resultados muestran una gran reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, fruto del efecto intensidad. Por el contrario, los efectos actividad y, en menor medida, estructural participan incrementando dichas emisiones.

En el capítulo también hemos realizado una comparación de los distintos métodos bajo diversas situaciones informativas. Nuestro análisis sugiere que la posibilidad que ofrece el enfoque BT de aprovechar la información adicional parcial puede llevar a resultados “más precisos”, que difieran sustancialmente de los obtenidos a partir de situaciones menos informativas utilizando el enfoque de Sun. Así, el enfoque BT resulta de especial interés en el caso de estudios regionales, en donde con frecuencia la falta de información sobre los factores no permite una descomposición dinámica. Sin embargo, y pese a la

posibilidad de aprovechar información adicional, nuestro estudio no sugiere que el enfoque BT trienal con información parcial produzca resultados “más precisos” que la descomposición mediante el método LMDI de período único.

Finalmente, nuestro análisis indica que en situaciones de “menor información”, la aplicación del método LMDI conduce a resultados “más precisos” que el de Sun, mientras que en situaciones de “información intermedia” las conclusiones dependerán del método utilizado como referencia. Considerando globalmente las situaciones aquí planteadas, el enfoque LMDI parece ofrecer la alternativa más interesante con respecto al resto de los métodos estudiados.

CAPÍTULO 5.

DESCOMPOSICIÓN MULTINIVEL DE LA VARIACIÓN DEL CONSUMO AGREGADO DE ENERGÍA. ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ENERGÍA Y PROYECCIONES DE DEMANDA EN LA UE-27

5.1. Introducción

5.2. Exposición de la metodología

5.2.1. El enfoque del consumo de energía. Versión multiplicativa

5.2.1.1. Descomposición en series temporales

5.2.1.2. Descomposición multinivel

5.2.2. El enfoque de la elasticidad. Proyección de la demanda energética

5.3. La variación del consumo agregado de energía y la demanda de energía en la UE-27 en el período 2001-2008

5.3.1. Descomposición multinivel de la variación del consumo agregado de energía

5.3.1.1. Nivel de desagregación III (país)

5.3.1.2. Nivel de desagregación II

5.3.1.3. Nivel de desagregación I

5.3.2. El enfoque de la elasticidad de energía

5.4. Análisis de resultados

CAPÍTULO 5.

DESCOMPOSICIÓN MULTINIVEL DE LA VARIACIÓN DEL CONSUMO AGREGADO DE ENERGÍA. ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ENERGÍA Y PROYECCIONES DE DEMANDA EN LA UE-27

5.1. Introducción

Este capítulo se estructura en dos bloques temáticos. En el primero de ellos abordaremos la descomposición de las variaciones en el consumo agregado de energía en la UE-27 entre los años 2001 y 2008. Nuestro objetivo es identificar, cuantificar y explicar los factores que influyen en dichos cambios. Esta descomposición se lleva a cabo en tres niveles de desagregación diferentes y analizando tres factores, a diferencia de la práctica habitual en la literatura, que considera sólo dos factores. El nivel más fino de desagregación (nivel III) está conformado por 27 países, el nivel medio (nivel II) agrupa a los países en 8 unidades espaciales, y el más bajo (nivel I) está formado por 3 regiones o grupos de países. En los niveles II y I los países de la UE-27 se reúnen en grupos de características homogéneas en términos de intensidad energética. Deseamos comprobar si al comparar grupos de diferente grado de intensidad energética, y una vez descontados diversos factores (*e.g.*, las diferencias en la estructura productiva entre grupos y las diferencias en el tamaño de los mercados de los países), aún se detecta un impacto significativo del cambio tecnológico, la innovación y el mejor uso de la tecnología, entre otros aspectos.

En la segunda parte del capítulo nos ocuparemos de la estimación de los coeficientes de energía (Ang y Lee, 1996). Para ello utilizaremos una

metodología de descomposición diferente, aunque basada también en índices de Divisia. Mientras que en la primera parte se usa el llamado *enfoque del consumo de energía*, en ésta nos basaremos en el *enfoque de la elasticidad de la energía*. Los coeficientes de energía estimados nos permitirán obtener y evaluar proyecciones para la demanda energética bajo diversos escenarios alternativos.

5.2. Exposición de la metodología

5.2.1. El enfoque del consumo de energía. Versión multiplicativa

Centrándose en el enfoque del consumo de energía, Ang y Lee (1994) derivaron una descomposición multiplicativa de la ratio de consumo agregado de energía. Esta descomposición considera componentes que recogen los efectos de (a) la producción agregada (*efecto actividad*), (b) los cambios estructurales interregionales (*efecto estructural*), y (c) la proporción de insumos energéticos de calidad y los cambios técnicos (*efecto intensidad*).

Siguiendo a Ang y Lee (*ibídem*), basaremos nuestro análisis en el siguiente conjunto de variables, evaluadas en el período t :

E_t : consumo total de energía.

$E_{j,t}$: consumo de energía en la región j .

Y_t : producción total.

$Y_{j,t}$: producción de la región j .

$S_{j,t}$: fracción de la producción total obtenida en la región j ($S_{j,t} = Y_{j,t} / Y_t$).

I_t : intensidad energética ($I_t = E_t / Y_t$).

$I_{j,t}$: intensidad energética de la región j ($I_{j,t} = E_{j,t} / Y_{j,t}$).

En términos de los datos regionales desagregados, se obtiene la siguiente descomposición:

$$E_t = \sum_{j=1}^k E_{j,t} = \sum_{j=1}^k Y_t \left(Y_{j,t} / Y_t \right) \left(E_{j,t} / Y_{j,t} \right) = \sum_{j=1}^k Y_t S_{j,t} I_{j,t} \quad (5.1)$$

siendo k el número de regiones consideradas en el nivel de desagregación.

Seguiremos un desarrollo análogo al planteado en el Capítulo 3. Tomando derivadas logarítmicas con respecto al tiempo en la ecuación (5.1) e integrando la expresión resultante en el intervalo de tiempo $[0, T]$ se obtiene:

$$\ln \left(\frac{E_T}{E_0} \right) = \sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t) \left[\frac{d \ln Y(t)}{dt} + \frac{d \ln S_j(t)}{dt} + \frac{d \ln I_j(t)}{dt} \right] dt \quad (5.2)$$

donde

$$w_j(t) = \frac{Y(t) S_j(t) I_j(t)}{E(t)} = \frac{Y(t) S_j(t) I_j(t)}{\sum_{j=1}^k Y(t) S_j(t) I_j(t)} \quad (5.3)$$

Aplicando el operador exponencial en (5.2) resulta:

$$\frac{E_T}{E_0} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t) \left(\frac{d \ln Y(t)}{dt} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t) \left(\frac{d \ln S_j(t)}{dt} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t) \left(\frac{d \ln I_j(t)}{dt} \right) dt \right]} \quad (5.4)$$

Puesto que en la práctica las observaciones no se efectúan en tiempo continuo, suele recurrirse a una aproximación discreta de las integrales de la ecuación (5.4). La siguiente fórmula es una aproximación de uso ampliamente aceptado:

$$\frac{E_T}{E_0} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t^*) \ln \left(\frac{Y_T}{Y_0} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t^*) \ln \left(\frac{S_{j,T}}{S_{j,0}} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T w_j(t^*) \ln \left(\frac{I_{j,T}}{I_{j,0}} \right) dt \right]} \quad (5.5)$$

donde $w_j(t^*)$ es una función de peso que viene dada por la ecuación (5.3), evaluada en el punto $t^* \in [0, T]$. Como señalamos en el Capítulo 3, a priori t^* es desconocido, siendo posible considerar diversas funciones de peso. Ang y Choi (1997) sugieren el uso de la función de peso de tipo media logarítmica, que viene dada por la siguiente expresión:

$$w_j(t^*) = \frac{L(w_{j,0}, w_{j,T})}{\sum_{j=1}^k L(w_{j,0}, w_{j,T})} \quad (5.6)$$

donde $w_{j,0} = E_{j,0}/E_0$ y $w_{j,T} = E_{j,T}/E_T$. Vartia (1974) y Sato (1976) proponen el uso del valor agregado total como argumento de la función de peso, o sea:

$$L\left(\sum_{j=1}^k E_{j,0}, \sum_{j=1}^k E_{j,T}\right) = L(E_0, E_T) \quad (5.7)$$

y

$$\tilde{w}_j(t^*) = \frac{L(E_{j,0}, E_{j,T})}{L(E_0, E_T)} \quad (5.8)$$

Sustituyendo la ecuación (5.8) en (5.5) obtenemos:

$$\frac{E_T}{E_0} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T \tilde{w}_j(t^*) \ln \left(\frac{Y_T}{Y_0} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T \tilde{w}_j(t^*) \ln \left(\frac{S_{j,T}}{S_{j,0}} \right) dt \right]} e^{\left[\sum_{j=1}^k \int_0^T \tilde{w}_j(t^*) \ln \left(\frac{I_{j,T}}{I_{j,0}} \right) dt \right]} \quad (5.9)$$

La ecuación (5.9) puede reformularse del modo siguiente:

$$R_{tot} = R_{act} R_{str} R_{int} \quad (5.10)$$

$$R_{act} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \frac{(E_{j,T} - E_{j,0}) / (\ln E_{j,T} - \ln E_{j,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln(Y_T / Y_0) \right]} \quad (5.11)$$

$$R_{str} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \frac{(E_{j,T} - E_{j,0}) / (\ln E_{j,T} - \ln E_{j,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln(S_{j,T} / S_{j,0}) \right]} \quad (5.12)$$

$$R_{int} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \frac{(E_{j,T} - E_{j,0}) / (\ln E_{j,T} - \ln E_{j,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln(I_{j,T} / I_{j,0}) \right]} \quad (5.13)$$

donde $R_{tot} = E_T / E_0$ es la variación (índice) del consumo agregado de energía entre el año 0 y el año T (efecto total), R_{act} denota el impacto asociado a la variación de la producción (efecto de la actividad), R_{str} refleja la contribución de los cambios estructurales (efecto estructural) y R_{int} denota el impacto de la intensidad energética regional (efecto de la intensidad).¹

5.2.1.1. Descomposición en series temporales

Como hemos visto en el Capítulo 1, en la descomposición en series temporales la variación de 0 a T se descompone en términos de las variaciones de los períodos intermedios. Si denominamos $(C_{tot})_{T,0}$ al cambio acumulado en el consumo total de energía, $(C_{act})_{T,0}$ al efecto acumulado de la producción, $(C_{str})_{T,0}$ al efecto estructural acumulado, $(C_{int})_{T,0}$ al efecto intensidad acumulado y $(C_{rsd})_{T,0}$ al efecto residual acumulado², todos ellos referidos al

¹ Como se mencionó en el Capítulo 3, esta descomposición supone un importante refinamiento sobre los métodos Divisia convencionales.

² Como hemos visto, en una descomposición aditiva exacta la desviación de la variación total es nula (o unitaria, en el caso multiplicativo). Por lo tanto, el término residual desaparece. En nuestro caso calculamos dicho efecto únicamente a modo de comprobación.

período de 0 a T , entonces la descomposición multiplicativa puede factorizarse del modo siguiente:

$$(C_{tot})_{0,T} = (R_{tot})_{0,1} (R_{tot})_{1,2} \cdots (R_{tot})_{T-1,T} \quad (5.14)$$

$$(C_{act})_{0,T} = (R_{act})_{0,1} (R_{act})_{1,2} \cdots (R_{act})_{T-1,T} \quad (5.15)$$

$$(C_{str})_{0,T} = (R_{str})_{0,1} (R_{str})_{1,2} \cdots (R_{str})_{T-1,T} \quad (5.16)$$

$$(C_{int})_{0,T} = (R_{int})_{0,1} (R_{int})_{1,2} \cdots (R_{int})_{T-1,T} \quad (5.17)$$

$$(C_{rsd})_{0,T} = (R_{rsd})_{0,1} (R_{rsd})_{1,2} \cdots (R_{rsd})_{T-1,T} \quad (5.18)$$

5.2.1.2. Descomposición multinivel

El objetivo principal de los estudios de descomposición suele ser la estimación del impacto del cambio estructural sobre la producción. Sin embargo, la magnitud del cambio estructural viene determinada por la agrupación establecida. Esto implica que los resultados del análisis dependerán del nivel de desagregación que se considere en el estudio, el cual a su vez está limitado por la disponibilidad de información.

Con el fin de reducir esta dependencia, varios autores (e.g., Jenne y Cattell, 1983; Hankinson y Rhys, 1983; Morovic' *et al.*, 1989; Li *et al.*, 1990; Gardner, 1993; Ang, 1995b) han desarrollado descomposiciones multinivel. En sus trabajos consideran z niveles de desagregación y únicamente 2 factores. Nosotros ampliaremos el esquema habitual, considerando z niveles de desagregación e introduciendo un tercer factor: el efecto de la actividad.

Si se consideran z niveles de desagregación, la descomposición multiplicativa en cada uno de estos niveles se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_{tot} = R1_{act} R1_{str} R1_{int} R1_{rsd} \quad (5.19)$$

$$R_{tot} = R2_{act} R2_{str} R2_{int} R2_{rsd} \quad (5.20)$$

...

$$R_{tot} = Rz_{act} Rz_{str} Rz_{int} Rz_{rsd} \quad (5.21)$$

Donde $R\{h\}_{act}$, $R\{h\}_{str}$, $R\{h\}_{int}$ y $R\{h\}_{rsd}$ son, respectivamente, los efectos actividad, estructural, intensidad y el término residual, para el h -ésimo nivel de desagregación ($h = 1, \dots, z$).

En virtud de la propiedad de circularidad, la ecuación (5.19) puede expresarse como sigue:³

$$R_{tot} = (R1_{act} R12_{act} \dots R\{z-1\}_{act}) (R1_{str} R12_{str} \dots R\{z-1\}_{str}) (R1_{int} R12_{int} \dots R\{z-1\}_{int}) Rz_{rsd} \quad (5.22)$$

donde $R\{z-1\}_z$ denota el efecto estimado al pasar del nivel $\{z-1\}$ a un nivel z más fino y Rz_{rsd} denota el término residual en el nivel z . Siguiendo un razonamiento análogo, Ang (1995b) demuestra que los efectos estimados debidos al paso del nivel de desagregación $\{z-1\}$ al z pueden expresarse como sigue:

$$R\{z-1\}_{act} = e^{\left[\sum_{r=1}^m \frac{(E_{r,T} - E_{r,0}) / (\ln E_{r,T} - \ln E_{r,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln \left(\frac{Y\{z-1\}_{z_T}}{Y\{z-1\}_{z_0}} \right) \right]} \quad (5.23)$$

$$R\{z-1\}_{str} = e^{\left[\sum_{r=1}^m \frac{(E_{r,T} - E_{r,0}) / (\ln E_{r,T} - \ln E_{r,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln \left(\frac{S\{z-1\}_{z_{r,T}}}{S\{z-1\}_{z_{r,0}}} \right) \right]} \quad (5.24)$$

$$R\{z-1\}_{int} = e^{\left[\sum_{r=1}^m \frac{(E_{r,T} - E_{r,0}) / (\ln E_{r,T} - \ln E_{r,0})}{(E_T - E_0) / (\ln E_T - \ln E_0)} \ln \left(\frac{I\{z-1\}_{z_{r,T}}}{I\{z-1\}_{z_{r,0}}} \right) \right]} \quad (5.25)$$

³ Basándose en Hulten (1973) y Vogt (1978), Liu *et al.* (1992) demuestran que, cuando se consideran diferencias discretas y bajo ciertas condiciones de homogeneidad débil, los índices tipo Divisia verifican la propiedad de circularidad, con lo que:

$$Rz_{act} = R1_{act} R12_{act} \dots R\{z-1\}_{act}$$

$$Rz_{str} = R1_{str} R12_{str} \dots R\{z-1\}_{str} \text{ y}$$

$$Rz_{int} = R1_{int} R12_{int} \dots R\{z-1\}_{int}$$

donde el subíndice r varía desde la primera hasta la m -ésima región definida en el nivel de desagregación z . $S\{z-1\}_{z,r,T} = Sz_{r,T}/S\{z-1\}_{j,T}$ e $I\{z-1\}_{z,r,T} = Iz_{r,T}/I\{z-1\}_{j,T}$ recogen los efectos estructural e intensidad de subgrupo al pasar de un nivel $\{z-1\}$ a otro z , siendo $Sz_{r,T}$, $Iz_{r,T}$, $S\{z-1\}_{j,T}$ y $I\{z-1\}_{j,T}$, respectivamente, los efectos estructural e intensidad para cada región r al nivel z y los efectos estructural e intensidad para cada unidad j al nivel $\{z-1\}$ al que pertenece r . Por su parte, $Y\{z-1\}_{z,T} = Y\{z-1\}_{z_0} = 1$. En este tipo de descomposición llegamos a la conclusión de que no hay efecto de subgrupo para el factor actividad, esto es, el tercer factor incluido no se ve alterado por el nivel de desagregación establecido.

5.2.2. El enfoque de la elasticidad. Proyección de la demanda energética

A partir de los conceptos de coeficiente de energía y elasticidad, Ang y Lee (1994) introducen el llamado enfoque de la elasticidad como una extensión del enfoque del consumo de energía. La idea consiste en medir los impactos de los factores en términos de coeficientes de energía. Aunque éste no ha sido un enfoque muy aplicado en el campo medioambiental, resulta de interés práctico dada la adimensionalidad de los coeficientes de energía, que facilita las comparaciones internacionales. Una ventaja adicional es que los resultados obtenidos pueden emplearse para extrapolar posibles tendencias futuras de la demanda de energía.

El coeficiente de energía del período de 0 a T , que denotaremos por $\varepsilon_{0,T}$, se define como el cociente entre la tasa de variación relativa en el consumo de energía y la tasa de variación del producto nacional:

$$\varepsilon_{0,T} = \frac{\Delta E_{0,T}/E_0}{\Delta Y_{0,T}/Y_0} \quad (5.26)$$

donde $\Delta E_{0,T} = E_T - E_0$ y $\Delta Y_{0,T} = Y_T - Y_0$, siendo E_0 , Y_0 , E_T e Y_T , respectivamente, el consumo de energía y el producto nacional real en los años 0 y T .

Cuando se consideran las tasas instantáneas de variación de la energía y la producción, esta ecuación puede expresarse del modo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{dE/E}{dY/Y} \quad (5.27)$$

La expresión (5.28) a continuación corresponde a un modelo en el que la elasticidad del consumo de energía con respecto a la renta es constante. Por tanto:

$$E = kY^\varepsilon \quad (5.28)$$

donde k es un coeficiente constante. El exponente ε puede estimarse mediante un ajuste de mínimos cuadrados ordinarios, aplicado a una transformación logarítmica de (5.28).

Los coeficientes de energía global y factorizados se pueden estimar utilizando la misma técnica de regresión, a partir de una transformación logarítmica de las siguientes expresiones:

$$C_{tot} = kY^{\varepsilon_{tot}} \quad (5.29)$$

$$C_{act} = k_1Y^{\varepsilon_{act}} \quad (5.30)$$

$$C_{str} = k_2Y^{\varepsilon_{str}} \quad (5.31)$$

$$C_{int} = k_3Y^{\varepsilon_{int}} \quad (5.32)$$

$$C_{rsd} = k_4Y^{\varepsilon_{rsd}} \quad (5.33)$$

Si los ajustes estadísticos de estas ecuaciones son perfectos, se obtiene $k = k_1k_2k_3k_4$, y por tanto:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{act} + \varepsilon_{str} + \varepsilon_{int} + \varepsilon_{rsd} \quad (5.34)$$

Una vez estimados los efectos, e ignorando el término residual, podemos expresar la ecuación (5.28) del modo siguiente:

$$E = kY^{\varepsilon_{act} + \varepsilon_{str} + \varepsilon_{int}} \quad (5.35)$$

Esto permite obtener la siguiente expresión para la proyección de la demanda de energía:

$$E_P/E_B = (Y_P/Y_B)^{\varepsilon_{act} + \varepsilon_{str} + \varepsilon_{int}} \quad (5.36)$$

donde los subíndices P y B se refieren al año de la proyección y al base, respectivamente. La previsión de demanda de energía viene dada por:

$$E_P = E_B (Y_P/Y_B)^{\varepsilon_{act} + \varepsilon_{str} + \varepsilon_{int}} \quad (5.37)$$

Por medio de los coeficientes de energía factorizados (estimados a partir de los datos históricos), e imponiendo hipótesis razonables sobre la tendencia de la producción industrial, la ecuación (5.37) permite elaborar proyecciones para la demanda futura de energía.

5.3. La variación del consumo agregado de energía y la demanda de energía en la UE-27 en el período 2001-2008

Para analizar la variación del consumo de energía agregada de la UE-27 entre 2001 y 2008 llevamos a cabo una descomposición multiplicativa⁴ mediante el método LMDI, considerando tres niveles de desagregación. Esto nos permitirá observar la sensibilidad de los resultados ante cambios en el nivel de desagregación. A continuación nos centramos en el enfoque de la elasticidad, con el propósito de llevar a cabo una predicción de la demanda de energía bajo diversos escenarios.

⁴ Dado que existe una relación de equivalencia entre las descomposiciones multiplicativa y aditiva (Ang *et al.*, 1998), esta última es formalmente redundante.

Las series temporales de consumo de energía en cada país (en miles de toneladas equivalentes de petróleo) y producto interior bruto a precios corrientes en paridad de poder de compra (en millones de euros) han sido obtenidas de Eurostat.

5.3.1. Descomposición multinivel de la variación del consumo agregado de energía

Como indicamos más arriba, utilizamos tres niveles de desagregación. En el nivel III consideramos 27 unidades espaciales, que se corresponden con cada uno de los estados que conforman la UE-27 (nivel país).

En los niveles superiores (II y I), agrupamos las unidades espaciales en función del valor observado de la intensidad de energía en el año final del estudio (véase el fichero de datos en el CD adjunto). De este modo, pretendemos no sólo analizar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en el nivel de desagregación, sino también captar mejor los movimientos estructurales entre grupos, al formar agrupaciones homogéneas en términos de eficiencia.

El nivel II se compone de 8 regiones⁵, obtenidas al agregar los países de la UE-27 en función de su intensidad de energía en el año final del estudio (véase el fichero de datos en el CD adjunto). El desglose resultante es el siguiente:

- *Región 1*: Dinamarca, Irlanda y Reino Unido.
- *Región 2*: Italia, Austria, Alemania y Suecia.
- *Región 3*: Luxemburgo, Francia, Grecia, Países Bajos, España y Portugal.
- *Región 4*: Malta y Bélgica.
- *Región 5*: Bulgaria.

⁵ Las regiones aparecen ordenadas de menor a mayor intensidad de energía. Aquellos países con mayor intensidad energética parecen corresponder a países del Centro y Este de Europa.

- *Región 6:* Finlandia, Chipre y Letonia.
- *Región 7:* República Checa, Estonia, Rumanía, Eslovenia y Eslovaquia.
- *Región 8:* Lituania, Hungría y Polonia.

Siguiendo el mismo criterio de agregación, dividimos el nivel I en 3 unidades espaciales:

- *Países de baja intensidad energética:* Dinamarca, Irlanda, Reino Unido y Austria.
- *Países de intensidad energética media:* Italia, Alemania, Suecia, Luxemburgo, Francia, Grecia, Países Bajos, España, Portugal, Malta y Bélgica.
- *Países de alta intensidad energética:* Bulgaria, Finlandia, Chipre, Letonia, República Checa, Estonia, Rumanía, Eslovenia, Eslovaquia, Lituania, Hungría y Polonia.

5.3.1.1. Nivel de desagregación III (país)

La Tabla 5.1 recoge los resultados del análisis en el tercer nivel de desagregación.

Tabla 5.1. Resultados de la descomposición multiplicativa de la variación del consumo agregado de energía en la UE-27 en el nivel de desagregación III, período 2001-2008. Base 2001.

Año \ Efecto	C3_{act}	C3_{str}	C3_{int}	C3_{rsd}	C_{tot}
2001	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2002	1,00267	1,00109	0,98396	1,00000	0,98766
2003	1,02330	1,00425	0,99258	1,00000	1,02001
2004	1,04811	1,00928	0,97693	1,00000	1,03344
2005	1,07011	1,01118	0,95603	1,00000	1,03450
2006	1,10767	1,01409	0,92387	1,00000	1,03776

2007	1,13186	1,01632	0,88594	1,00000	1,01912
2008	1,14872	1,02037	0,87231	1,00000	1,02245

De acuerdo con la Tabla 5.1, entre 2001 y 2008 el consumo total de energía en la UE-27 se ha incrementado en un 2,245% (C_{tot}). El efecto arrastre provocado por el aumento de la producción global de la UE (efecto actividad) y el efecto producido por los cambios estructurales interregionales (efecto estructural) han contribuido positivamente al incremento del consumo. Concretamente, el efecto actividad ha superado en más de siete veces al estructural (14,872% frente a 2,037%). Por lo que se refiere al efecto intensidad, éste ha contribuido en un 12,769% a la reducción del consumo total de energía. Por tanto, el alcance de este efecto no ha sido suficiente para compensar el impacto de los efectos actividad y estructural.

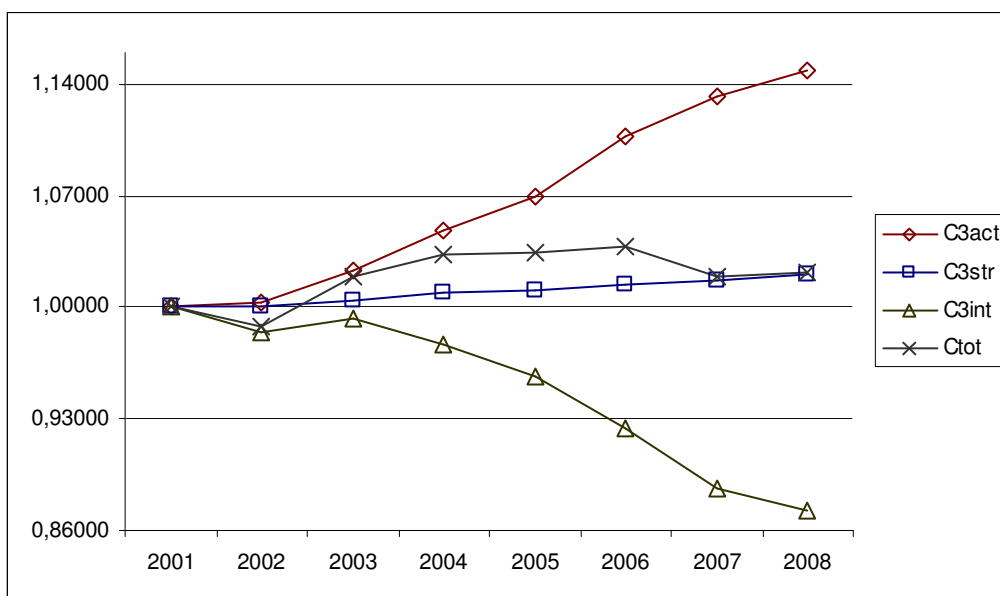


Figura 5.1. Resultados de la descomposición multiplicativa de la serie temporal del consumo agregado de energía en la UE-27 en 2001-2008 (base 2001).

Al analizar en detalle la evolución del efecto total a lo largo de todo el período de estudio, se pueden distinguir tres fases: 2001-2002, 2003-2006 y 2007-2008. En la primera fase, el consumo agregado de energía se redujo, siendo los efectos actividad y estructural positivos, de modesta magnitud y compensados parcialmente por la notable influencia del efecto intensidad, de signo opuesto a aquéllos.

Durante el período 2003-2006, el consumo total de energía se fue incrementando como consecuencia del efecto estructural y, especialmente, del efecto actividad, siendo ambos suficientemente elevados como para contrarrestar el efecto intensidad negativo. En 2003 los efectos con mayor peso en la descomposición (actividad e intensidad) parecen sufrir alguna alteración. Concretamente, el efecto actividad comienza a crecer a mayores tasas que hasta entonces, contribuyendo de manera más notable al incremento del consumo agregado de energía. Por su parte, el efecto intensidad, que continúa manteniendo su contribución en la reducción del consumo agregado de energía, en 2003 con respecto al año anterior, excepcionalmente, participa incrementando dicho consumo. Como consecuencia de todo lo anterior, la tasa interanual de crecimiento del consumo de energía en el año 2003 es, con gran diferencia, la mayor de toda la serie. La caída del precio de la energía en ese período provocó un fuerte incremento del consumo que no vino acompañado por un importante incremento de la renta.

Por último, en el periodo 2007-2008, el consumo total de energía sigue siendo superior al de 2001, pero experimenta una notable caída respecto a los valores de la etapa previa, que lo hacen colocarse a niveles similares a 2003. Este descenso se produce por el destacado impacto del efecto intensidad, y a pesar de la influencia positiva de los efectos estructural y

actividad. No obstante, en 2008 las tasas de crecimiento de los efectos intensidad y actividad se ralentizan (véase la Figura 5.1), perdiendo influencia como consecuencia del menor crecimiento económico. En principio, el escenario que plantea una recesión no favorece la producción, la inversión en nuevas tecnologías, la búsqueda de energías alternativas, ni la innovación técnica.

5.3.1.2. Nivel de desagregación II

Los resultados del análisis en el nivel de desagregación II aparecen en la Tabla 5.2. En este nivel el consumo total de energía (C_{tot}) y la producción total ($C2_{act}$) de la UE-27 son los mismos que en el nivel III, pues evidentemente no dependen del nivel de desagregación. Por tanto, el consumo agregado de energía ha aumentado un 2,245%, y la inercia de la producción global de la UE ha contribuido en un 14,872% a este incremento.

Tabla 5.2. Resultados de la descomposición multiplicativa de la variación del consumo agregado de energía en la UE-27 en el nivel de desagregación II, período 2001-2008. Base 2001.

Año \ Efecto	$C2_{act}$	$C2_{str}$	$C2_{int}$	$C2_{rsd}$	C_{tot}
2001	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2002	1,00267	1,00076	0,98429	1,00000	0,98766
2003	1,02330	1,00329	0,99353	1,00000	1,02001
2004	1,04811	1,00810	0,97808	1,00000	1,03344
2005	1,07011	1,00999	0,95716	1,00000	1,03450
2006	1,10767	1,01252	0,92530	1,00000	1,03776
2007	1,13186	1,01463	0,88742	1,00000	1,01912
2008	1,14873	1,01828	0,87410	1,00000	1,02245

De nuevo el efecto estructural ($C2_{str}$) tiene una influencia positiva (1,828%) sobre el consumo agregado de energía, aunque su contribución se ve disminuida respecto al anterior nivel de desagregación. El efecto de la intensidad ($C2_{int}$) ha tenido impacto negativo, contribuyendo en un 12,59% a la reducción del consumo total de energía. Sin embargo, comparado con el nivel III, este último efecto ha visto también disminuida su influencia sobre el agregado.

Por otra parte, los resultados en este nivel de desagregación siguen mostrando un fuerte incremento del efecto intensidad en el año 2003 con respecto al año previo y una importante caída en el año 2007 con respecto a la etapa anterior. Naturalmente, en una economía globalizada y máxime en un mercado único, los movimientos alcistas o recesivos del PIB global afectarán en algún grado a todos los países, se consideren éstos agregados o no.

En la tabla 5.3 se recogen los efectos de subgrupo al pasar del nivel III al nivel II, en los que se muestra cómo los efectos estructural e intensidad de subgrupo contrarrestan a los de grupo, reduciendo así la influencia de estos últimos.

Tabla 5.3. Resultados de la descomposición multiplicativa en series temporales del cambio del consumo agregado de energía de la UE-27. Paso del nivel III al II (2001-2008). Base 2001.

Año \ Efecto	$C32_{str}$	$C32_{int}$
2001	1,00000	1,00000
2002	0,99890	1,00033
2003	0,99794	1,00096

2004	0,99835	1,00118
2005	0,99853	1,00118
2006	0,99760	1,00155
2007	0,99911	1,00167
2008	0,99752	1,00205

Al pasar del nivel III al II, el efecto intensidad de subgrupo ($C32_{int}$) incrementa ligeramente el consumo total de energía (0,205%), mientras que el efecto estructural de subgrupo ($C32_{str}$) lo reduce en un 0,248%. Por tanto, parece que cuando se consideran unidades espaciales superiores dentro de las cuales los países son más homogéneos en cuanto a intensidad energética, los efectos (intensidad y estructural) se aproximan más a la unidad. Esto es, los impactos de grupo sobre la variación del consumo de energía resultan de menor relevancia que en un nivel superior de desagregación.

5.3.1.3. Nivel de desagregación I

En este nivel, los efectos total y actividad mantienen, evidentemente, sus valores, mientras que los efectos estructural e intensidad se reducen (véase la Tabla 5.4). El cambio estructural sigue teniendo una influencia positiva en el consumo agregado de energía, mientras que el cambio técnico y el I+D mantienen su impacto negativo. En cualquier caso, la diferencia entre estos dos efectos se reduce aún más que en el nivel II. Mientras que el efecto estructural acumulado es de un 1,691%, el intensidad asciende a un 12,473%. De 2001 a 2008, el impacto del cambio tecnológico, la innovación y el mejor uso de las tecnologías fue aproximadamente diez veces mayor que el de los cambios estructurales entre los grupos.

Tabla 5.4. Resultados de la descomposición multiplicativa de la variación del consumo agregado de energía en la UE-27 en el nivel de desagregación I, período 2001-2008. Base 2001.

Año \ Efecto	C1_{act}	C1_{str}	C1_{int}	C1_{rsd}	C_{tot}
2001	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2002	1,00267	1,00041	0,98463	1,00000	0,98766
2003	1,02330	1,00209	0,99471	1,00000	1,02001
2004	1,04811	1,00592	0,98020	1,00000	1,03344
2005	1,07011	1,00837	0,95869	1,00000	1,03450
2006	1,10767	1,01075	0,92691	1,00000	1,03776
2007	1,13186	1,01316	0,88870	1,00000	1,01912
2008	1,14873	1,01691	0,87527	1,00000	1,02245

Los resultados en este nivel continúan mostrando pautas similares a las observadas en los anteriores, esto es, un incremento del efecto intensidad en 2003 con respecto al año previo y una importante caída en 2007 con respecto a la fase previa, aunque de menor impacto que en el nivel de desagregación más fino. Esto apunta nuevamente hacia una influencia suavizada de este efecto en el nivel I con respecto al nivel III.

Examinados los efectos de subgrupo al pasar del tercer al primer nivel de desagregación (Tabla 5.5), observamos que el efecto estructural acumulado ($C31_{str}$) ha contribuido a reducir el consumo energético total en un 0,339%, mientras que el efecto intensidad acumulado ($C31_{int}$) lo ha aumentado en un 0,34%.

Tabla 5.5. Resultados de la descomposición en series temporales del cambio del consumo agregado de energía de la UE-27. Paso del nivel III al I (2001-2008). Base 2001.

Año \ Efecto	$C31_{str}$	$C31_{int}$
2001	1,00000	1,00000
2002	0,99932	1,00068
2003	0,99785	1,00215
2004	0,99667	1,00334
2005	0,99722	1,00278
2006	0,99671	1,00330
2007	0,99689	1,00312
2008	0,99661	1,00340

A medida que consideramos un nivel inferior de desagregación la influencia de los efectos estructural e intensidad tiende a reducirse (véanse las Figuras 5.2 y 5.3).

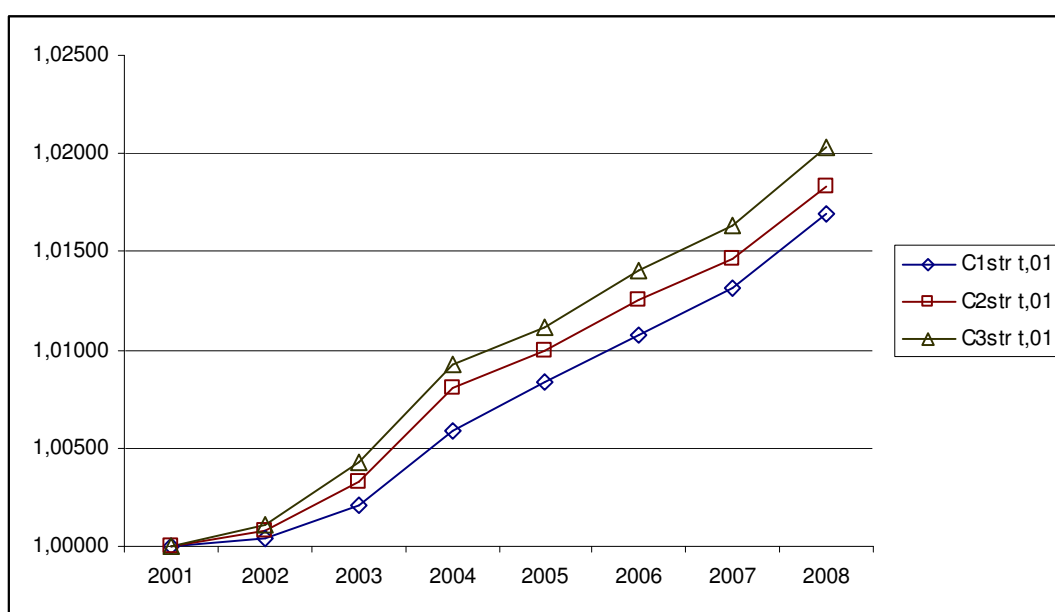


Figura 5.2. Efectos estructurales acumulados para el consumo de energía de la UE-27. Método LMDI con tres niveles de desagregación, 2001-2008.

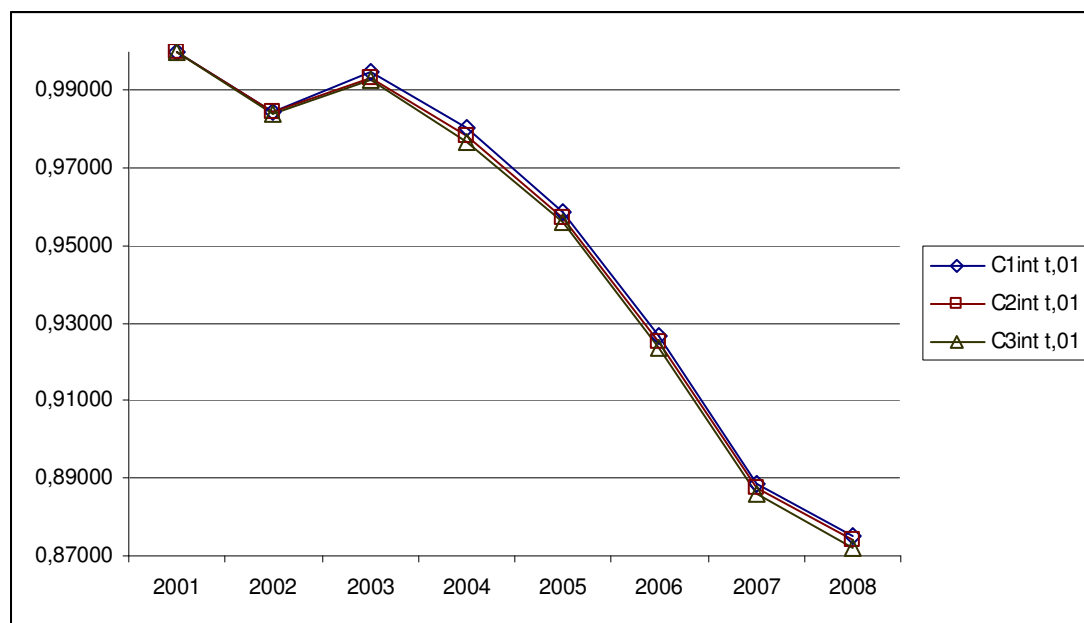


Figura 5.3. Efectos intensidad acumulados para el consumo de energía de la UE-27. Método LMDI con tres niveles de desagregación, 2001-2008.

Al haber disminuido muy rápidamente en este período los efectos intensidad acumulados, las diferencias entre líneas en la Figura 5.3 aparentan ser de magnitud reducida. No obstante, las Figuras 5.2 y 5.3 muestran la misma realidad: al agrupar los países de la UE-27 siguiendo el criterio de la intensidad energética, se aprecia que los efectos estructural e intensidad han reducido su influencia conjunta en el consumo de energía global de la UE 27 en el período 2001-2008. Los movimientos intragrupo (efectos de subgrupo) parecen ser la causa de esta menor influencia.

5.3.2. El enfoque de la elasticidad de energía

En la Tabla 5.6 se recogen los coeficientes de energía, agregados y factorizados, para la UE-27 en el período 2001-2008, calculados mediante regresión lineal aplicada a las transformaciones logarítmicas de las ecuaciones (5.30) a (5.33).

Tabla 5.6. Estimación de los coeficientes de energía (agregados y factorizados) para la UE-27 en el período 2001-2008. Base 2001.

Año \ Efecto	C_{act}	C_{str}	C_{int}	C_{rsd}	C_{tot}
2001	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2002	1,00267	1,00109	0,98396	1,00000	0,98766
2003	1,02330	1,00425	0,99258	1,00000	1,02001
2004	1,04811	1,00928	0,97693	1,00000	1,03344
2005	1,07011	1,01118	0,95603	1,00000	1,03450
2006	1,10767	1,01409	0,92387	1,00000	1,03776
2007	1,13186	1,01632	0,88594	1,00000	1,01912
2008	1,14872	1,02037	0,87231	1,00000	1,02245

Al analizar las estimaciones de los coeficientes de energía agregados y factorizados, ordenados en función del PIB global de la UE-27 (véase Figura 5.4) se observa claramente que cuanto mayor es el PIB, más elevado es el consumo agregado de energía. La figura muestra una horquilla limitada por los efectos actividad e intensidad, con influencia positiva del primero y negativa del segundo, siendo más importante la influencia del efecto actividad. En cualquier caso, el gráfico señala una relación directa entre el PIB global y el efecto de la actividad o arrastre que éste tiene sobre el conjunto de la economía europea y que finalmente supone un aumento en el consumo agregado de energía. Asimismo, se observa una correlación inversa entre el PIB global y el efecto intensidad, esto es, cuanto mayor es el PIB global, mayores son las inversiones en I+D y las mejoras tecnológicas, que finalmente suponen incrementos en la eficiencia energética, que repercutirán en una reducción en el consumo agregado de energía. Por lo que respecta al efecto estructural, se observa una relación directa con el PIB global. En este sentido, parece que los cambios hacia un mayor crecimiento económico

llevan consigo un cambio estructural que no favorece la reducción del consumo energético global.

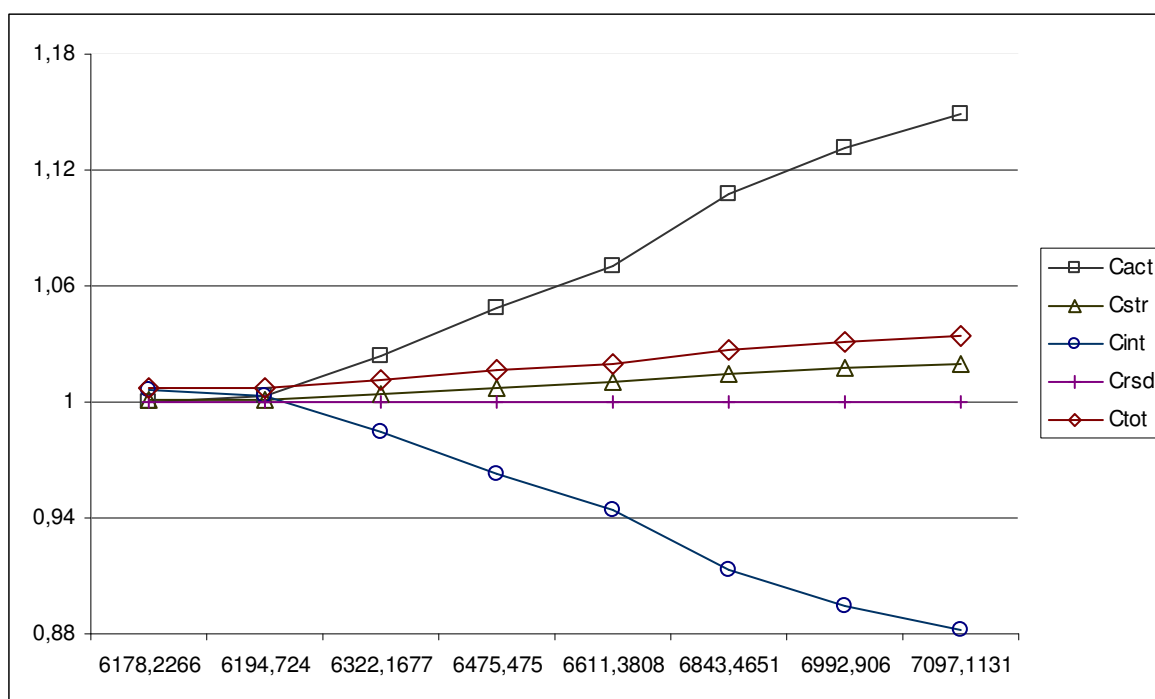


Figura 5.4. Resultados de la descomposición de la elasticidad de energía agregada de la UE-27 en 2001 a 2008, y su evolución frente al PIB de la UE-27 a precios corrientes en PPA (millones de euros).

En la Tabla 5.7 se recogen las estimaciones de los coeficientes de elasticidad agregados y factorizados. Los resultados anteriores apuntan a que la elasticidad de la demanda de energía con respecto a la producción en la UE-27 es positiva e inelástica (es decir, ante un incremento de la producción, el incremento de la demanda de energía es menos que proporcional). Concretamente, el coeficiente global indica que un incremento del producto nacional en un 1% conlleva un aumento del consumo de energía del

0,1885%⁶. El componente estructural logra estimular el consumo de energía (0,1329%), al igual que el efecto actividad (0,9999%), mientras que el factor intensidad reduce el consumo energético (0,9443%). Tanto la actividad como la intensidad tienen los efectos numéricamente más relevantes (aunque de signos opuestos) sobre el consumo de energía.

Tabla 5.7. Coeficientes de elasticidad estimados^a para los efectos actividad, estructural, intensidad, residual y total, período 2001-2008.

Actividad	Estructural	Intensidad	Residual	Total
$k_1 = 0,00016^*$	$k_2 = 0,31390^*$	$k_3 = 3.822,85^*$	$k_4 = 1$	$k = 0,19429$
$\varepsilon_{act} = 0,99996^*$	$\varepsilon_{str} = 0,13286^*$	$\varepsilon_{int} = -0,94431^*$	$\varepsilon_{rsd} = 1,5E-15^{**}$	$\varepsilon_{tot} = 0,18851$
$R^2 = 1$	$R^2 = 0,98808$	$R^2 = 0,96727$	$R^2 = 0,18267$	$R^2 = 0,58828$

(a) Los símbolos * y ** denotan significatividad a los niveles del 5 y 10%, respectivamente. R^2 es el coeficiente de determinación de la regresión.

El enfoque de la elasticidad permite obtener proyecciones. En nuestro caso, derivamos proyecciones para los niveles de demanda de energía en la UE-27 en el período 2009-2012, tomando como referencia el comportamiento observado en los años anteriores. El año base de la proyección es 2008. Las hipótesis que utilizaremos para las proyecciones se detallan a continuación:

- **Proyección 1:** se asume que tanto la estructura interregional de la producción como las intensidades de energía no varían respecto a sus valores de 2008 ($\varepsilon_{act} = 0,999$ y $\varepsilon_{str} = \varepsilon_{int} = 0$).

- **Proyección 2:** se supone que los cambios en la estructura interregional de la producción se comportan como en el pasado, pero no se producen

⁶ Berndt y Field (1981) obtuvieron valores similares (entre 0,1 y 0,36) para el caso de la industria manufacturera de EEUU.

cambios con respecto a 2008 en las intensidades de energía ($\varepsilon_{act} = 0,999$, $\varepsilon_{str} = 0,1328$ y $\varepsilon_{int} = 0$).

- **Proyección 3:** se considera que los cambios en las intensidades energéticas se comportarán como en el pasado, mientras que no se producirán variaciones en la estructura interregional de la producción, que se mantendrá en los valores de 2008 ($\varepsilon_{act} = 0,999$, $\varepsilon_{str} = 0$ y $\varepsilon_{int} = -0,9443$).

- **Proyección 4:** se plantea que tanto la estructura interregional de la producción como las intensidades de energía seguirán comportándose como en el pasado ($\varepsilon_{act} = 0,999$, $\varepsilon_{str} = 0,1328$ y $\varepsilon_{int} = -0,9443$).

Las proyecciones planteadas (véase la Tabla 5.8) se realizan asumiendo una tasa de crecimiento anual del 1,4% para el PIB de la UE-27. Elegimos esta tasa por ser la realmente observada entre los dos últimos años del período estudiado y parecemos una tasa razonable para este periodo, en el que se ha producido una ralentización del crecimiento europeo.

Tabla 5.8. Proyecciones de la demanda de energía (en miles de toneladas equivalentes de petróleo) bajo diversos escenarios y sus desviaciones (diferencias) con respecto a los datos publicados.

Años	Proyección 1	Proyección 2	Proyección 3	Proyección 4	Dato publicado
2009	1.180.788,33	1.182.412,67	1.169.308,02	1.170.916,57	1.112.212,00
2010	1.180.788,33	1.182.412,67	1.169.308,02	1.170.916,57	1.153.312,00
2011	1.193.068,04	1.196.352,77	1.169.981,42	1.173.202,59	
2012	1.205.475,46	1.210.457,21	1.170.655,22	1.175.493,07	
Años	Desviación Proyección 1	Desviación Proyección 2	Desviación Proyección 3	Desviación Proyección 4	
2009	68.576,33	70.200,67	57.096,02	58.704,57	
2010	27.476,33	29.100,67	15.996,02	17.604,57	

Los resultados de la Tabla 5.8 muestran un alto grado de congruencia entre las proyecciones 1 y 2, por un lado, y las proyecciones 3 y 4 por el otro. Las dos primeras predicen un mayor incremento de la demanda de energía entre 2009 y 2012, lo cual refleja el hecho de que en las mismas sólo se tienen en cuenta los efectos positivos (actividad, y actividad más efecto estructural, respectivamente). En cambio, las proyecciones 3 y 4 únicamente anticipan incrementos leves, que serían consecuencia del impacto negativo del efecto intensidad, el cual compensaría parcialmente la acción conjunta del resto de los efectos.

Finalmente, dado que Eurostat ha publicado recientemente los datos de consumo de energía para los años 2009 y 2010, es posible llevar a cabo una evaluación de nuestras proyecciones para dichos períodos. El análisis de la demanda de energía muestra que esta variable ha presentado una tendencia creciente en la primera década del siglo XXI, con aumentos continuados salvo en determinados años (2002, 2007 y 2009). Este comportamiento histórico explica que nuestras cuatro proyecciones coincidan en prever una demanda creciente de energía. Sin embargo, la peculiar conducta del consumo de energía en el año 2009 (como consecuencia de la última recesión) se acerca al escenario conservador contemplado en la proyección 3 (*i.e.*, cambios en la intensidad energética iguales al pasado, manteniendo la estructura interregional de la producción en los niveles de 2008).

En el año 2010, la menor desviación entre la demanda real de energía y nuestra proyección se produce nuevamente bajo el escenario 3, el más conservador de los planteados. Y es que, pese a que la demanda real de energía recupera su senda de crecimiento tras el descalabro en el año previo, sigue en niveles por debajo de los de 2003.

Comparando las desviaciones para los años 2009 y 2010, se observa que las proyecciones de demanda para 2010, pese a ser un horizonte temporal más lejano, son claramente más próximas al dato publicado (Tabla 5.8). El motivo de esta mayor proximidad podría ser la fuerte caída sufrida por el consumo de energía en el año 2009.

5.4. Análisis de resultados

En este capítulo hemos recogido una metodología de descomposición basada en índices tipo Divisia, centrándonos tanto en el enfoque del consumo de energía como en el de la elasticidad de energía. El análisis empírico se refiere a los países de la UE-27 en el período 2001-2008. Se han incluido además proyecciones para la demanda de energía. En el período estudiado, el consumo total de energía se ha incrementado en un 2,245%. Al descomponer esta variación se observa:

(a) En el nivel de desagregación III (27 países), los cambios estructurales interregionales, y especialmente la inercia de la producción global de la Unión Europea, han contribuido positivamente, en un 2,037% y un 14,872% respectivamente, a este incremento. En cambio, el mejor uso de las tecnologías, la adaptación a técnicas más eficientes, el cambio técnico y la innovación han contribuido negativamente en un 12,769%.

(b) En el nivel de desagregación II (8 unidades espaciales), los efectos estructural e intensidad ($C2_{str}$ y $C2_{int}$) mantienen su signo, aunque ven reducida ligeramente su contribución respecto al nivel III. Los efectos de subgrupo reflejan este hecho, ya que son de pequeña magnitud y tienen signo opuesto a los de grupo.

(c) En el nivel I de desagregación (3 regiones) se mantiene la influencia positiva de los cambios estructurales y el impacto negativo del

cambio tecnológico y la innovación, aunque de nuevo se reduce la influencia de ambos factores. Al moverse de mayor a menor nivel de desagregación, la relevancia de los efectos estructural e intensidad disminuye de forma modesta, lo que significa que el efecto de los movimientos entre los grupos consigue compensar parcialmente los efectos estructural e intensidad. Podríamos concluir que los resultados no serían especialmente sensibles a la variación en el nivel de desagregación.

Con el fin de obtener tendencias para los coeficientes de energía, también hemos aplicado el enfoque de la elasticidad de energía. Siguiendo este enfoque, nuestra estimación del coeficiente muestra que un incremento del 1% en la producción nacional conlleva un aumento del 0,1885% en el consumo de energía. Los efectos actividad e intensidad son los de mayor importancia cuantitativa en cuanto a su influencia sobre la variación en el consumo de energía. No obstante, el impacto negativo del efecto de la intensidad no compensa la influencia positiva de los efectos actividad y estructural.

Nuestras proyecciones de la demanda de energía para el período de 2009 a 2012 (bajo diversos escenarios, y asumiendo una tasa de crecimiento anual constante) anticipan: (a) un fuerte aumento del consumo de energía (cuando se incluye sólo el efecto actividad, o tanto el efecto actividad como estructural), y (b) un incremento moderado (si a los anteriores casos se añade el efecto intensidad).

Un mejor uso de las tecnologías, así como la capacidad de adaptación a técnicas más eficientes, el cambio tecnológico y la innovación son factores que, efectivamente, parecen haber contribuido a la reducción en el consumo agregado de energía de la UE-27 en el período de estudio. Sin embargo, la

inercia de la producción global y los cambios estructurales interregionales han sido suficientemente importantes para contrarrestar esta contribución y provocar finalmente el crecimiento en el consumo agregado de energía.

CAPÍTULO 6.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD AGREGADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA EN LOS AÑOS 80

6.1. Introducción

6.2. Exposición de la metodología

6.2.1. Versión multiplicativa del enfoque de la intensidad

6.2.2. Descomposición en series temporales

6.2.3. Descomposición multinivel

6.3. Análisis de la variación de la intensidad de energía eléctrica industrial en España en los años 80

6.3.1. Análisis gráfico

6.3.2. Descomposición en un nivel de desagregación (grupo)

6.3.2.1. Aplicación de técnicas basadas en índices tipo Divisia

6.3.2.2. Descomposición mediante MSN

6.3.3. Descomposición en dos niveles de desagregación (grupo y sector)

6.4. Conclusiones

Anexo II: Clasificación industrial y gráficos a nivel de sector

CAPÍTULO 6.

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD AGREGADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA EN LOS AÑOS 80

6.1. Introducción

En este capítulo llevaremos a cabo una descomposición de las variaciones en la intensidad agregada de la energía eléctrica en la industria española y analizaremos los factores que influyen en estas variaciones. Extenderemos resultados preliminares que publicamos en Fernández y Pérez (2003). Al igual que en otros estudios metodológicos (Boyd *et al.*, 1988, Howarth *et al.*, 1991) y empíricos (Jenne y Cattell, 1983, Li *et al.*, 1990, Gardner, 1993), nos centramos en el enfoque de la intensidad de energía.

En primer lugar analizaremos dos métodos paramétricos generales basados en índices tipo Divisia planteados por Liu *et al.* (1992), incluyendo seis casos específicos, desarrollados y refinados posteriormente por Ang (1995) y Ang y Choi (1997). A continuación, la metodología descrita se aplica, junto con el método MSN propuesto en el Capítulo 2, a la descomposición de las variaciones de la intensidad agregada de energía eléctrica en la industria española, considerando dos niveles de desagregación diferentes (grupo y sector industrial). Con el propósito de facilitar la interpretación de algunos resultados de nuestro estudio, incluiremos también un breve análisis del precio de la electricidad.

6.2. Exposición de la metodología

6.2.1. Versión multiplicativa del enfoque de la intensidad

La intensidad energética total se define como el cociente entre el consumo total de energía en la industria y la producción industrial. Siguiendo el enfoque de la intensidad energética (Ang, 1995), las variaciones en esta ratio se explican a partir de las contribuciones de dos factores: (a) los cambios tecnológicos y las variaciones en el uso de insumos de energía de alta calidad (efecto intensidad), y (b) los cambios en la estructura de la producción (efecto estructural).

Siguiendo a Ang y Lee (1994), basaremos nuestro análisis en el siguiente conjunto de variables, evaluadas en el instante t :

E_t : consumo de energía eléctrica de la industria.

$E_{j,t}$: consumo de electricidad del grupo industrial j .

Y_t : producción industrial total.

$Y_{j,t}$: producción del grupo industrial j .

$S_{j,t}$: participación del grupo j en la producción industrial ($S_{j,t} = Y_{j,t} / Y_t$).

I_t : intensidad de la energía eléctrica de la industria ($I_t = E_t / Y_t$).

$I_{j,t}$: intensidad de la electricidad del grupo industrial j ($I_{j,t} = E_{j,t} / Y_{j,t}$).

En términos de los datos sectoriales desagregados, se obtiene la siguiente descomposición:

$$E_t = \sum_{j=1}^k E_{j,t} = \sum_{j=1}^k Y_t (Y_{j,t} / Y_t) (E_{j,t} / Y_{j,t}) = \sum_{j=1}^k Y_t S_{j,t} I_{j,t} \quad (6.1)$$

siendo k el número de grupos que se consideran en la desagregación industrial. Considerando períodos infinitesimales, dividiendo por I_t e integrando ambos miembros de la ecuación con respecto al tiempo a lo largo del intervalo $[0, T]$ se obtiene:

$$\ln(I_T / I_0) = \int_0^T \sum_{j=1}^k \frac{S'_{j,t} I_{j,t}}{I_t} dt + \int_0^T \sum_{j=1}^k \frac{S_{j,t} I'_{j,t}}{I_t} dt \quad (6.2)$$

Donde $S'_{j,t}$ e $I'_{j,t}$ son, respectivamente, las derivadas primeras de $S_{j,t}$ e $I_{j,t}$ con respecto al tiempo.

Denotando por R_{tot} el efecto total ($R_{tot} = I_T / I_0$), y por R_{str} y R_{int} a los efectos estructural e intensidad, la ecuación (6.2) puede expresarse de las dos formas siguientes:

$$R_{tot} = e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k M_{j,t} (S'_{j,t} / S_{j,t}) dt \right)} e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k M_{j,t} (I'_{j,t} / I_{j,t}) dt \right)} = R_{str} R_{int} \quad (6.3)$$

donde $M_{j,t} = E_{j,t} / E_t$, y

$$R_{tot} = e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k (I_{j,t} S'_{j,t} / I_t) dt \right)} e^{\left(\int_0^T \sum_{j=1}^k (I'_{j,t} S_{j,t} / I_t) dt \right)} = R_{str} R_{int} \quad (6.4)$$

Asumiendo que las sendas integrales cumplen ciertas condiciones (Liu *et al.*, 1992), es posible transformar el problema de la integral curvilínea en un problema paramétrico, con sólo un número finito de parámetros libres (β_j y τ_j). Liu *et al.* (1992) proponen los siguientes métodos Divisia paramétricos:

I) Método Divisia paramétrico 1 (MDP1)

$$R_{str} = e^{\left[\sum_{j=1}^k [M_{j,0} + \beta_j (M_{j,T} - M_{j,0})] \ln \left(\frac{S_{j,T}}{S_{j,0}} \right) \right]} \quad (6.5)$$

$$R_{int} = e^{\left[\sum_{j=1}^k [M_{j,0} + \tau_j (M_{j,T} - M_{j,0})] \ln \left(\frac{I_{j,T}}{I_{j,0}} \right) \right]} \quad (6.6)$$

II) *Método Divisia paramétrico 2 (MDP2)*:

$$R_{str} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{I_{j,0}}{I_0} \right) + \beta_j \left(\frac{I_{j,T}}{I_T} - \frac{I_{j,0}}{I_0} \right) \right] (S_{j,T} - S_{j,0}) \right]} \quad (6.7)$$

$$R_{int} = e^{\left[\sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{S_{j,0}}{I_0} \right) + \tau_j \left(\frac{S_{j,T}}{I_T} - \frac{S_{j,0}}{I_0} \right) \right] (I_{j,T} - I_{j,0}) \right]} \quad (6.8)$$

siendo $0 \leq \beta_j \leq 1$ y $0 \leq \tau_j \leq 1$ en ambos métodos.

Debido a la imposibilidad de obtener observaciones en tiempo continuo, el producto de las ecuaciones (6.5) y (6.6) (ó (6.7) y (6.8)) generalmente diferirá del valor exacto de R_{tot} .¹ Esto obliga a incorporar una componente residual, que denominaremos R_{rsd} , lo que da lugar a la siguiente expresión final para la descomposición de los cambios en la intensidad energética global:

$$R_{tot} = R_{str} R_{int} R_{rsd} \quad (6.9)$$

Los valores de los parámetros (β_j y τ_j) en las expresiones anteriores funcionan como ponderaciones de las variables correspondientes en los períodos 0 y T . Estos coeficientes se pueden asignar de diferentes maneras, lo que dará lugar a otros tantos métodos específicos de descomposición. En este capítulo haremos uso de varios de estos enfoques particulares, que aplicaremos a la descomposición multiplicativa de estructuras generales de los tipos MDP1 y MDP2. Siguiendo la notación propuesta por Ang y Lee (1994) tenemos:

1) *Método Divisia paramétrico 1 basado en Laspeyres (LAS-MDP1)*:² es un caso particular del MDP1, con $\beta_j = \tau_j = 0$.

¹ La excepción es el método AVE-MDP2 en su versión aditiva, que da lugar a una descomposición exacta.

² Como mencionamos en el Capítulo 1, este método se denomina "basado en Laspeyres" porque a todas las ponderaciones en las ecuaciones (6.5) a (6.8) se les asignan valores del período inicial.

2) *Método Divisia paramétrico 1 de promedio simple (AVE-MDP1)*:³ corresponde al MDP1 con $\beta_j = \tau_j = 0,5$. Fue considerado por primera vez por Boyd *et al.* (1987).

3) *Método Divisia paramétrico 2 basado en Laspeyres (LAS-MDP2)*: se trata de un caso particular del MDP2 en el que $\beta_j = \tau_j = 0$. Fue propuesto por Howarth *et al.* (1992) y Jenne y Cattell (1983).

4) *Método Divisia paramétrico 2 de promedio simple (AVE-MDP2)*: es un caso especial del MDP2 con $\beta_j = \tau_j = 0,5$. Equivale a la propuesta de Reitler *et al.* (1987).

5) *Método Divisia paramétrico con ponderación adaptable (AWT-MDP)*. La denominación de "adaptable" proviene de los valores de los parámetros, ya que no son fijados arbitrariamente por el analista, sino que se obtienen al igualar la ecuación (6.5) con la (6.7), y la (6.6) con la (6.8). De este modo, los resultados de la descomposición vienen determinados por los niveles de consumo de electricidad y producción industrial en los años de referencia, y son los mismos con independencia de que se use MDP1 o MDP2. El AWT-MDP fue introducido por Liu *et al.* (1992).

Otro método particular, en este caso no convencional, es el *método Divisia refinado* (LMDI), ya descrito en capítulos anteriores. Como sabemos, es un caso particular, no paramétrico, con coeficientes de tipo media logarítmica. La importancia de este método estriba en que los pesos van modificándose a lo largo del tiempo y no aparece desviación residual respecto del valor objetivo. Desde la perspectiva de la demanda energética, y basándose en Sato (1976) y Törnquist (1985), Ang y Choi (1997) proponen la siguiente función de ponderaciones:

³ El término "promedio simple" indica que se asigna el mismo peso (0,5) a los dos períodos, 0 y T.

$$L(M_{j,0}, M_{j,T}) = \frac{(M_{j,T} - M_{j,0})}{\ln(M_{j,T} / M_{j,0})} \quad (6.10)$$

Como vimos en el Capítulo 1, para lograr que la suma de las ponderaciones sea igual a la unidad se introduce la siguiente normalización:

$$w_j^* = \frac{L(M_{j,0}, M_{j,T})}{\sum_{j=1}^k L(M_{j,0}, M_{j,T})} \quad (6.11)$$

donde w_j^* es la ponderación normalizada del grupo industrial j ($j = 1, \dots, k$).

6.2.2. Descomposición en series temporales

Sean $(C_{tot})_{T,0}$ el cambio acumulado de la intensidad energética global (efecto total), $(C_{str})_{T,0}$, el efecto estructural acumulado, $(C_{int})_{T,0}$ el efecto intensidad acumulado, y $(C_{rsd})_{T,0}$ la componente residual acumulada, referidos todos ellos al período de 0 a T . De forma análoga a lo visto en el Capítulo 5, los efectos acumulados (en el caso multiplicativo) se pueden factorizar en forma de cambios interanuales:

$$(C_{tot})_{0,T} = (R_{tot})_{0,1} (R_{tot})_{1,2} \dots (R_{tot})_{T-1,T} \quad (6.12)$$

$$(C_{str})_{0,T} = (R_{str})_{0,1} (R_{str})_{1,2} \dots (R_{str})_{T-1,T} \quad (6.13)$$

$$(C_{int})_{0,T} = (R_{int})_{0,1} (R_{int})_{1,2} \dots (R_{int})_{T-1,T} \quad (6.14)$$

$$(C_{rsd})_{0,T} = (R_{rsd})_{0,1} (R_{rsd})_{1,2} \dots (R_{rsd})_{T-1,T} \quad (6.15)$$

6.2.3. Descomposición multinivel

En general, el objetivo principal de los estudios de descomposición es estimar el impacto del cambio estructural sobre la producción. No obstante, el cambio estructural viene influido por la agregación industrial considerada, de modo que

los resultados del estudio dependerán del nivel de desagregación al que realicemos la descomposición.

Siguiendo este planteamiento, abordamos la descomposición en dos niveles (grupo y sector industrial). Partiendo de la metodología expuesta en el capítulo anterior, y considerando en este caso $z=2$, la descomposición multiplicativa en cada nivel se puede expresar del modo siguiente:

$$R_{tot} = R1_{str} R1_{int} R1_{rsd} \quad (6.16)$$

$$R_{tot} = R2_{str} R2_{int} R2_{rsd} \quad (6.17)$$

donde $R1_i$ y $R2_i$ ($i = str, int$) denotan los efectos estimados de cada factor, y $R1_{rsd}$ y $R2_{rsd}$ representan las componentes residuales en los niveles 1 (grupo industrial) y 2 (sector industrial), respectivamente.

La ecuación (6.17) puede expresarse de la siguiente manera:

$$R_{tot} = (R1_{str} R12_{str})(R1_{int} R12_{int}) R2_{rsd} \quad (6.18)$$

donde $R12_i$ y $R2_{rsd}$ son, respectivamente, el efecto estimado del factor i al pasar del primer al segundo nivel de desagregación y el término residual en el nivel más fino.

Considerando k grupos industriales en el nivel 1 y m sectores en el nivel 2, estos efectos se pueden expresar como sigue:

$$R12_{str} = e^{\left[\sum_{r=1}^m [M_{r,0} + \beta_r (M_{r,T} - M_{r,0})] \ln \left(\frac{S12_{r,T}}{S12_{r,0}} \right) \right]} \quad (6.19)$$

$$R12_{int} = e^{\left[\sum_{r=1}^m [M_{r,0} + \tau_r (M_{r,T} - M_{r,0})] \ln \left(\frac{I12_{r,T}}{I12_{r,0}} \right) \right]} \quad (6.20)$$

donde $S12_{r,T} = S2_{r,T}/S1_{j,T}$ e $I12_{r,T} = I2_{r,T}/I1_{j,T}$ son los efectos estructural e

intensidad al pasar del nivel 1 (grupo) al 2 (sector). $S1_{j,T}$ e $I1_{j,T}$ denotan, respectivamente, la cuota de producción y la intensidad de energía del grupo j en el nivel 1, al cual pertenece el sector r dentro del nivel 2 en el período T . $S2_{r,T}$ e $I2_{r,T}$ representan, respectivamente, la cuota de producción y la intensidad de energía de la región r en el nivel 2.

6.3. Análisis de la variación de la intensidad de energía eléctrica industrial en España en los años 80

A continuación llevaremos a cabo una descomposición de la variación en la intensidad de energía eléctrica en la industria española durante el período 1979-1992. Las series temporales de producción industrial y consumo industrial de electricidad en España se han obtenido del INE (1998).

Siguiendo la *Clasificación Nacional de Actividades Económicas* (CNAE), se consideran cuatro grupos industriales en el desglose de primer nivel, y veintiocho sectores en el segundo nivel.⁴ Concretamente, en el primer nivel definimos:

- *Grupo 1.* Energía y agua.
- *Grupo 2.* Extracción y transformación de minerales no energéticos y productos derivados. Industria química.
- *Grupo 3.* Industrias transformadoras de los metales. Mecánica de precisión.
- *Grupo 4.* Otras industrias manufactureras.

El período de análisis se extiende de 1979 a 1992 y fue seleccionado teniendo en cuenta: (a) el interés de analizar el cambio estructural en España durante la década de 1980, ya que es precisamente en esta época, y tras la Transición, cuando España experimenta grandes cambios políticos y económicos (entrada

⁴ Véase la clasificación industrial completa en el Anexo II al final de este capítulo.

en la OTAN, reconversión industrial, acceso a la Comunidad Económica Europea, entre otros) y (b) la necesidad de disponer de información homogénea.⁵

6.3.1. Análisis gráfico

Antes de aplicar la metodología expuesta más arriba resulta útil un análisis gráfico, a fin de obtener una idea de los patrones que han seguido las series temporales de consumo de energía eléctrica, producción industrial e intensidad de electricidad entre 1979 y 1992.

En primer lugar se observa una considerable reducción en la intensidad total de energía eléctrica durante todo el período (véase la Figura 6.1), aunque algunos grupos tales como el 1 (Energía y agua) y el 2 (Extracción y transformación de minerales no energéticos y productos derivados. Industria química) experimentan un ligero aumento en los años 1986 y 1987. Precisamente en 1986 España pasa a formar parte de la Comunidad Económica Europea. Este hecho podría explicar algunos de los cambios en los patrones de comportamiento de las series. A partir de estos años, la tendencia hacia la reducción de la intensidad de la electricidad se ha hecho menos acentuada.

⁵ La Encuesta Industrial, elaborada por el INE, dejó de publicarse en 1992.

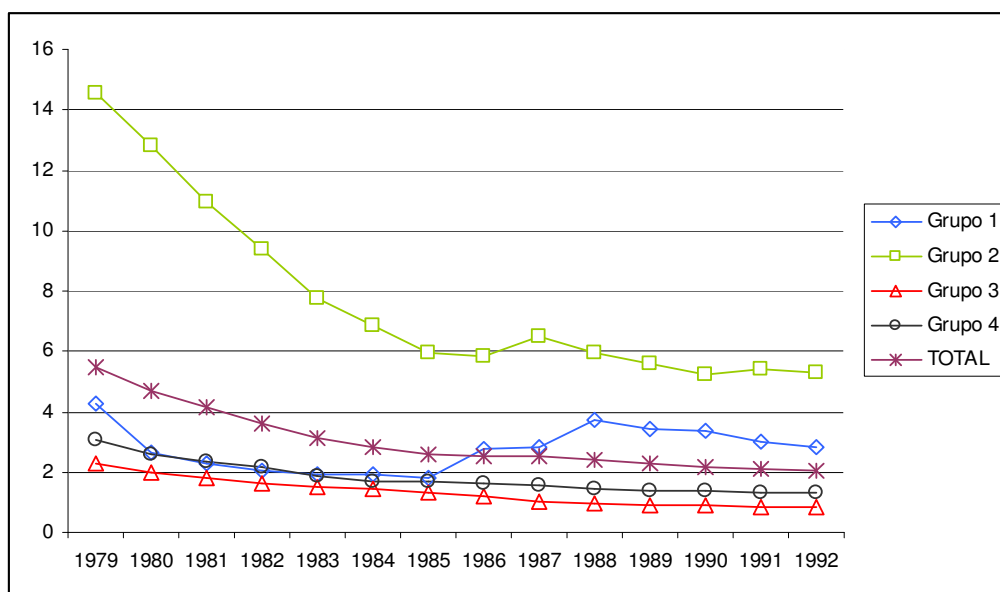


Figura 6.1. Intensidad de energía eléctrica (en miles de KWh. por millones de pts) de los distintos grupos industriales en España (1979-1992).

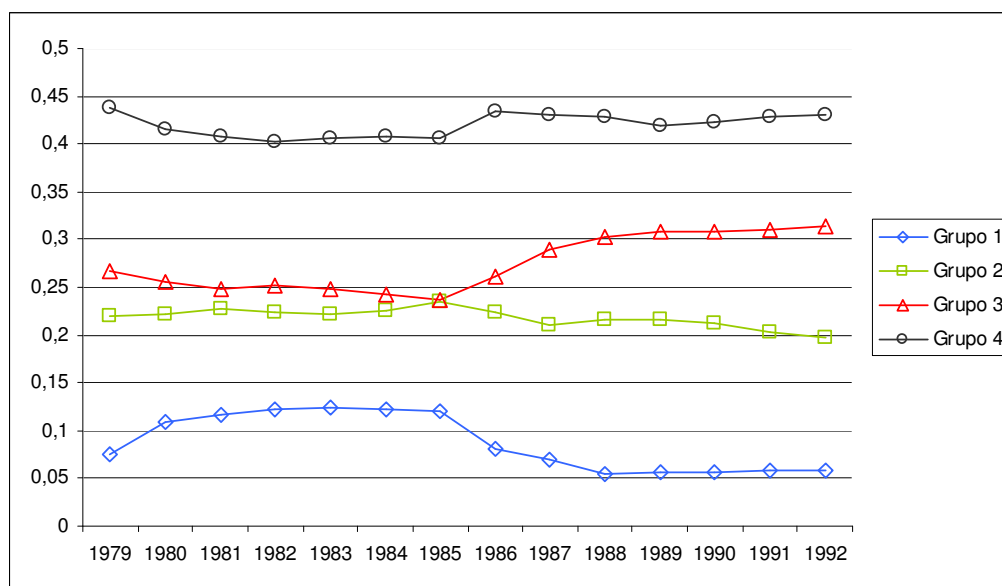


Figura 6.2. Participación de los distintos grupos en la producción industrial española (1979-1992).

Atendiendo a las pautas de la producción (véase la Figura 6.2), el grupo 2 ha disminuido ligeramente su cuota de producción y reducido considerablemente la

intensidad de electricidad (Figura 6.1). El grupo 3 (Industrias transformadoras de los metales. Mecánica de precisión) ha reducido su intensidad de electricidad a la vez que ha conseguido aumentar su cuota de producción. Estos hechos muestran la importancia del efecto intensidad. Por otro lado, de 1979 a 1992, en conjunto, el grupo 1 ha reducido ligeramente su intensidad y disminuido su cuota de producción, lo cual también pondría de manifiesto la relevancia del efecto estructural. En resumen, el análisis preliminar sugiere la influencia de ambos efectos, intensidad y estructural, en la reducción de la intensidad agregada de electricidad en la industria española durante el período 1979-1992. No obstante, como el grupo 2 es el mayor consumidor de este tipo de energía (véase la Figura 6.3), su peso será mayor y, por tanto, el efecto intensidad predominaría sobre el efecto estructural. En cualquier caso, se requiere un análisis de descomposición más riguroso antes de extraer conclusiones.

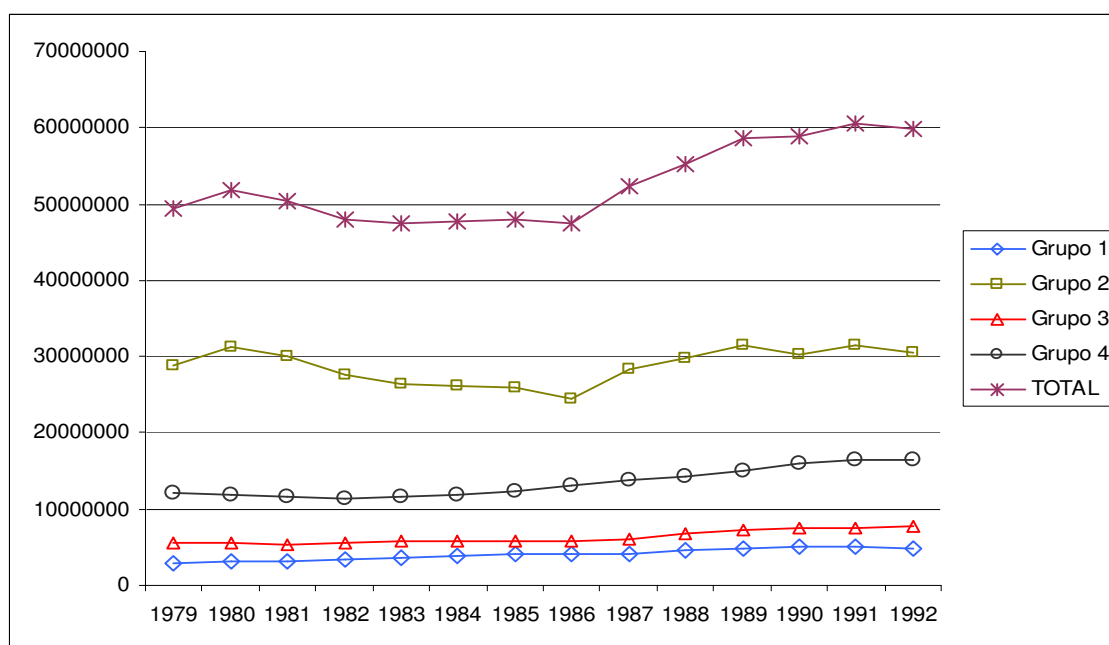


Figura 6.3. Consumo de energía eléctrica, en miles de KWh., de los grupos industriales en España (1979-1992).

Hasta aquí el análisis gráfico se ha realizado a un nivel de desagregación de grupo. De modo análogo se podría repetir un estudio similar al nivel de

desagregación de sector industrial. Sin embargo, dada la complejidad de los gráficos como consecuencia del número de sectores industriales (28) y la similitud de ambos procedimientos, omitiremos los detalles de este análisis por brevedad. Las figuras correspondientes a cada nivel de sector industrial se encuentran recogidas en el Anexo II al final del capítulo (Figuras 6A.1 a 6A.3).

6.3.2. Descomposición en un nivel de desagregación (grupo)

En esta subsección llevamos a cabo una descomposición multiplicativa de los cambios en las series temporales de la intensidad global de la electricidad en la industria española para el período 1979-1992.

6.3.2.1. Aplicación de técnicas basadas en índices tipo Divisia

Con el fin de comparar y detectar posibles diferencias en los resultados según el método utilizado, hemos aplicado simultáneamente varios métodos específicos basados en índices tipo Divisia: LAS-MDP1, AVE-MDP1, LAS-MDP2, AVE-MDP2, AWT-MDP y LMDI. Las Tablas 6.1 a 6.3 incluyen las ponderaciones correspondientes a cada método particular. La Tabla 6.4 recoge los resultados finales de las descomposiciones.

Tabla 6.1. Valores de β_j para cada grupo industrial. Descomposición multiplicativa en series temporales para todo el período. Método AWT-MDP.

β_j	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1980	0,5521	0,4928	0,5021	0,5079
1981	0,5002	0,5062	0,4956	0,4944
1982	0,4868	0,5064	0,4875	0,4896
1983	0,4720	0,5084	0,4803	0,4953
1984	0,4810	0,5060	0,4991	0,4987
1985	0,4951	0,5117	0,4976	0,4888

1986	0,4257	0,5020	0,5094	0,4952
1987	0,5032	0,4773	0,5298	0,5085
1988	0,4385	0,5064	0,5004	0,5037
1989	0,5059	0,5000	0,4996	0,4986
1990	0,4908	0,5088	0,4914	0,4868
1991	0,5194	0,4890	0,5055	0,5010
1992	0,5067	0,4987	0,4899	0,4977

Tabla 6.2. Valores de τ_j para cada grupo industrial. Descomposición multiplicativa en series temporales para todo el período. Método AWT-MDP.

τ_j	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1980	0,4117	0,4711	0,4845	0,4880
1981	0,4620	0,4762	0,4843	0,4815
1982	0,4647	0,4817	0,4694	0,4775
1983	0,4610	0,4786	0,4699	0,4697
1984	0,4790	0,4828	0,4904	0,4832
1985	0,4896	0,4811	0,4908	0,4838
1986	0,5612	0,5077	0,4764	0,4795
1987	0,5320	0,5042	0,4852	0,5029
1988	0,5253	0,4875	0,4824	0,4931
1989	0,4867	0,4905	0,4856	0,4952
1990	0,4843	0,4986	0,4906	0,4866
1991	0,4977	0,5029	0,4958	0,4930
1992	0,4939	0,5014	0,4893	0,4932

Tabla 6.3. Pesos normalizados (w_j^*) para cada grupo industrial. Descomposición multiplicativa en series temporales para todo el período. Método LMDI.

w_j^*	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1979	1	1	1	1
1980	0,0594	0,5937	0,1098	0,2369
1981	0,0620	0,5999	0,1076	0,2303
1982	0,0662	0,5876	0,1109	0,2351
1983	0,0731	0,5664	0,1185	0,2418
1984	0,0806	0,5515	0,1218	0,2459
1985	0,0839	0,5431	0,1206	0,2522
1986	0,0853	0,5268	0,1220	0,2657
1987	0,0818	0,5287	0,1207	0,2687
1988	0,0805	0,5393	0,1191	0,2609
1989	0,0837	0,5371	0,1215	0,2575
1990	0,0857	0,5256	0,1245	0,2640
1991	0,0852	0,5169	0,1254	0,2723
1992	0,0818	0,5159	0,1274	0,2747

Tabla 6.4. Resultados de la descomposición multiplicativa en series temporales del cambio en la intensidad agregada de la electricidad en la industria española a nivel de grupo entre 1979 y 1992. Base 1979.

Método	$C1_{str}$	$C1_{int}$	$C1_{rsd}$	C_{tot}
LAS-MDP1	0,9326	0,3953	1,0084	0,3718
AVE-MDP1	0,9335	0,3983	0,9999	0,3718
LAS-MDP2	0,9517	0,4960	0,9119	0,3718
AVE-MDP2	0,9437	0,3972	1,0035	0,3718
AWT-MDP	0,9336	0,3983	0,9996	0,3718
LMDI	0,9334	0,3983	1	0,3718

Al analizar los resultados anteriores no se aprecian diferencias importantes según el método específico aplicado. Como era de esperar, los métodos basados en Laspeyres originan la mayor desviación residual (Ang y Lee, 1994). En el otro extremo, el método LMDI proporciona una descomposición exacta. Los resultados obtenidos a través de los métodos basados en MDP1, incluyendo el de pesos adaptativos, también ofrecen valoraciones similares al método LMDI. Posiblemente esto sea debido a que la variable a descomponer y los factores predefinidos se aproximan a una forma logarítmica (véanse las Figuras 6.1 a 6.3).

En primer lugar, y con independencia del método aplicado, la intensidad de la electricidad global ha sufrido un gran descenso, del 62,8%, en el período analizado. Tanto el efecto estructural como el intensidad han sido negativos en el primer nivel de desagregación (nivel de grupo), es decir, ambos han contribuido a esta reducción. Sin embargo, la contribución del efecto intensidad -entre 50,4% y 60,5% dependiendo del método aplicado- ha sido mayor que la del efecto estructural⁶, entre 4,8% y 6,7% según la técnica considerada.

El efecto estructural es una consecuencia del crecimiento económico, de los cambios en los patrones del comercio y de la preferencia creciente del consumidor por servicios y productos de alto valor añadido y baja intensidad en materiales, así como por los materiales mejorados. Otro factor que puede influir de manera indirecta sobre el efecto estructural es el precio de la energía, ya que puede afectar a la posición competitiva de los distintos grupos o sectores industriales en función de su intensidad energética.

Por su parte, el efecto intensidad está relacionado con el cambio tecnológico, la innovación, la sustitución entre capital, trabajo y energía, así como con el uso

⁶ Una contribución reducida del efecto estructural no implica necesariamente la ausencia de cambio estructural en el período considerado. Este efecto podría ser de pequeña magnitud cuando, aun existiendo cambios sustanciales en la producción, estos resultasen compensados entre los sectores pertenecientes al mismo grupo industrial.

de energías de mejor calidad. De nuevo, el precio de la energía es un factor a tener en cuenta, ya que estimula la inversión en nuevas tecnologías, la mejor adaptación a técnicas ya disponibles, la búsqueda de alternativas más eficientes energéticamente, así como la I+D+I que permitan aprovechar precios más ventajosos y posibilitar mayores márgenes (Fernández y Pérez, 2000). Los resultados de la Tabla 6.4 permiten apreciar (independientemente del método aplicado) la relevancia del efecto intensidad en la reducción de la intensidad agregada de electricidad.

En la Tabla 6.5 y la Figura 6.4 se recogen, respectivamente, los resultados interanuales y acumulados que proporciona el método LMDI.⁷

Tabla 6.5. Resultados de la descomposición multiplicativa de la variación en la intensidad agregada de electricidad en la industria española (1979-1992) a través del método LMDI. Efectos interanuales.

Años	$R1_{str}$	$R1_{int}$	R_{tot}
1979	1	1	1
1980	1,00591	0,85066	0,85569
1981	1,01237	0,87339	0,88419
1982	0,99478	0,87777	0,87319
1983	0,99584	0,85636	0,85279
1984	1,00851	0,90604	0,91375
1985	1,01750	0,90685	0,92272
1986	0,96796	1,00609	0,97385
1987	0,96583	1,02382	0,98883
1988	0,99724	0,94984	0,94721
1989	1,00062	0,94661	0,94719
1990	0,99597	0,96036	0,95648
1991	0,98213	0,9934	0,97565
1992	0,98815	0,98235	0,97071

⁷ Nuestra elección del mismo en este caso se basa su ausencia de desviación residual.

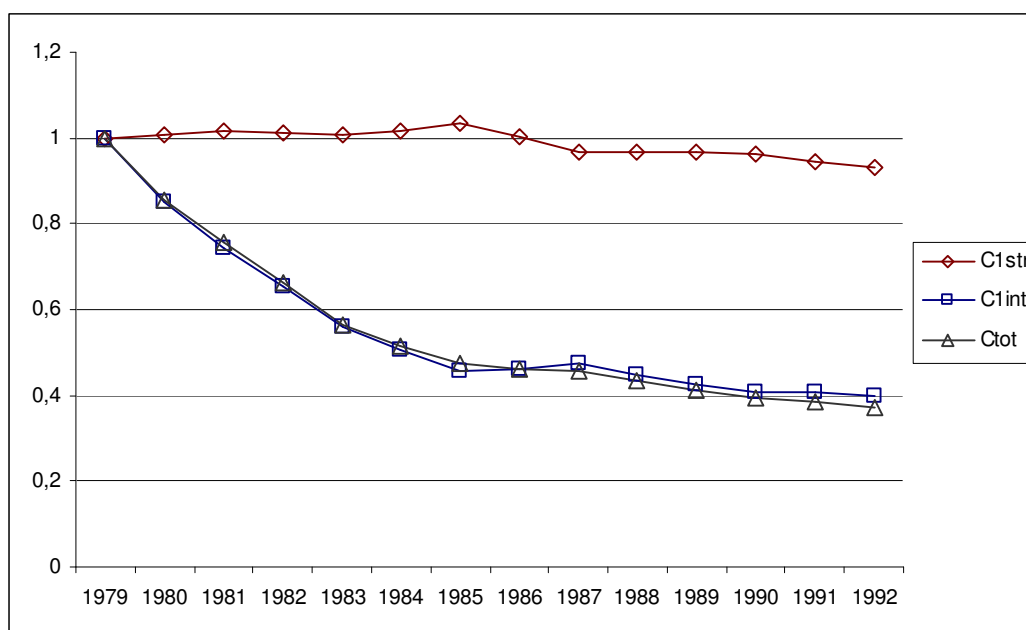


Figura 6.4. Descomposición multiplicativa (efectos acumulados) de la variación de la intensidad agregada de la electricidad en la industria española (1979-1992). Método LMDI, base 1979.

Podemos observar tres fases diferenciadas en la evolución de la intensidad agregada de la electricidad. En una primera fase, de 1979 a 1985, la misma se redujo significativamente. Esta reducción parece ser consecuencia del desarrollo técnico y el uso de energías de mejor calidad, es decir, del efecto intensidad. El efecto estructural mantiene una influencia positiva, mostrando una relación inversa con la intensidad agregada de energía eléctrica.

En la segunda fase, de 1985 a 1987, la intensidad agregada de la electricidad se reduce ligeramente, y esto se debe al efecto estructural. Bajo el gobierno socialista de esos años se llevó a cabo una importante reconversión industrial⁸ que pudo contribuir a la magnitud de dicho efecto. Mientras que el aumento en la producción de los grupos industriales menos intensivos en electricidad (como el grupo 3) con respecto a aquéllos más intensivos tiende a disminuir la ratio

⁸ En 1986, España ingresa en la Unión Europea (entonces Comunidad Económica Europea). Este hecho cambió el entorno económico y coincidió con una importante reestructuración industrial a nivel nacional.

energía/producción, el efecto intensidad claramente desequilibra esta tendencia, empujando hacia una mayor intensidad agregada de la electricidad. Este resultado puede desprenderse del hecho de que, durante este período, España experimenta una desaceleración en el crecimiento económico que pudo suponer una menor capacidad para reinvertir en I+D o en nuevas tecnologías.

Por último, entre 1987 y 1992 tanto el efecto estructural como el intensidad se mueven en la misma dirección, contribuyendo ambos a la reducción de la intensidad agregada de la electricidad.

Adicionalmente, con el propósito de facilitar el análisis, incluimos el precio de la electricidad (véase la Figura 6.5).

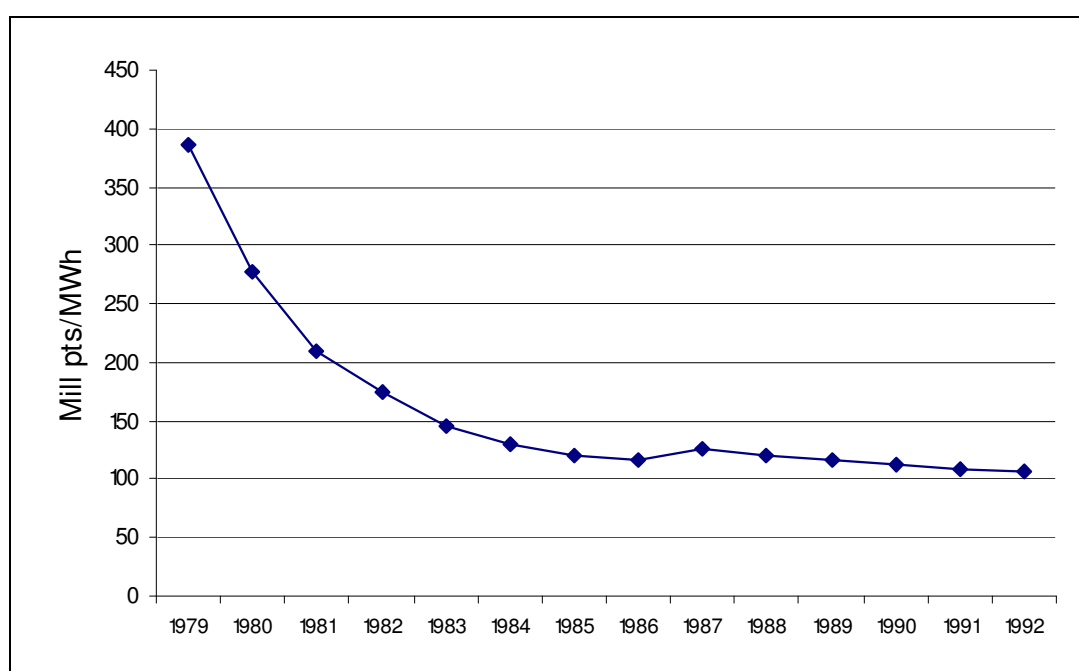


Figura 6.5. Evolución del precio de la electricidad en la industria española (en millones de pts./MWh.), período 1979-1992.

El precio de la electricidad experimentó una reducción que se prolongó hasta 1986, siendo especialmente importante la caída en los primeros años del

estudio (Figura 6.5). Es razonable suponer que esta reducción pudo inducir de manera indirecta cierto grado de reorganización industrial, al alterar la posición competitiva de los grupos industriales, aumentando la cuota de producción de los grupos relativamente intensivos en electricidad (*e.g.*, los grupos 1 y 2). La Figura 6.2 indica que, en efecto, esto es lo que sucedió. El cambio estructural parece haber influido de manera directa sobre el incremento de la intensidad agregada de la electricidad (coincidiendo con las pautas que se observan en la Figura 6.4). Sin embargo, pese a esta influencia del efecto estructural, la intensidad agregada de la electricidad se ha visto notablemente reducida (Figuras 6.1 y 6.4, y Tabla 6.4). En este sentido, la caída en el precio de la electricidad que muestra la Figura 6.5 bien pudo permitir la obtención de un margen extraordinario de beneficios, que pudo ser aprovechado e invertido en innovación, en energías de mejor calidad o en cambio tecnológico. Por otra parte, el análisis del precio de energías alternativas evidencia notables descensos (*e.g.*, el precio del petróleo experimenta una importante caída). En términos relativos, el precio de la electricidad se habría encarecido respecto a estas energías alternativas, lo que también habría podido favorecer una mayor adaptación a las técnicas existentes o una mayor inversión en la búsqueda de tecnologías más eficientes. De cualquier modo, el efecto intensidad ha contribuido en la reducción de la intensidad agregada de la electricidad, y la magnitud de su impacto ha superado incluso a la del efecto estructural (Figuras 6.1 y 6.4, y Tabla 6.4).

Entre 1986 y 1987 se produce un incremento transitorio en el precio de la electricidad que coincide con un ligero repunte, aislado y sin trascendencia, en la intensidad agregada de energía eléctrica (véanse las Figuras 6.5 y 6.1). De nuevo, el precio de la electricidad (Figura 6.5) parece seguir el mismo patrón de comportamiento que los efectos total e intensidad y el opuesto al efecto estructural (Figura 6.4). En 1987 se produce una alteración en la evolución de las series y podríamos señalar quizá un punto de ruptura. En particular, el efecto estructural parece modificar su patrón de comportamiento.

A partir de 1987 el precio de la electricidad tiende nuevamente a reducirse, pero no a tasas tan fuertes como en la primera fase. Esta reducción no parece abaratar suficientemente los costes de producción como para provocar cambios estructurales en favor de los grupos intensivos en energía eléctrica. Por el contrario, probablemente debido a otros factores, se reduce la participación en la producción de todos los grupos excepto el 3. Puesto que la intensidad agregada de la electricidad continúa descendiendo, parece razonable conjeturar que los beneficios se hayan seguido reinvertiendo en I+D, y que hayan seguido aplicándose nuevas técnicas que mejoren la eficiencia energética. Ambos efectos, estructural e intensidad, son ahora negativos, favoreciendo la eficiencia de la electricidad.

Globalmente, el precio de la electricidad disminuyó en el período 1979-1992. Esta reducción debió favorecer la posición competitiva de los grupos más intensivos en energía eléctrica con relación a los menos intensivos. Sin embargo, esto no aparece reflejado en la Figura 6.2. Agrupaciones intensivas, tales como la 1 o la 2, no incrementan su participación en la producción industrial, mientras que el grupo 3 (precisamente el de menor intensidad) sí lo hace. Por tanto, considerando el período 1979-1992, el efecto estructural contribuyó a reducir la intensidad agregada de la electricidad.

Por otra parte, la notable caída en el precio de la energía eléctrica ha coincidido con una importante reducción en la intensidad agregada de la electricidad. La reducción de precios de este tipo de energía permitió reducir los costes de producción e incrementar los márgenes de beneficios, propiciando la reinversión de los mismos en tecnologías y la búsqueda de energías más eficientes. Atendiendo a este análisis, el efecto intensidad también contribuyó, y de manera muy notable, a la reducción de la intensidad agregada de la electricidad.

6.3.2.2. Descomposición mediante MSN

Otra técnica no paramétrica que también ofrece una descomposición exacta es el método que hemos denominado MSN (basado en la reconstrucción de trayectorias a través de splines naturales), estudiado en el Capítulo 2.⁹ A continuación incluimos los resultados de su aplicación a nuestro estudio, considerando un nivel de desagregación de grupo industrial. Nuestro objetivo es descomponer en dos factores (estructural e intensidad) la variación de la intensidad de energía eléctrica.

En las Figuras 6.6 y 6.7 se recogen, respectivamente, las reconstrucciones de las trayectorias de los consumos y las producciones acumulados para cada uno de los grupos industriales.

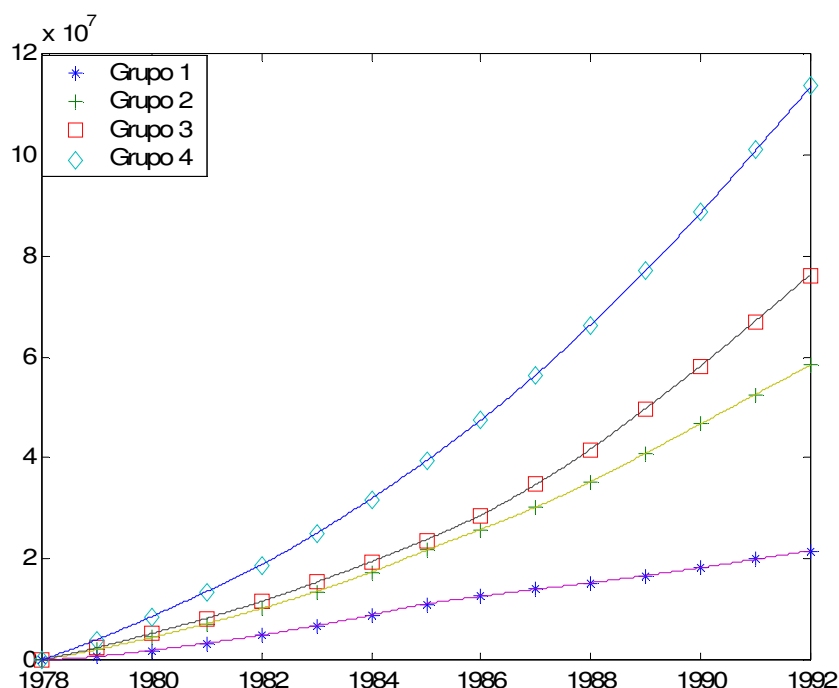


Figura 6.6. Trayectorias del consumo acumulado de energía eléctrica, en MWh. (reconstrucciones MSN).

⁹ En el CD adjunto se recoge un conjunto de algoritmos Matlab que hemos diseñado para la aplicación de esta técnica.

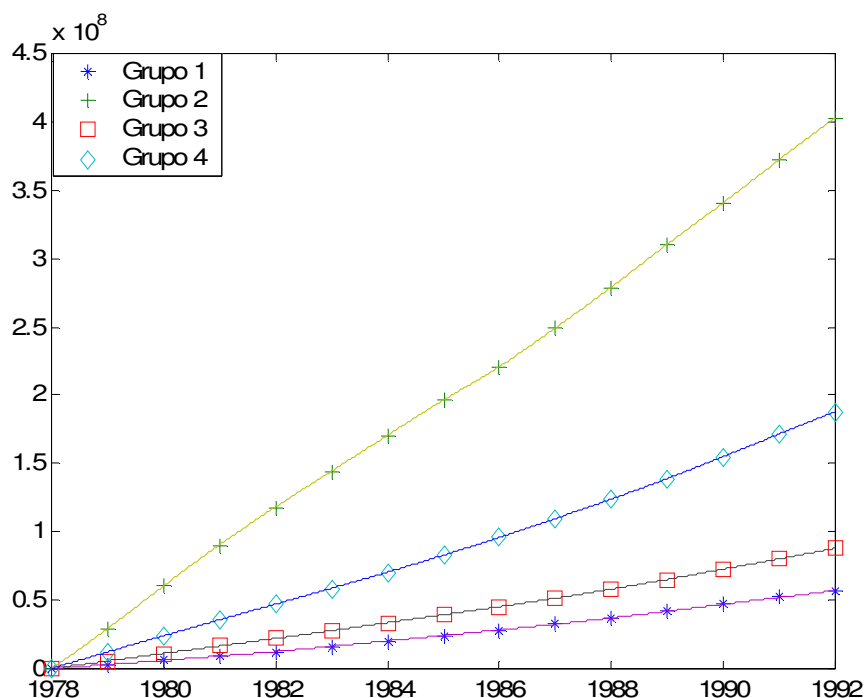


Figura 6.7. Trayectorias de la producción acumulada de cada grupo industrial, en millones de pesetas (reconstrucciones MSN).

Las funciones de producción acumulada parecen seguir comportamientos diferentes en función del grupo y periodo temporal de estudio. Hasta la mitad de los años 80, la producción se acumula en todos los grupos (especialmente en el 4) a un menor ritmo que en la segunda mitad del período. En esta segunda fase todos los grupos, excepto el 1, incrementan fuertemente su producción.

Las Figuras 6.8 a 6.10 recogen, respectivamente, la evolución temporal de los efectos intensidad, estructural y total asociados a la descomposición multiplicativa de la variación de la intensidad agregada de energía eléctrica en la industria española. Han sido obtenidos a partir de la reconstrucción de trayectorias mediante splines naturales, integrando numéricamente desde 0 a t , $0 \leq t \leq 1$, donde 0 representa el inicio de 1979 y 1 el final de 1992.

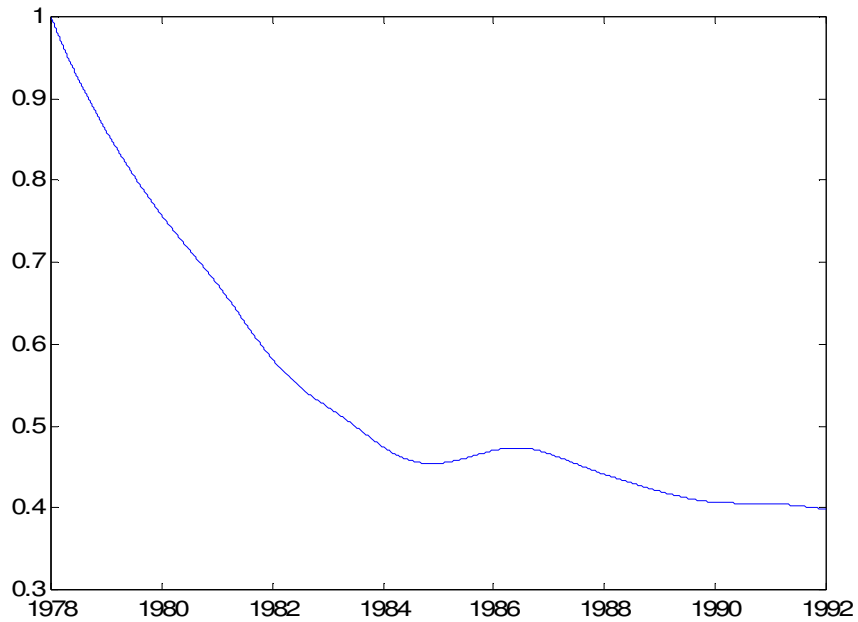


Figura 6.8. Evolución del efecto intensidad acumulado ($C1_{int}$) asociado a la descomposición multiplicativa (mediante MSN) de la variación de la intensidad agregada de la electricidad.

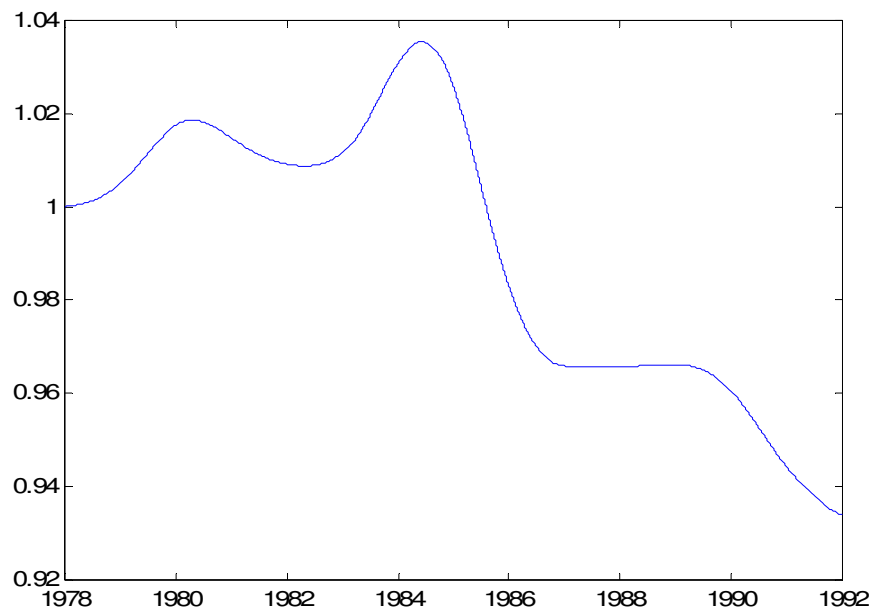


Figura 6.9. Evolución del efecto estructural acumulado ($C1_{str}$) asociado a la descomposición multiplicativa (mediante MSN) de la variación de la intensidad agregada de la electricidad.

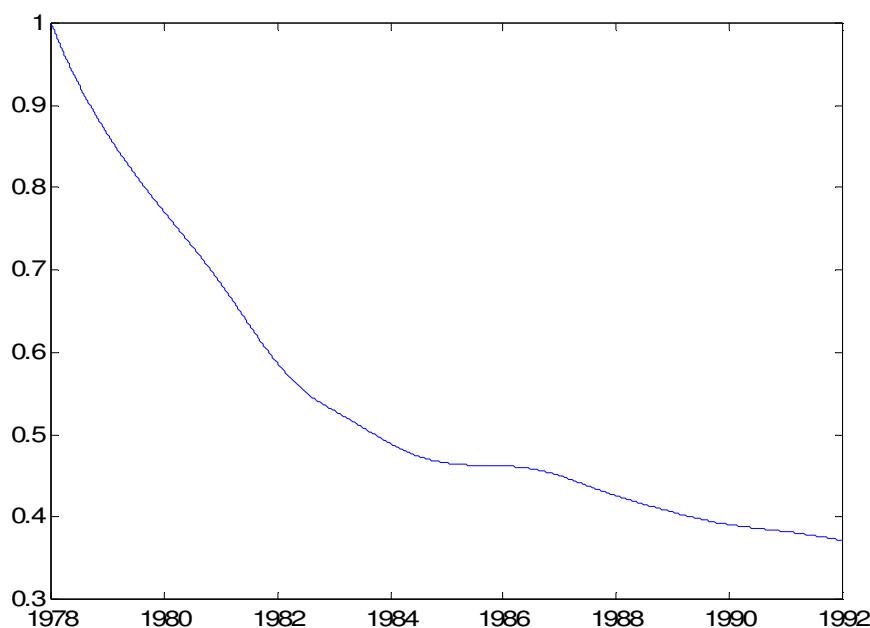


Figura 6.10. Evolución del efecto total acumulado (C_{tot}) asociado a la descomposición multiplicativa (mediante MSN) de la variación de la intensidad agregada de la electricidad.

Como era de esperar, en el análisis global del período 1978-1992 se observa que ambos efectos – intensidad y estructural – son negativos y contribuyen a reducir la intensidad agregada de la electricidad en la industria española. El efecto intensidad contribuye en mayor medida que el efecto estructural. Incluso podemos observar cómo las Figuras 6.8 y 6.10 siguen comportamientos muy similares, mostrando una vez más la importancia que factores como la innovación, el cambio técnico, la adaptación a nuevas tecnologías o el uso de energías de mayor calidad han tenido sobre la reducción de la intensidad agregada de la electricidad en la industria española.

Asimismo, también podemos apreciar varias fases al estudiar conjuntamente las Figuras 6.8 y 6.10:

En una primera fase, que abarca la primera mitad del periodo analizado, la intensidad agregada de la electricidad experimenta un fuerte descenso debido al efecto intensidad. En esta fase, el efecto estructural resulta positivo y tiende a amortiguar dicho descenso.

En la segunda fase, que coincide con un breve intervalo central en el período de estudio, la intensidad agregada de la electricidad se incrementa levemente. En este caso, se produce un fuerte efecto estructural (que contribuye a reducir la intensidad agregada, mejorando la eficiencia de electricidad), el cual se ve contrarrestado por el impacto positivo del efecto intensidad.

En la última fase, que se corresponde aproximadamente con la segunda mitad del período de análisis, la intensidad agregada de la electricidad se reduce nuevamente, aunque de manera menos pronunciada que en la primera fase. En esta ocasión, ambos efectos resultan negativos y contribuyen a mejorar la eficiencia de energía eléctrica en la industria española.

Se puede observar que las Figuras 6.8-6.10 son prácticamente iguales a la Figura 6.4, obtenida mediante la aplicación de los métodos basados en índices tipo Divisia comentados anteriormente. Los efectos estimados mediante MSN se recogen en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Resultados de la descomposición multiplicativa en series temporales mediante MSN del cambio en la intensidad agregada de la electricidad de la industria española a nivel de grupo entre 1979 y 1992. Base 1979.

Método	$C1_{str}$	$C1_{int}$	$C1_{rsd}$	C_{tot}
MSN	0,9340	0,3981	1	0,3718

Al comparar los resultados de las Tablas 6.4 y 6.6 se observa la notable

proximidad entre los resultados del MSN y los de las técnicas convencionales (en particular, el método LMDI) que, desde esta perspectiva, pueden verse como formas simplificadas de las técnicas más sofisticadas analizadas en el Capítulo 2. Cabe conjeturar que la utilización de series temporales más largas daría lugar a una mayor disparidad en los resultados proporcionados por los distintos métodos.

6.3.3. Descomposición en dos niveles de desagregación (grupo y sector)

Los resultados de los epígrafes anteriores están condicionados por la clasificación industrial considerada, con lo que una descomposición multinivel presenta interés práctico. A continuación se recogen los resultados tanto a nivel de grupo, de sector, como del paso de grupo a sector industrial. Dada la mayor complejidad de la aplicación de los enfoques LMDI y MSN frente al resto de métodos propuestos en el nivel de grupo, y que, en este análisis, los resultados mediante métodos derivados del MDP1 han sido similares a los obtenidos mediante los otros enfoques, hemos optado por realizar el análisis aplicando LAS-MDP1 y AVE-MDP1 (Tablas 6.7 y 6.8).

Tabla 6.7. Resultados de la descomposición multiplicativa en series temporales del cambio de la intensidad agregada de la electricidad en la industria española. Descomposición multinivel (grupo y sector), 1979-1992. Base 1979.

Método	Grupo			Sector			C _{tot}
	C _{1_{str}}	C _{1_{int}}	C _{1_{rsd}}	C _{2_{str}}	C _{2_{int}}	C _{2_{rsd}}	
LAS-MDP1	0,9326	0,3953	1,0084	0,8816	0,4075	1,0349	0,3718
AVE-MDP1	0,9335	0,3983	0,9999	0,8264	0,4200	1,0711	0,3718

Tabla 6.8. Efectos de subgrupo al pasar del nivel de desagregación de grupo al de sector industrial en la descomposición de la Tabla 6.7. Base 1979.

Método	C12_{str}	C12_{int}
LAS-MDP1	0,9452	1,0308
AVE-MDP1	0,8853	1,0545

Como indicamos más arriba, en el primer nivel de desagregación (grupo) se observa que -independientemente del método utilizado- tanto el efecto estructural ($C1_{str}$) como el intensidad ($C1_{int}$) son negativos, lo que contribuye a la reducción de la intensidad de electricidad en un 62,8%, siendo el efecto intensidad el mayor contribuyente a esta caída.

En el segundo nivel de desagregación (sector) los dos métodos aplicados muestran de nuevo contribuciones negativas de los efectos estructural e intensidad, siendo también dominante el segundo de ellos. No obstante, comparando estos resultados con los obtenidos a nivel de grupo se aprecia que la importancia relativa de cada efecto se modifica, disminuyendo el impacto del efecto intensidad en favor del estructural.

En cualquier caso, atendiendo al efecto residual se pueden observar algunas peculiaridades, especialmente en el segundo nivel de desagregación. Mientras que en el primer nivel de la descomposición (mediante LAS-MDP1 y AVE-MDP1) las variaciones de la ratio intensidad agregada de la electricidad eran pequeñas (0,84% y -0,01%, respectivamente), en el segundo nivel son algo mayores, indicando que hay interacciones entre los factores que aún quedarían por identificar.

Por lo que respecta a la descomposición de los efectos totales estimados (efectos de sector) en los efectos de grupo y subgrupo, también aparecen algunas diferencias.

En primer lugar y aplicando LAS-MDP1, el efecto estructural total ($C2_{str}$) contribuye a la reducción de la intensidad de electricidad en aproximadamente un 11,8%. Por otra parte, si consideramos los efectos de grupo ($C1_{str}$) y subgrupo ($C12_{str}$), se observa que ambos han contribuido en este mismo sentido (-6,7% y -5,5%, respectivamente). Es decir, ha habido un cierto desplazamiento de la producción industrial hacia los grupos menos intensivos en energía eléctrica (tales como el grupo 3) y una participación decreciente de los sectores intensivos pertenecientes a esos grupos, factores ambos que han contribuido en proporción similar a la reducción total de la intensidad de energía eléctrica.

Por lo que se refiere al efecto intensidad total ($C2_{int}$), ha contribuido a la disminución de la intensidad de la electricidad en aproximadamente un 59,3%. En este caso, el efecto de grupo ($C1_{int}$) es negativo y ha supuesto una reducción del 60,5% en la intensidad de energía eléctrica. En cambio, el efecto de subgrupo ($C12_{int}$) ha sido positivo, contribuyendo a amortiguar el efecto de grupo en un 3,1%. Como el efecto total ha resultado finalmente negativo, esto significa que la contribución de los cambios entre grupos a la variación de la intensidad de energía eléctrica es mayor que la contribución de los cambios en la intensidad de la electricidad entre los sectores pertenecientes a esos grupos.

En segundo lugar, y aplicando el método AVE-MDP1, la estimación del efecto estructural total ($C2_{str}$) es también negativa, representando el 17,4% del total de la reducción de la intensidad energética eléctrica. En este caso, los efectos de grupo y subgrupo ($C1_{str}$ y $C12_{str}$) son ambos negativos (6,7% y 11,5%, respectivamente) contribuyendo a la reducción de la intensidad total de electricidad.

El efecto intensidad ($C2_{int}$) es negativo y participa en la reducción de la ratio

entre consumo de energía eléctrica y producción en un 58%. Por niveles, observamos que el efecto de grupo ($C1_{int}$) es negativo (60,2%), pero el efecto de subgrupo ($C12_{int}$) resulta positivo (5,4%). Por tanto, aunque el efecto de grupo contribuye a la reducción de la intensidad de energía eléctrica, se ve aminorado por el efecto de subgrupo. Dado que el efecto total es negativo, la contribución de los cambios intergrupo a la variación de la intensidad de energía eléctrica es mayor que las contribuciones de los cambios intragrupo.

Finalmente, podemos comparar los resultados obtenidos a través de los dos métodos al optar por un nivel de desagregación basado en sectores en lugar de grupos industriales:

En la aplicación de AVE-MDP1 se observa una mayor relevancia del efecto estructural (-17,4%) que la obtenida a través de LAS-MDP1 (-11,9%), motivada por el papel más destacado que parece jugar el efecto estructural de subgrupo (-11,5% frente a -5,5%). El desplazamiento de la producción industrial desde los sectores más intensivos en electricidad hacia los menos intensivos contribuye en mayor proporción a reducir la intensidad agregada de la electricidad que la participación creciente de los grupos industriales menos intensivos.

En cuanto al método LAS-MDP1, se observa una ligera, pero mayor importancia del efecto intensidad que en el caso de AVE-MDP1 (-49,25% frente al -48%). Nuevamente esto es consecuencia del efecto intensidad de subgrupo (+3,1% frente al +5,4%), indicando una menor contribución de los cambios intragrupo en el incremento de la intensidad agregada de la electricidad.

6.4. Conclusiones

La intensidad agregada de energía eléctrica de la industria española ha experimentado una notable reducción en el período de estudio.

Independientemente del método de descomposición aplicado y del nivel de desagregación considerado, esta reducción parece ser consecuencia de la acción simultánea de los efectos estructural e intensidad. De hecho, la contribución del efecto intensidad es mayor, lo que sugiere que la innovación, el cambio técnico, la difusión y la capacidad de adaptación a tecnologías más eficientes son las fuentes principales de la reducción de la intensidad total de electricidad. El cambio estructural no tiene efecto en la reducción de la intensidad de electricidad hasta la reconversión industrial de mediados de la década de 1980. A partir de ese momento, el cambio en favor de industrias menos intensivas en electricidad gana importancia como medio de mejora de la eficiencia eléctrica (entendida en sentido amplio).

También hemos incluido en nuestro análisis el precio de la electricidad, ya que desempeña un papel importante en la mejora de la eficiencia eléctrica y puede ayudarnos a comprender los resultados obtenidos en la descomposición. Por un lado, la reducción en el precio de la electricidad ha tenido un efecto directo sobre la estructura productiva, ya que favorece la producción de aquellos productos intensivos en este tipo de energía. Por otro lado, esta reducción probablemente haya contribuido a generar mayores beneficios que habrían permitido la inversión y la búsqueda de nuevas técnicas, o en aquellos casos en que esta reducción de precios haya sido inferior a la de energías alternativas habría estimulado la inversión en tecnologías más eficientes que permita reducir costes. Finalmente, dado que la intensidad agregada de electricidad ha disminuido notablemente, la reducción de los precios de la energía eléctrica parece estar asociada a mejoras en la eficiencia energética.

Adicionalmente hemos aplicado una técnica no paramétrica basada en la reconstrucción de las trayectorias de las variables mediante splines naturales. Comparando los resultados con los obtenidos en la aplicación del otro método no paramétrico (LMDI), la conclusión es que ambos conducen a descomposiciones exactas y llevan a resultados muy similares.

Finalmente, al llevar a cabo la descomposición a un nivel de desagregación más fino¹⁰, el efecto intensidad pierde cierta relevancia a favor del efecto estructural. Mientras que el efecto estructural de subgrupo es negativo y reduce la contribución del cambio estructural al nivel de sector industrial, el efecto intensidad de subgrupo es positivo y amortigua la influencia del efecto intensidad.

Los resultados anteriores indican que, aunque los cambios estructurales son capaces de reducir en una modesta proporción la intensidad eléctrica agregada en la industria española, una reducción significativa de la misma requiere como fuentes principales la mejora en la eficiencia técnica, el cambio tecnológico y la investigación en energías de mayor calidad.

¹⁰ La disponibilidad de información está sujeta a la clasificación industrial considerada. Una agrupación diferente podría haber ofrecido resultados distintos con relación a la influencia del cambio estructural al modificar el nivel de desagregación.

ANEXO II: Clasificación industrial y gráficos a nivel de sector

Clasificación industrial

1. Energía y agua

- 11. Extracción, preparación y aglomeración de combustibles sólidos y coquerías
- 12. Extracción de petróleo y gas natural
- 13. Refino de petróleo
- 14. Extracción y transformación de minerales radioactivos
- 15. Producción, transporte y distribución de energía eléctrica, gas, vapor y agua caliente
- 16. Captación, depuración y distribución de agua

2. Extracción y transformación de minerales no energéticos y productos derivados. Industria química

- 21. Extracción y preparación de minerales metálicos
- 22. Producción y primera transformación de metales
- 23. Extracción de minerales no metálicos ni energéticos. Turberas
- 24. Industria de productos minerales no metálicos
- 25. Industria química

3. Industrias transformadoras de los metales. Mecánica de precisión

- 31. Fabricación de productos metálicos (excepto máquinas y material de transporte)
- 32. Construcción de maquinaria y equipo metálico
- 33. Construcción de máquinas de oficina y ordenadores (incluida su instalación)
- 34. Construcción de maquinaria y material eléctrico
- 35. Fabricación de material electrónico (excepto ordenadores)
- 36. Construcción de vehículos, automóviles y sus piezas de repuesto
- 37. Construcción naval, reparación y mantenimiento de buques

- 38. Construcción de otro material de transporte
- 39. Fabricación de instrumentos de precisión óptica y similares

- 4. Otras industrias manufactureras
 - 41. Industrias de productos alimenticios
 - 42. Industria de productos alimenticios, bebidas y tabaco
 - 43. Industria textil
 - 44. Industria del cuero
 - 45. Industria del calzado y del vestido y otras confecciones textiles
 - 46. Industrias de la madera, corcho y muebles de madera
 - 47. Industria del papel y fabricación de artículos de papel, artes gráficas y edición
 - 48. Industrias de transformación del caucho y materias plásticas
 - 49. Otras industrias manufactureras

Gráficos a nivel de sector industrial

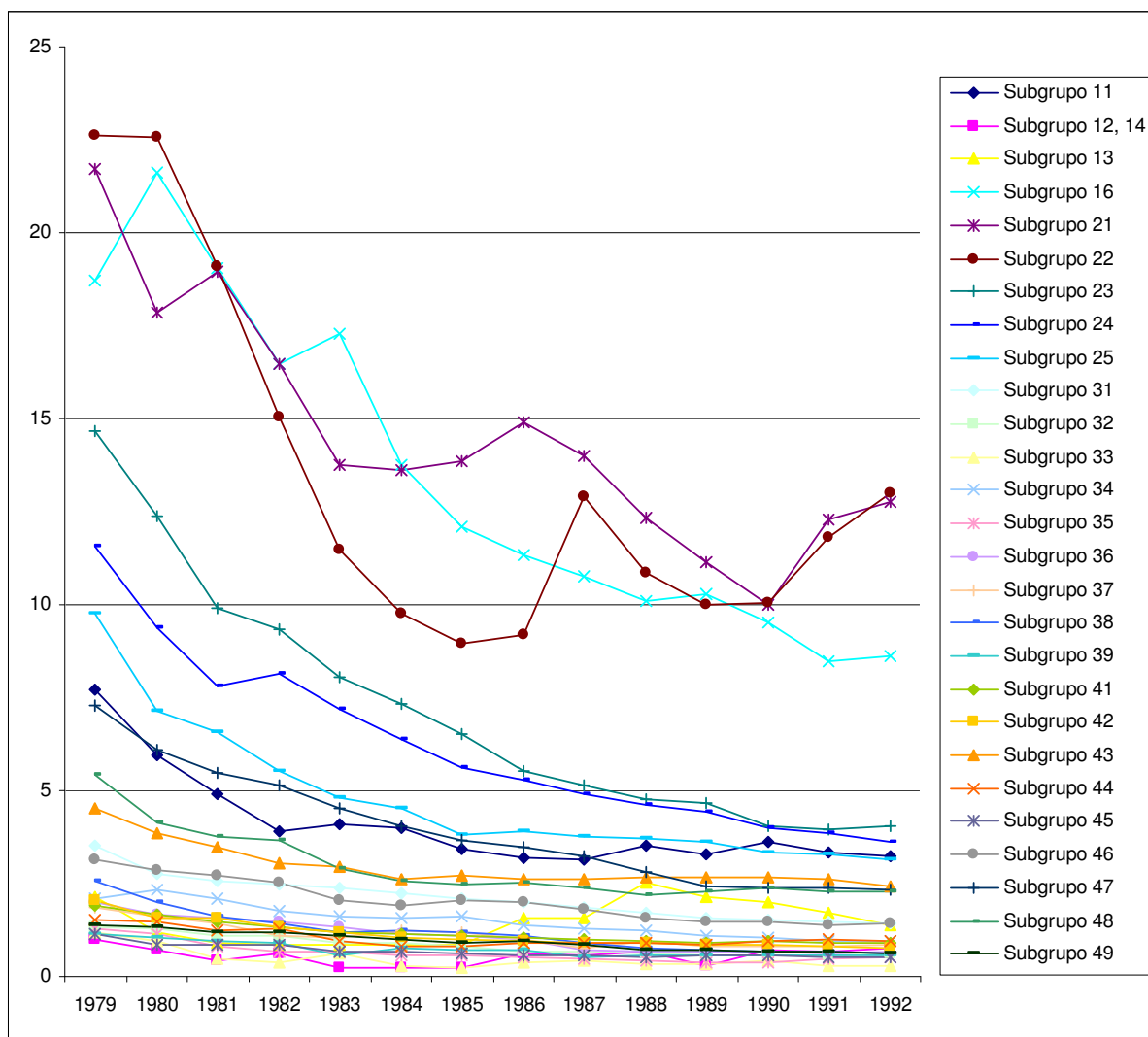


Figura 6A.1. Intensidad de la energía eléctrica, en miles de kWh. por millones de pts, de los distintos sectores industriales en España (1979-1992).

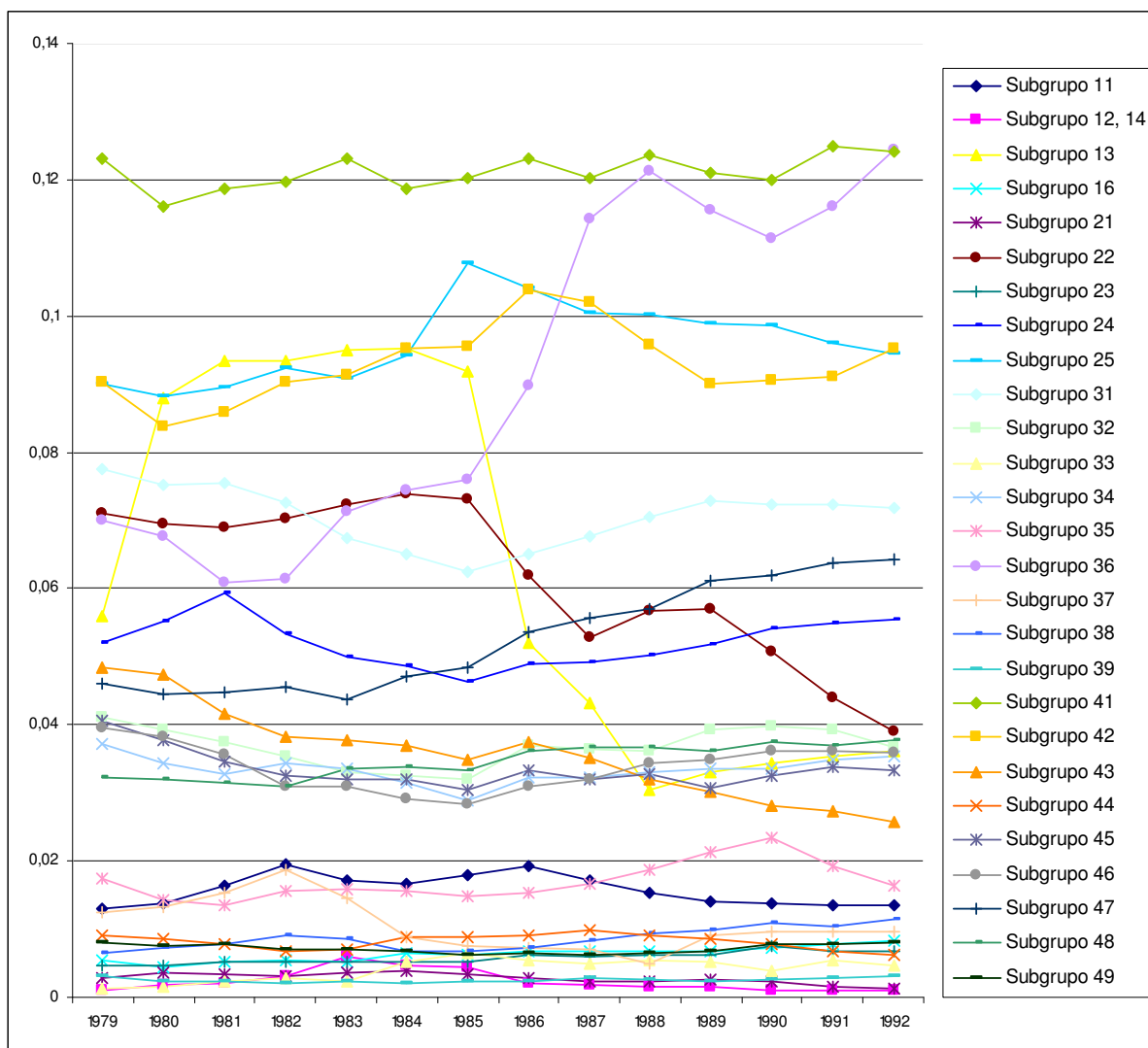


Figura 6A.2. Participación de los distintos sectores industriales en la producción industrial española (1979-1992).

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La energía es indispensable en la vida cotidiana. Por esta razón, hoy resulta inevitable afrontar los grandes desafíos energéticos que representan el cambio climático, la dependencia creciente de las importaciones, la presión sobre los recursos energéticos y el abastecimiento a todos los consumidores de energía segura a precios asequibles. Numerosas publicaciones analizan los acontecimientos económicos que amenazan con deteriorar los recursos naturales y el medio ambiente, impidiendo o dificultando un crecimiento sostenible.

En esta tesis nos hemos ocupado de identificar, cuantificar e interpretar el impacto de los factores que influyen sobre agregados medioambientales y energéticos tan relevantes como el consumo de energía, la eficiencia energética o las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Hemos centrado el trabajo en la metodología basada en índices tipo Divisia, que permite descomponer las variaciones que experimenta un valor agregado, una ratio o una elasticidad en un número de factores predefinido, ponderando la importancia de las magnitudes consideradas en cada período en función del criterio seguido por el investigador. Esta metodología es ampliamente aceptada en el campo de la energía y del medio ambiente. Pese a su complejidad relativa por el elevado número de cálculos que requiere y a la necesidad por parte del investigador de seleccionar las ponderaciones, presenta la ventaja de no precisar una elevada cantidad de información inicial, además de permitir una interpretación sencilla de los resultados que, como hemos visto, en nuestro caso son esencialmente coincidentes con independencia del método Divisia utilizado.

Hemos estructurado el trabajo en dos partes bien diferenciadas.

En la primera parte (Capítulos 1 y 2) hemos recogido los aspectos más teóricos de la tesis. En el Capítulo 1 hemos revisado la literatura relativa a las técnicas de descomposición de variaciones basadas en índices de Divisia. En el Capítulo 2 se planteó la descomposición exacta (en dos factores) de la variación de una ratio, proponiendo el método de los splines naturales (MSN) y demostrando su convergencia hacia los valores teóricos de la teoría de Divisia en tiempo continuo, que por tanto son límites (deterministas, estocásticos) de las aproximaciones construidas mediante splines. Los resultados de este capítulo pueden ser generalizados directamente al caso de la descomposición de la variación del producto de n componentes o trayectorias temporales, y también podría extenderse al caso más general de la descomposición de funcionales diferenciables de un vector de trayectorias suaves.

En la segunda parte (Capítulos 3 a 6) hemos planteado una serie de aplicaciones en las que analizamos las variaciones de diversos agregados particulares (intensidad de electricidad de la industria española en la década de 1980, emisión de gases de efecto invernadero en la UE-27 durante la década de 1990, consumo de energía y emisión de CO₂ en la UE-27 en la primera década del siglo XXI). Una conclusión de carácter general que parece deducirse de los diversos aspectos analizados en esta segunda parte es que los resultados de nuestro estudio abogan claramente por la inversión en innovación, desarrollo, difusión y acceso a las tecnologías más eficientes, el cambio tecnológico y la investigación en energías de más calidad como fuentes principales para lograr los objetivos, sean éstos la reducción significativa de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, la mejora de la eficiencia de energía (en términos de intensidad energética) o el consumo de energía.

Respecto a los resultados de carácter más específico:

En el Capítulo 3 descompusimos (tanto aditiva como multiplicativamente) las variaciones en las emisiones de CO₂ de la UE entre 2001 y 2008 utilizando el método LMDI. Durante ese período, el total de las emisiones disminuyó en un 1,448% (aproximadamente 56,5699 millones de toneladas) a consecuencia de factores tales como el efecto intensidad y el efecto mezcla de combustibles. Por el contrario, la carbonización, la población y, especialmente, el PIB per cápita contribuyeron de manera relevante a incrementar las emisiones totales. Estos resultados parecen encontrar explicación al comparar la diferente evolución de los precios de cada combustible y las diferencias interregionales en el crecimiento económico durante el período estudiado. Estas diferencias interregionales influyen positivamente en el efecto PIB por habitante, ya que son precisamente los países menos desarrollados los que experimentaron el mayor crecimiento en el período de estudio. Por otra parte, la evolución diferenciada de los precios de los distintos combustibles influyó negativamente en la intensidad y en el efecto mezcla de combustible, induciendo a la inversión en innovación, a un mejor uso de la tecnología, y al empleo de técnicas más eficientes y energías menos contaminantes. Finalmente, la contribución al incremento de las emisiones de dióxido de carbono de los cambios experimentados en la población, el PIB per cápita y la carbonización no han sido suficientes para contrarrestar los impactos reductores de los efectos intensidad y mezcla de combustibles.

En el Capítulo 4 se descompuso aditivamente la variación de las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE-15 entre 1990 y 2002. Los factores considerados son el PIB del conjunto de la UE-15, el peso del PIB nacional en el PIB de la UE-15 y las emisiones de

gases de efecto invernadero por unidad de PIB nacional. Se aplicaron varias metodologías –método de Sun, enfoque BT y método LMDI–, considerando descomposiciones únicas, en series trienales y en series anuales. El análisis permite concluir que la incorporación de información trienal parcial, que posibilita el método BT, conduce a resultados más próximos a los obtenidos a partir de series anuales que los que resultan del método de Sun de período único. En este sentido, el método BT resultaría “más preciso” que el de Sun. Sin embargo, cuando se lleva a cabo una descomposición (sea única o en series trienales) mediante el enfoque LMDI, éste produce resultados más próximos a los ofrecidos por una descomposición en series anuales que los correspondientes a los enfoques de Sun y BT. Por consiguiente, en este conjunto de situaciones, el enfoque LMDI se consolidaría como una alternativa interesante al resto de los métodos de descomposición basados en índices.

En el Capítulo 5, basándonos en el enfoque del consumo de energía, se han descompuesto (multiplicativamente y en varios niveles de desagregación) los cambios en el consumo agregado de energía de la UE-27 entre 2001 y 2008. Durante este período, el consumo total se incrementó en un 2,245%. Los cambios estructurales interregionales, y especialmente la inercia de la producción global, han contribuido a este aumento del consumo energético, que se ha visto amortiguado parcialmente por el efecto intensidad.

En el mayor nivel de desagregación (27 países), los cambios estructurales interregionales, y especialmente la inercia de la producción global de la Unión Europea, contribuyeron positivamente al incremento del consumo de energía, mientras que el efecto intensidad afectó negativamente. En el segundo nivel de desagregación (8 unidades espaciales) se reiteran la influencia

positiva de los cambios estructurales y el impacto negativo del cambio tecnológico y la innovación, aunque se observa una menor importancia de éstos como consecuencia de la influencia de los efectos de subgrupo. Finalmente, en el menor nivel de desagregación considerado (3 regiones), los efectos estructural e intensidad mantienen su signo, pero de nuevo se refleja una reducción en su influencia. Como regla general, se observa que al pasar de un mayor a un menor nivel de desagregación, la relevancia de los dos efectos disminuye, lo que significa que el impacto de los movimientos intragrupo sobre el consumo de energía contrarresta parcialmente la influencia de ambos.

En el mismo capítulo también se ha aplicado el enfoque de la elasticidad. Nuestra estimación del coeficiente total de energía indica una elasticidad positiva e inelástica: un incremento del 1% en la producción nacional conlleva un aumento del 0,1885% en el consumo de energía. El impacto negativo del efecto intensidad no fue suficiente para compensar la influencia positiva de los efectos actividad y estructural. Nuestras proyecciones de la demanda de energía para el período 2009-2012 (bajo diversos escenarios, y asumiendo una tasa de crecimiento anual constante del 1,4%) anticiparon: un fuerte aumento del consumo de energía (cuando sólo se incluye el efecto actividad, o ambos efectos actividad y estructural), y un incremento moderado (cuando a los anteriores se les añade el efecto intensidad).

En el Capítulo 6, centrados en un enfoque de la intensidad basado en índices tipo Divisia, descompusimos multiplicativamente los cambios en la intensidad de la electricidad consumida en la industria española entre 1979 y 1992, considerando dos niveles de desagregación industrial. Para ello aplicamos dos métodos paramétricos generales de tipo Divisia y varios casos específicos de los mismos.

Adicionalmente, llevamos a cabo la misma descomposición basándonos en el método de los splines naturales expuesto en el Capítulo 2. Como conclusión general del capítulo se observa que, aunque los cambios estructurales en este período pueden haber sido capaces de reducir la intensidad eléctrica agregada en España, nuestros resultados sugieren que el efecto intensidad sería mucho más efectivo como medio para alcanzar una reducción importante de la misma.

A nivel de grupo industrial -independientemente del método aplicado- se observó una disminución notable en la intensidad agregada durante el período estudiado, como consecuencia simultánea de los efectos estructural e intensidad. Sin embargo, la contribución del efecto intensidad resultó mayor, lo que sugiere que éste fue la fuente principal de esta reducción en la intensidad total de electricidad. Llevando a cabo un análisis exhaustivo en series temporales año a año, pudimos observar que el cambio estructural no tuvo efecto en la reducción de la intensidad de electricidad hasta mediados de la década de 1980, coincidiendo con la reconversión industrial y con la adhesión de España en la entonces Comunidad Económica Europea. A partir de ese momento, el cambio en favor de industrias menos intensivas en electricidad comenzó a recuperar importancia como medio de mejora de la eficiencia eléctrica, entendida en sentido amplio. Al incluir el precio de la electricidad en el análisis se observó una notable disminución del mismo, especialmente significativa en los primeros años del período de estudio. Esta reducción bien pudo haber estimulado la inversión en tecnologías más eficientes, al permitir mayores márgenes de beneficios. Por otro lado, el precio de otras energías como el crudo experimentó importantes reducciones en la primera mitad de los años 80. Este hecho podría haber favorecido la búsqueda de alternativas a la energía eléctrica.

Por lo que respecta a la misma descomposición llevada a cabo a un nivel de desagregación más fino (sector industrial), el efecto intensidad continúa siendo el más efectivo en la reducción de la intensidad agregada de la electricidad, aunque pierde peso relativo al pasar a un mayor nivel de desagregación. Al pasar del nivel de grupo al de sector, el efecto estructural de subgrupo resultó negativo (contribuyendo a reducir la intensidad intragrupo de electricidad), mientras que el efecto intensidad de subgrupo fue positivo (incrementando la intensidad intragrupo de electricidad). En consecuencia, pese a que a nivel de sector ambos efectos (estructural e intensidad) mantienen el mismo signo que a nivel de grupo, el efecto estructural gana peso respecto a lo observado en el nivel anterior, mientras que el efecto intensidad lo pierde.

En el mismo capítulo se llevó a cabo la descomposición multiplicativa de tipo MSN. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos a través de las técnicas convencionales, que en este sentido pueden considerarse como versiones simplificadas de nuestro enfoque.

Del análisis de los resultados particulares de los Capítulos 3 a 6 se deducen algunas conclusiones de carácter más general, que podrían servir a las autoridades competentes para definir líneas de actuación energéticas y medioambientales en los territorios analizados:

1. En primer lugar, nuestra descomposición de la variación del consumo de energía muestra la gran importancia relativa de los efectos producción e intensidad en dicha variación. El primero ha tendido a incrementar el consumo (efecto inercia de la producción global), mientras que el segundo ha ido en la dirección contraria.
2. Con relación a los análisis de la variación de la intensidad energética, el efecto estructural parece mantener un impacto

limitado, mientras que el efecto intensidad ha influido de manera notable en la reducción de la intensidad agregada de energía y, por tanto, lleva hacia una mayor eficiencia energética.

3. Por lo que respecta a las emisiones de CO₂ ocurre algo similar. Los efectos intensidad y mezcla de combustibles explican la mejora de la eficiencia en el nivel de emisiones de este gas de efecto invernadero. Por su parte, el crecimiento de la población, del PIB per cápita y el cambio estructural han presionado, incrementando el nivel de emisiones de CO₂.

4. Los resultados de los análisis presentan cierta sensibilidad al nivel de desagregación empleado en los estudios. Por ejemplo, en el análisis de la variación del consumo agregado de energía en el Capítulo 5, al incluir las unidades espaciales en grupos homogéneos en función de su eficiencia energética, la influencia de los efectos estructural e intensidad se reduce. En cambio, en el estudio sobre la intensidad agregada de electricidad en el Capítulo 6, al incorporar las unidades en grupos basados en la clasificación industrial CNAE, el efecto intensidad gana influencia en detrimento del efecto estructural.

Una recomendación general que parece deducirse de nuestros resultados es que para procurar un desarrollo sostenible (sea mediante la reducción del consumo de energía, de la intensidad de electricidad o de las emisiones de gases contaminantes) deberían adoptarse políticas dirigidas a favorecer un mejor uso de las tecnologías, así como la sustitución de energías por otras menos contaminantes y de mayor calidad, la adaptación a nuevas tecnologías y la I+D+I. Las líneas de actuación que inciden sobre estos aspectos podrían ser no sólo suficientes, sino también necesarias para compensar globalmente los posibles impactos adversos de otros efectos.

Los resultados anteriores dejan abiertas varias líneas futuras de investigación, sugiriendo la necesidad de avanzar en el conocimiento de un conjunto de aspectos:

a. En primer lugar, y dado que el precio de las energías parece influir sobre los efectos mezcla de combustibles e intensidad (según las descomposiciones especificadas en las aplicaciones), podría resultar interesante la incorporación directa del diferencial de precios como un factor determinante en el análisis.

b. En segundo lugar, sería posible clasificar a los países de la UE-27 en distintos niveles de desagregación en función de otras variables, tales como el PIB per cápita, el Índice de Desarrollo Humano, países que han recibido un determinado tipo de ayudas o que han aplicado un determinado tipo de políticas, etc. y estudiar cómo varían los resultados de las descomposiciones con respecto a los aquí expuestos.

c. Los estudios comparados entre Europa y EEUU revelan una brecha profunda en sus sendas de productividad, causada -entre otros factores- por sus diferencias de estructura productiva, con una contribución mayor de los sectores tecnológicos en EEUU que en Europa. Una línea de interés futuro se orientaría hacia la descomposición de la variación de una ratio que refleje adecuadamente la eficiencia productiva de la UE. Esto permitiría identificar los factores determinantes de la misma y sus contribuciones, con el doble propósito de realizar comparaciones y proponer líneas de actuación generales que permitan a la UE mejorar su eficiencia productiva.

d. La metodología que hemos propuesto en el Capítulo 2 puede extenderse utilizando la teoría de los splines dinámicos (*e.g.*, Kano *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2000), al objeto de incluir información de otras

señales que permitan mejorar la reconstrucción de las trayectorias, y por tanto la precisión de las aproximaciones de los efectos que aparecen en las descomposiciones en tiempo continuo.

e. Las técnicas de descomposición anteriores pueden combinarse con modelos de series temporales y de regresión, con el objetivo de mejorar la calidad de las reconstrucciones de las trayectorias y permitir la detección robusta de posibles cambios estructurales en las mismas (e.g. Harvey *et al.*, 2010; Kejriwal y Perron, 2010).

En la actualidad, los gobiernos son conscientes del impacto que la crisis económica y financiera tiene sobre la inversión en energía, de las consecuencias potenciales sobre la seguridad energética y el cambio climático, así como de los efectos de largo plazo en el desarrollo económico y humano. Cualquier reducción en la inversión amenaza con reducir la capacidad de crecimiento. La debilidad de los precios de los combustibles sólidos está minando el atractivo de las inversiones en tecnología de energías limpias. Los recortes en infraestructuras de energía amenazan con impedir el acceso de los hogares más pobres a la electricidad y a otras formas de energía moderna. La menor inversión es una respuesta lógica a las perspectivas débiles del mercado. Las dificultades financieras impiden que algunos proyectos económicamente viables, al carecer de crédito, puedan llevarse a cabo. El cambio climático y la inseguridad energética son dos fallos del mercado, y los gobiernos podrían actuar conjunta y urgentemente para tratar de solventar estos problemas.

La propia UE, a través de la instauración de una política europea de la energía suficientemente ambiciosa, que abarque todas las fuentes de energía, incluyendo las fósiles (petróleo, gas, carbón), la de origen nuclear y las energías renovables (solar, eólica, resultante de la

biomasa, geotérmica, hidráulica, mareomotriz), tiene como uno de sus objetivos iniciar una nueva revolución industrial que transforme a la UE en una economía con un bajo consumo de energía, a la vez que más segura, competitiva y sostenible.

La Agencia Internacional de la Energía, en *Energy Technology Perspectives 2012*, contiene recomendaciones políticas específicas para cada ámbito de desafío. Sus recomendaciones de alto nivel a los ministros de energía incluyen:

-Crear un entorno propicio a la inversión, que permita el despegue de las energías limpias. La industria es esencial para la transición. La existencia de objetivos comunes, respaldados por políticas rigurosas y predecibles es esencial para establecer la credibilidad necesaria en el seno de la comunidad de inversores.

-Allanar el terreno para las tecnologías de energía limpia. Los gobiernos deberán comprometerse a hacer progresar acciones nacionales que tiendan a reflejar adecuadamente el verdadero coste de la producción y el consumo de energía, así como a informar de dichas acciones. Poner un precio a las emisiones de CO₂ y eliminar progresivamente los subsidios ineficaces a los combustibles fósiles, al tiempo que garantizar el acceso a una energía asequible para todos los ciudadanos.

-Redoblar esfuerzos para liberar el potencial de la eficiencia energética. Explotar todo el potencial que encierran las mejoras de la eficiencia energética en todos los sectores que consumen energía.

-Acelerar la innovación, así como la investigación, el desarrollo y la educación del público en materia energética. Los poderes públicos deberán desarrollar e implementar planes estratégicos de investigación en energía, respaldados por un apoyo económico mayor y sostenido. Además, los gobiernos deberán considerar la posibilidad

de aunar esfuerzos en I+D+I con el fin de coordinar sus actuaciones, evitar duplicidades, mejorar resultados y reducir los costes de las tecnologías al principio de su fase de innovación, así como compartir lecciones aprendidas sobre los modelos de innovación en materia de I+D+I.

La utilización integrada de tecnologías clave ya existentes haría posible la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles importados y de los recursos nacionales limitados, así como disponer de electricidad de bajo contenido en carbono, mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones en los sectores de la industria, el transporte y los edificios. Esto frenaría el crecimiento vertiginoso de la demanda de energía, reduciría las importaciones, reforzaría las economías nacionales y, con el tiempo, haría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

CONTENIDO E INSTRUCCIONES DEL DVD-ROM

El DVD que acompaña al texto contiene los siguientes ficheros:

- "readme.txt": Es un fichero de ayuda en formato de texto.
- "capítulo 3.xls", "capítulo 4.xls", "capítulo 5.xls", y "capítulo 6.xls" son archivos en formato de Excel que recogen las bases de datos y algoritmos empleados en las aplicaciones realizadas en los Capítulos 3, 4, 5 y 6, respectivamente.
- "datoscap6.csv": fichero en formato CSV que contiene la base de datos del Capítulo 6.
- "abredivisia.m": función de Matlab que lee la base de datos en formato CSV.
- "divisiasplines.m": fichero ejecutable Matlab ("m-file"), para aplicar el enfoque MSN.

Para ejecutar las rutinas Matlab anteriores se requiere tener instalada la herramienta de splines ("splines toolbox") de Matlab. Se procede del modo siguiente:

En primer lugar se copia "datoscap6.csv" al directorio deseado (por defecto, el directorio raíz c:). A continuación se copian "abredivisia.m" y "divisiasplines.m" al directorio deseado (por ejemplo, la carpeta "bin" de Matlab), asegurándose de añadir dicha ruta ("path") a las accesibles desde Matlab. El fichero "divisiasplines.m" se puede abrir y editar desde el editor de programas de Matlab, permitiendo elegir entre las descomposiciones aditiva y multiplicativa. Finalmente, se teclea el nombre abreviado del fichero (divisiasplines) en el editor de órdenes de Matlab. La pantalla de salida de Matlab proporciona los resultados, recogidos en el Capítulo 6, del análisis mediante splines de la variación de la intensidad energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achão, C. y Schaeffer, R. (2009): "Decomposition analysis of the variations in residual electricity consumption in Brazil for the 1980-2007 in period: measuring the activity, intensity and structure effects," *Energy Policy*, 37(12), pp. 5208-5220.

Adams, R.A. (1975): *Sobolev Spaces*. Academic Press, New York.

Albrecht, J., Francois, D. y Schoors, K. (2002): "A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals," *Energy Policy*, 30(9), pp. 727-736.

Ang, B.W. (1994): "Decomposition of industrial energy consumption: the energy intensity approach," *Energy Economics*, 16(3), pp. 163-174.

Ang, B.W. (1995): "Decomposition methodology in industrial energy demand analysis," *Energy*, 20(11), pp. 1081-1095.

Ang B.W. (1995): "Multilevel decomposition of industrial energy consumption," *Energy Economics*, 17(1), pp. 39-51.

Ang, B.W. (1999): "Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change?," *Energy Policy*, 27(15), pp. 943-946.

Ang, B.W. (2004): "Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?," *Energy Policy*, 32(9), pp. 1131-1139.

Ang, B.W. (2005): "The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide," *Energy Policy*, 33(7), pp. 867-871.

Ang, B.W. y Choi, K.H. (1997): "Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method," *The Energy Journal*, 18(3), pp. 59-73.

Ang, B.W. y Lee, S.Y. (1994): "Decomposition of industrial energy consumption: some methodological and application issues," *Energy Economics*, 16(2), pp. 83-92.

Ang, B.W. y Liu, F.L. (2001): "A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation," *Energy*, 26(6), pp. 537-548.

Ang, B.W, Liu, F.L. y Chew, E.P. (2003): "Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis," *Energy Policy*, 31(14), pp. 1561-1566.

Ang, B.W. y Liu, N. (2007): "Energy decomposition analysis: IEA model vs. other methods," *Energy Policy*, 35(3), pp. 1426-1432.

Ang, B.W. y Skea, J.F. (1994): "Structural change sector, sector disaggregation and electricity consumption in the UK industry," *Energy and Environment*, 5(1), pp. 1-16.

Ang, B.W., Zhang, F.Q. y Choi, K.H. (1998): "Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition," *The Energy Journal*, 23(6), pp. 489-495.

Apostol, T. (1957): *Mathematical analysis*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

Barca, F. y McCann, P. (2011): "Meeting climate change and energy objectives," High Level Group Reflecting on Future Cohesion Policy. Meeting No. 8- 15TH February 2011. Venue: European Commission. Outcome Indicators. Complementary Note 2. (online en: http://ec.europa.eu/regional_policy/what/future/pdf/hlg/hlg8_complementary_note_2_2011_02_15.pdf).

Bhattacharyya, S.C. y Ussanarassamee, A. (2005): "Changes in energy intensities of Thai industry between 1981 and 2000: a decomposition analysis," *Energy Policy*, 33(8), pp. 995-1002.

Billingsley (1968): *Convergence of probability measures*. John Wiley & Sons, New York.

Boden, T., Marland, G. y Andres, B. (2011): "National CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751-2008," *Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

Bossanyi, E. (1997): "UK Primary Energy Consumption and the Changing Structure of Final Demand," *Energy Policy*, 7(6), pp. 253-258.

Boyd, G., Hanson, D.A. y Sterner, T. (1988): "Decomposition of changes in energy intensity: a comparison of the Divisia index and other methods," *Energy Economics*, 10(4), pp. 309-312.

Boyd, G., McDonald, J.F., Ross, M. y Hanson, D.A. (1987): "Separating the changing composition of US manufacturing

production from energy efficiency improvements: a Divisia index approach," *The Energy Journal*, 8(2), pp. 77-96.

Bruyn, S.M. de, Bergh, J.C. van den y Opschoor, J.B. (1998): "Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves," *Ecological Economics*, 25(2), pp. 161-175.

Chen, G.Q. y Zhang, B. (2010): "Greenhouse gas emissions in China: inventory and input-output analysis," *Energy Policy*, 38(10), pp. 6180-6193.

Chen, C.Y. y Rose, A. (1989): "A structural decomposition analysis of changes in energy demand in Taiwan: 1971-1984," *The Energy Journal*, 11(1), pp. 127-146.

Choi, K.H. y Ang, B.W. (2003): "Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference," *Energy Economics*, 25(6), pp. 615-624.

Choi, K.H. y Ang, B.W. (2012): "Attribution of changes in Divisia real energy intensity index: An extension to index decomposition analysis," *Energy Economics*, 34(1), pp. 171-176.

Chung, W., Kam, M.S. e Ip, C.Y. (2011): "A study of residential energy use in Hong Kong by decomposition analysis, 1990-2007," *Applied Energy*, 88(12), pp. 5180-5187.

Chung, H.S. y Rhee, H.C. (2001): "A residual free decomposition of the sources of carbon dioxide emissions: a case of the Korean industries," *Energy*, 26(1), pp. 15-30.

Dargay, J.M. (1992): "Are price and income elasticities of demand constant?," Oxford Institute for Energy Studies EE16. Registered Charity: N° 286084. ISBN 0 948061 70 7

DeVore, R.A. y Lorentz, G.G. (1993): *Constructive approximation*. Springer Verlag, Berlin.

Dietzenbacher, E. y Los, B. (1998): "Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity," *Economic Systems Research*, 10(4), pp. 307-323.

Dietzenbacher, E., Hoen, A. y Los, B. (2000): "Labor productivity in Western Europe 1975-1985: an intercountry, interindustry analysis," *Journal of Regional Science*, 40(3), pp. 425-452.

Diewert, W.E. (1978): "Superlative index numbers and consistency in aggregation," *Econometrica*, 46(4), pp. 883-900.

Diewert, W.E. (1980): "Recent Developments in the economic theory of index numbers: capital and the theory of productivity," *American Economic Review*, 70(2), pp. 260-267.

Diewert, W.E. (1990): *Price level measurement*. North-Holland, Amsterdam.

Divisia, F. L. (1925): "Indice monétaire et la théorie de la monnaie," *Revue d'Economie Politique*, 9(2), pp. 109-135.

Doblin, C.P. (1988): "Declining energy intensity in the US manufacturing sector," *The Energy Journal*, 9(2), pp. 109-135.

Dudley, R.M. (1973): "Sample functions of the Gaussian process," *Annals of Probability*, 1(1), pp. 66-103.

Duerr, P., Schipper, L. y Strom, S. (1990): "Energy use in passenger transport," mimeo, Lawrence Berkeley Laboratory.

Eichhorn, W. (1978): "What is an economic index? An attempt of an answer", en *Theory and Applications of Economic Indices*, Eichhorn, W., Henn, R., Opitz, O. y Shephard, R.W. Physica-Verlag, Würzburg.

Energy Technology Perspectives 2012, IEA Publications, publicado en Francia por la Agencia Internacional de la Energía, Junio 2012.

European Commission (2011): *European Economic Statistics*. Publications. Office of the European Union: Luxembourg (online en http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database, 2011)

European Commission (2011): *Energy, transport and environment indicators*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Eurostat: New Cronos data base, Statistical Office of the European Communities Regions, Luxembourg.

Fernández, E. (2004): *The use of entropy econometrics in decomposing structural change*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.

Fernández, E. y Fernández, P. (2008): "An extension to Sun's decomposition methodology: the path based approach," *Energy Economics*, 30(3), pp. 1020-1036.

Fernández, P. y Pérez, R. (2000): "Descomposición de la intensidad de energía agregada industrial en España: el efecto estructural y el efecto intensidad," *XIV Reunión ASEPELT*, Oviedo (España).

Fernández, P. y Pérez, R. (2003): "Decomposing the variation of aggregate electricity in Spanish industry," *Energy*, 28 (2), pp. 171-184.

Fisher, I. (1922): *The making of Index Numbers; a study of their varieties, tests, and reliability*. Houghton Mifflin, Boston.

Fraser, I. (2000): "An application of maximum entropy estimation: the demand for meat in the United Kingdom," *Applied Economics*, 32(1), pp. 45-59.

Freitas, L.C. y Kaneko, S. (2011): "Decomposition of CO₂ emissions change from energy consumption in Brazil: challenges and policy implications," *Energy Policy*, 39(3), pp. 1495-1504.

Gapminder. <http://www.gapminder.org/data/>

Gardebreek, C. and Lansink, A. (2004): "Farm-specific Adjustment Costs in Dutch Pig Farming," *Journal of Agricultural Economics*, 55(1), pp. 3-24.

Gardner, D. T. (1993): "Industrial energy use in Ontario from 1962 to 1984," *Energy Economics*, 15(1), pp. 25-32.

Gardner, D.T. y Elkhafif, M.A.T. (1998): "Understanding industrial energy use: structural and energy intensity changes in Ontario industry," *Energy Economics*, 20(1), pp. 29-41.

Gardner, D.T. y Robinson, J.B. (1993): "To what end? A conceptual framework for the analysis of energy use," *Energy Studies Review*, 5(1), pp. 1-14.

Golan, A., Judge, G. y Miller, D. (1996): *Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data*. John Wiley and Sons, Chichester (UK).

Golan, A., Perloff, J.M. y Shen, E.Z. (2001): "Estimating a Demand System with Nonnegativity Constraints: Mexican Meat Demand," *The Review of Economics and Statistics*, 83(3), pp. 541-550.

Greening, L.A., Davis, W.B., Schipper, L. y Khrushch, M. (1997): "Comparison of six decomposition methods: application to aggregate

energy intensity for manufacturing in 10 OECD countries," *Energy Economics*, 19(3), pp. 375-90.

Hankinson, G.A. y Rhys, M.M. (1983): "Electricity consumption, electricity intensity and industrial structure," *Energy Economics*, 5(3), pp. 146-152.

Harrison, W.J., Horridge J.M. y Pearson, K.R. (2000): "Decomposing Simulation Results with Respect to Exogenous Shocks," *Computational Economics*, 15(3), pp. 227-249.

Harvey, D.I., Leybourne, S.J. and Taylor, A.M.R. (2010): "Robust methods for detecting multiple level breaks in autocorrelated time series," *Journal of Econometrics*, 157(2), pp. 342-358.

Hatzigeorgiou, E., Polatidis, H. y Haralambopoulos, D. (2008): "CO₂ emissions in Greece for 1990-2002: a decomposition analysis and comparison of results using the arithmetic mean Divisia index and logarithmic mean Divisia index techniques," *Energy*, 33(3), pp. 492-499.

Hoekstra, R. y van der Bergh, J.C.J.M. (1999): "Comparing and expanding SDA and INA techniques applied to physical flows in the economy," Working Paper, Department of Spatial Economics, Free University, Amsterdam.

Hoekstra, R. y van der Bergh, J.C.J.M. (2003): "Comparing structural and index decomposition analysis," *Energy Economics*, 25(1), pp. 39-64.

Howarth, R.B., Schipper, L. y Andersson, B. (1993): "The structure and intensity of energy use: trends in five OECD nations," *The Energy Journal*, 14(2), pp. 27-45.

Howarth, R.B., Schipper, L., Duerr, P.A. y Strøm, S. (1991): "Manufacturing energy use in eight OECD countries," *Energy Economics*, 13(2), pp. 135-142.

Huang, J.P. (1993): "Industrial energy use and structural change: a case study of the People Republic of China," *Energy Economics*, 15(2), pp. 131-136.

Huang, J.P., Poh, K.L. y Ang, B.W. (1995): "Decision analysis in energy and environmental modelling," *The International Journal*, 20(9), pp. 843-855.

Hulten, C.R. (1973): "Divisia index numbers," *Econometrica*, 41(6), pp. 1017-1025.

Hulten, C.R. (1987): "Divisia index," in J. Eatwell *et al.* (Eds.), *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan. Online: http://www.dictionaryofeconomics.com/article?id=pde1987_X000612 > doi:10.1057/9780230226203.2399. Palgrave Macmillan. 14 September 2012.

Instituto Nacional de Estadística (1999): *Encuesta Industrial, 1979-1992*, Madrid.

International Energy Agency (2008): *World energy outlook*. OECD, Paris.
(<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,26707,en.html>, 2011).

International Energy Agency (2010): *Key world energy statistics*. Soregraph, France.

Jenne, C. y Cattell, R. (1983): "Structural change and energy efficiency in industry," *Energy Economics*, 5(2), pp. 114-123.

Jollands, N. y Aulakh, H.S. (1996): *Energy use patterns and energy efficiency trends: the case of energy intensity analysis in New Zealand*. (Online en: <http://www.ema.org.nz/papers/96eupeet.htm>).

Kano, H., Egerstedt, M.B., Nakata, H. y Martin, C.F. (2003): "B-splines and control theory," *Applied Mathematics and Computation*, 145(2), pp. 265-288.

Kapur, J.N. y Kesavan, H.K. (1993): *Entropy Optimization Principles with Applications*. Academic Press, New York.

Kaya, Y. (1990): "Impact of carbon dioxide emission control on GDP growth: interpretation and proposed scenarios," comunicación presentada al IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, París.

Kejriwal, M. and Perron, P. (2010): "A sequential procedure to determine the number of breaks in trend with an integrated or stationary noise component," *Journal of Time Series Analysis*, 31(5), pp. 305-328.

Lee, K. y Oh, W. (2006): "Analysis of CO₂ emissions in APEC countries: a time-series and a cross-sectional decomposition using the log mean Divisia method," *Energy Policy*, 34(17), pp. 2779-87.

Li J.W., Shrestha R.M. y Foell W.K. (1990): "Structural change and energy use: the case of the manufacturing sector in Taiwan," *Energy Economics*, 12(2), pp. 109-115.

Liao, H. y Wei, Y.M. (2010): "China's energy consumption: A perspective from Divisia aggregation approach," *Energy*, 35(1), pp. 28-34.

Liu, C.C. (2007): "An extended method for key factors in reducing CO₂ emissions," *Applied Mathematics and Computation*, 189, pp. 440-451.

Liu, L.C., Ying, F., Gang, W. y Wei, Y.M. (2007): "Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: an empirical analysis," *Energy Policy*, 35(11), pp. 5892-5900.

Liu, X.Q., Ang, B.W. y Ong, H.L. (1992): "The application of the Divisia index to the decomposition of changes in industrial energy consumption," *The Energy Journal*, 13(4), pp. 161-177.

Ma, C. y Stern, D.I. (2008): "China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis," *Energy Economics*, 30(3), pp. 1037-1053.

Marland, G., Boden, T.A. y Andres, R.J. (2012): "Global, regional and national CO₂ emissions in trends: a compendium of data on global change," *Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. Disponible online en:
http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/em_cont.htm.

Millennium Development Goals.
<http://unstats.un.org/unsd/mdg/Default.aspx>.

Montgomery, J.K. (1937): *The mathematical problem of the price index*. P.S. King & Son, London.

Morović, T., Gerritse, G., Jaeckel, G., Jochem, E., Mannsbart, W., Poppke, H. y Witt, B. (1989): *Energy Conservation Indicators II*. Springer-Verlag, Berlin.

Nag, B. y Parikh, J. (2000): "Indicators of carbon emission intensity from commercial energy use in India," *Energy Economics*, 22(4), pp. 441-461.

Nathwani, J.S., Siddall, E. y Lind, N.C. (1992): *Energy for 300 Years*. Institute for Risk Research, University of Waterloo, Ontario. Canada.

Oh, I. , Wehrmeyer, W. y Mulugetta, Y. (2010): "Decomposition analysis and mitigation strategies of CO₂ emissions from energy consumption in South Korea," *Energy Policy*, 38(1); pp. 364-377.

Panayotou, T. (1997): "Demystifying the environmental Kuznets curve misleading us? The case of CO₂ emissions," *Environment and Development Economics*, 2(4), pp. 465-484.

Paris, Q. y Howitt, R.E. (1998): "An Analysis of Ill-Posed Production Problems Using Maximum-Entropy," *American Journal of Agricultural Economics*, 80(1), pp. 124-138.

Park, S.H. (1992): "Decomposition of industrial energy consumption - an alternative method," *Energy Economics*, 14(4), pp. 265-270.

Park, S.H., Dissmann, B. y Nam, K.Y. (1991): "A cross-country decomposition analysis of manufacturing energy consumption," *Energy*, 18(2), pp. 93-100.

Powell, M.J.D. (1981): *Approximation theory and methods*. Cambridge University Press, Cambridge.

Reitler, W., Rudolph, M. y Schaefer, M. (1987): "Analysis of the factors influencing energy consumption in industry: a revised method," *Energy Economics*, 9(3), pp. 145-148.

Richter, M.K. (1966): "Invariance axioms and economic indexes," *Econometrica*, 34(4), pp. 739-755.

Ross, M., Larson, E.D, y Williams, R.H. (1987): "Energy demand and material flows in the economy," *Energy*, 12(10-11), pp. 1111-1120.

Rühl, C., Appleby, P., Fennema, J., Naumov, A. y Schaffer, M. (2012): "Economic development and the demand for energy: a historical perspective on the next 20 years," *Energy Policy*, 50, pp. 109-116.

Sahu, S.K. y Narayanan, K. (2010): "Decomposition of industrial energy consumption in Indian manufacturing: the energy intensity approach," *Journal of Environmental Management and Tourism, Association for Sustainable Education, Research and Science*, 0(1), pp. 22-38.

Sato, K. (1976): "The ideal log-change index number," *The Review of Economics and Statistics*, 58(2), pp. 223-228.

Schoenberg, I. (1964): "Spline functions and the problem of graduation," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 52, pp. 947-950.

Schultz, M. (1973): *Spline Analysis*. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey.

Shahiduzzaman, Md. y Alam, K. (2012): "Changes in energy efficiency in Australia: a decomposition of aggregate energy intensity using Logarithmic Mean Divisia approach," MPRA Paper 36250, University Library of Munich, Germany.

Shannon, J. (1948): "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Bulletin Journal*, 27(3), pp. 379-423.

Shrestha, R.M, Anandarajah, G. y Liyanage, M.H. (2009): "Factors affecting CO₂ emission from the power sector of selected countries in Asia and the Pacific," *Energy Policy*, 37(6), pp. 2375- 2384.

Stern, D.I., Cutler, J. y Kaufmann R.K. (2004): "Aggregation of energy," *Encyclopedia of Energy*, 1, pp. 17-28.

Sun, J.W. (1998): "Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model," *Energy Economics*, 20(19), pp. 85-100.

Sun, J.W. y Ang, B.W. (2000): "Some properties of an exact decomposition model," *Energy*, 25(12), pp. 1177-1188.

Sun, S., Egerstedt, M.B. y Martin, C.F. (2000): "Control theoretic smoothing splines," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45 (12), pp. 2271-2279.

Tanaka, K. (1996): *Time series analysis: nonstationary and noninvertible distribution theory*. John Wiley & Sons, New York.

Törnqvist, L. (1935): *A memorandum concerning the calculation of Bank of Finland consumption price index*. Bank of Finland, Helsinki.

Törnqvist, L., Vartia, P. y Varita, Y. (1985): "How should relative changes be measured?," *The American Statistician*, 39(1), pp. 43-46.

Torvanger, A. (1991): "Manufacturing sector carbon dioxide emissions in nine OECD countries, 1973-87," *Energy Economics*, 13(3), pp.168-186.

United Nations Statistics Division (Environment and Energy Statistics)
http://unstats.un.org/unsd/environment_main.htm.

Vartia, Y.O. (1974): *Relative changes and economic indices*. Licentiate Thesis, Department of Statistics, University of Helsinki.

Vogt, A. (1978): "Divisia indices on different paths," in W. Eichhorn *et al.* (Eds.), *Theory and application of economic indices*. Physica-Verlag, Wurzburg.

Wahba, G. (1990): *Spline models for observational data*. SIAM, Philadelphia.

Weber, C.L. (2009): "Measuring structural change and energy use: decomposition of the US economy from 1997 to 2002," *Energy Policy*, 37(4), pp. 1561-1570.

Williams, R.H., Larson, E.D. y Ross, M.H. (1987): "Materials, affluence and industrial energy use," *Annual Review of Energy*, 12, pp. 99-144.

Wood, R. (2009): "Structural decomposition analysis of Australia's greenhouse gas emissions," *Energy Policy*, 37(11), pp. 4943-4948.

Wu, Y. (2012): "Energy intensity and its determinants in China's regional economies," *Energy Policy*, 41, pp. 703-711.

Zhang, Z. (2003): "Why did the energy intensity fall in China's industrial sector in the 1990s? The relative importance of structural change and intensity change," *Energy Economics*, 25(6), pp.625-38.

Zhang, J., Yang, Z., Fath, B.D. y Li, S. (2012): "Estimation of energy related carbon emissions in Beijing and factor decomposition analysis," *Ecological Modelling*, pendiente de publicación.
<http://dx.doi.org/10.1016/ecomodel.2012.04.008>

Zhao, M., Tan, L.R., Zhang, W.G., Ji, M.H., Liu, Y. y Yu, L.Z. (2010): "Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method," *Energy*, 35(6), pp. 2505-2510.

Zhou, P., Ang, B.W. y Poh, K.L. (2006): "Comparing aggregating methods for constructing the composite environmental index: An objective measure," *Ecological Economics*, 59(3), pp. 305-311.

