

INCIDENCIA DE LA CLIMATOLOGÍA EN EL CONSUMO DE GAS Y ELECTRICIDAD EN ESPAÑA

*Francisco J. Climent Diranzo**
*Enric Valor i Micó***
*Hipòlit Torró i Enguix**
*Vicente Caselles Miralles***

Este trabajo analiza la relación existente entre el consumo mensual de gas y de electricidad en la España peninsular y un conjunto de variables climáticas tales como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la insolación, la presión atmosférica y la velocidad del viento, durante el período 1987-1998. Se ha procedido a caracterizar el comportamiento de todas las variables mediante el análisis de sus perfiles estacionales, tras lo que se han modelizado económicamente ambos consumos, obteniendo estimaciones con una capacidad explicativa del 84 y el 89 por 100, respectivamente. Los resultados constatan que sólo la temperatura media mensual tiene una influencia relevante en los consumos mensuales de gas y electricidad.

Palabras clave: *gas, electricidad, clima, meteorología, consumo de energía, demanda.*

Clasificación JEL: *H42, L94, L95, Q41.*

1. Introducción

Una de las constataciones que puede encontrarse en la literatura es que el consumo de productos energéticos está relacionado en gran medida con la climatología. Esta dependencia tiene una doble cara: se

precisa de la materia prima energética para combatir el frío y para combatir el calor, dependiendo esta relación de las características climáticas de cada zona.

* Departament d'Economia Financera i Matemàtica. Universitat de València.

** Departament de Termodinàmica. Universitat de València.

Los autores agradecen al Institut Valencià d'Investigacions Econòmiques (IVIE) la ayuda económica prestada, en las Convocatorias de Ayudas a la

Investigación en Economía de los años 1999 y 2000, para la realización de este estudio, que se enmarca en un proyecto de investigación impulsado por el mercado de Futuros de Cítricos y Mercaderías (FC&M) de Valencia. También desean expresar su gratitud al Ministerio de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico recibido (Proyecto BEC2000-1388-C04-04), así como al Instituto Nacional de Meteorología y a Red Eléctrica de España por proporcionar los datos climáticos y de demanda eléctrica utilizados en este trabajo.

En este sentido, Valor *et al.* (2001a, b) y Pardo *et al.* (2002) han analizado el comportamiento diario del consumo de electricidad y la temperatura del aire en la España peninsular, y han obtenido que existe una buena relación entre ambas y que ésta no se ve sustancialmente influenciada por otras variables climáticas (viento, radiación solar, humedad relativa, etcétera). A partir de estos resultados, el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis similar para estudiar el comportamiento de la demanda mensual de gas. Los resultados obtenidos se compararán con un análisis paralelo de la demanda mensual de electricidad, estableciendo cuál es el impacto del clima en ambas variables energéticas.

El gas tiene un uso fundamentalmente industrial complementado con los requerimientos necesarios para producir calor destinado a calefacción y agua caliente sanitaria¹. La electricidad es utilizada por motivos industriales, comerciales y domésticos, con un fuerte componente estacional de consumo para producir calor en invierno y para refrigeración en verano.

El trabajo se estructura como sigue. En primer lugar se hace una descripción de las series de datos disponibles. A continuación, se realiza un primer análisis de la relación entre las variables energéticas y los factores climáticos, para proceder a estimar modelos explicativos de las primeras en función de los segundos. Finalmente, se recogen las conclusiones más relevantes.

2. Descripción de los datos

Consumo de gas y electricidad

Las series disponibles representan el consumo mensual de gas y de electricidad totales (sectores indus-

trial, residencial y comercial conjuntamente) a escala peninsular entre los años 1987 y 1998 (144 observaciones)². Los datos de gas (*G*) vienen expresados en toneladas métricas equivalentes de petróleo (*Tm eq.*), y los de electricidad (*E*) en megavatios por hora (*MWh*). El Cuadro 1 muestra los estadísticos descriptivos más relevantes de las series consideradas, que se representan en el Gráfico 1. La primera característica común a observar es la pronunciada tendencia creciente presentada por ambas series, con una estacionalidad más clara en el caso del gas. Sobre estas tendencias aparece un perfil anual estacional que es distinto y característico de cada uno de los dos patrones de consumo. Siguiendo a Valor *et al.* (2001a), este comportamiento puede analizarse calculando los índices de variación estacional mensuales (*IVEM*). Sus valores se muestran en el Gráfico 2, distinguiendo entre el *IVEM* máximo, el mínimo y el medio. Todos ellos están expresados en términos unitarios, de manera que los meses con valores situados por encima (debajo) de la unidad indican consumos superiores (inferiores) al consumo mensual medio del año en toda la muestra.

El consumo de gas presenta valores más elevados en invierno y más bajos en verano, con un brusco descenso en el mes de agosto, destacando la estabilidad del rango de variación estacional entre los perfiles máximo y mínimo. Por su parte, el consumo de electricidad también muestra una marcada estacionalidad, con valores destacados de consumo tanto en invierno como en verano. Comparando los dos perfiles estacionales, se puede decir, en primer lugar, que la variabi-

¹ Entre octubre de 2000 y septiembre de 2001 el consumo de gas natural se distribuyó de la siguiente forma: 77,4 por 100 en uso industrial, 17,4 por 100 en uso doméstico-comercial y 5,2 por 100 destinado a producción de energía eléctrica (*Boletín Estadístico de Hidrocarburos*, septiembre 2001).

² Los datos de consumo de gas corresponden al *Informe Mensual de Coyuntura Industrial* del desaparecido Ministerio de Industria y Energía, y están disponibles en el *Boletín Estadístico del Banco de España*. El consumo de electricidad ha sido facilitado por Red Eléctrica de España. Los datos referentes a las variables climáticas han sido proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM).

CUADRO 1
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS DATOS¹

| | Media | Máximo | Mínimo | Desv. típ. |
|--|--------|---------|--------|------------|
| <i>G</i> (miles Tm eq.) ² | 550 | 1.298 | 122 | 240 |
| <i>E</i> (GWh) ³ | 11.700 | 15.774 | 8.372 | 1.500 |
| <i>ITE</i> (°C) ⁴ | 17 | 26,7 | 7,5 | 6 |
| <i>IVV</i> (km/h) ⁵ | 34 | 44,8 | 23,1 | 4 |
| <i>IHR</i> (%) ⁶ | 64 | 79,4 | 50,5 | 7 |
| <i>IP</i> (hPa) ⁷ | 994 | 1.005,2 | 986,8 | 4 |
| <i>IHS</i> (h) ⁸ | 6,8 | 10,7 | 0,7 | 2,2 |
| <i>IPR</i> (mm) ⁹ | 50 | 195,3 | 4,2 | 40 |

NOTAS: 1: Estadísticos descriptivos de las series de consumo mensual de gas (G) y de electricidad (E) así como de los índices mensuales calculados para las diferentes variables climáticas, correspondientes al período 1987-1998 (144 observaciones): índices de temperatura (ITE), de humedad relativa (IHR), de velocidad del viento (IVV), de presión atmosférica (IP), de precipitación (IPR) y de insolación (IHS).

2: El consumo de gas se determina en toneladas equivalentes de petróleo (Tm eq.).

3: El consumo de electricidad se mide en gigavatios por hora (GWh).

4: La temperatura se mide en grados Celsius (°C).

5: La velocidad del viento se mide en kilómetros por hora (km/h).

6: La humedad relativa se determina en tanto por ciento (%).

7: La presión atmosférica se expresa en hectopascales (hPa).

8: La precipitación se mide en milímetros (mm).

9: La insolación se determina en horas (h).

lidad de la demanda de gas es mayor que la de la electricidad, tanto en términos de su evolución a lo largo del año (la diferencia entre los *IVEM* de enero y agosto es de 0,6 para el gas, y de 0,2 para la electricidad), como de su evolución a lo largo de las muestras respectivas (el gas presenta un mayor rango de variación estacional). De hecho, de los datos del Cuadro 1 se colige que el coeficiente de variación³ del gas es cinco veces mayor que el de la electricidad. Además, los patrones de consumo son claramente diferentes, pues la demanda eléctrica presenta dos máximos a lo largo del año por un solo máximo del gas. Aquéllos se localizan en invierno y en verano, respectivamente, como se puede apreciar en el repunte del mes de julio, mien-

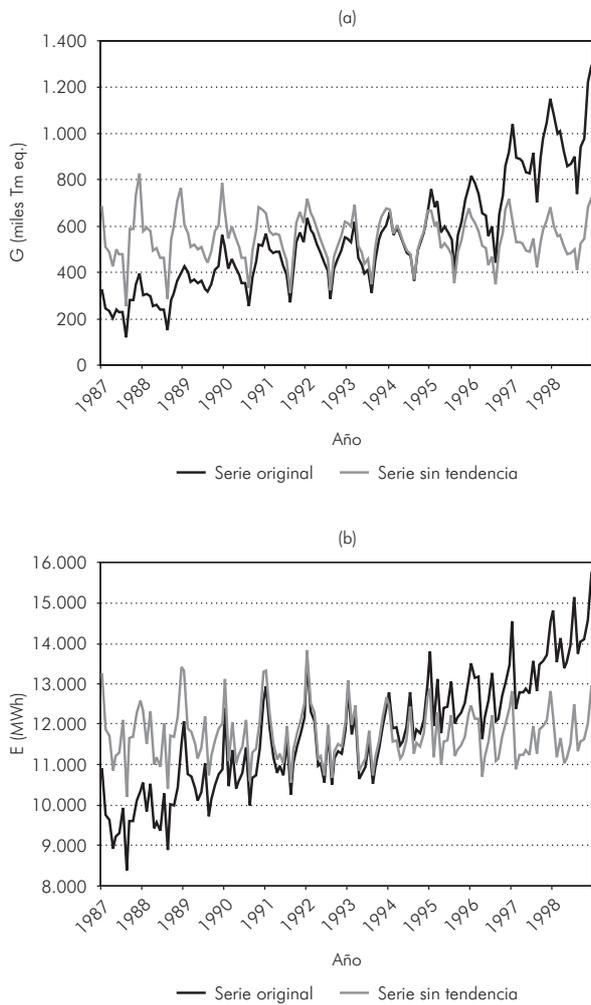
tras que éste se sitúa sólo en invierno. Este comportamiento puede justificarse por el uso dual de la energía eléctrica con fines de calefacción en los meses fríos y de refrigeración en los cálidos, frente a la utilización del gas sólo como fuente energética para calefacción⁴. Por último, cabe señalar que la importante caída del consumo en agosto es una característica común a ambas fuentes de energía, y puede explicarse por el significativo descenso de la actividad económica relacionado con las vacaciones estivales (véase Gráfico 2).

³ El coeficiente de variación se define como el cociente entre la desviación típica y el valor medio de la variable considerada.

⁴ Está previsto un fuerte incremento en la utilización del gas como fuente de generación de energía eléctrica a partir de la puesta en marcha de las centrales de ciclo combinado. Las centrales de este tipo con proyectos iniciados y fecha de incorporación antes del 31-12-2005 suman una potencia de 20.000 MW, siendo la capacidad de generación total del sistema eléctrico de 52.000 MW. De llegar a buen término estos proyectos, el perfil de consumo del gas podría registrar un repunte en fechas estivales para atender la demanda de electricidad. Para más detalles véase Comisión Nacional de la Energía (2001).

GRÁFICO 1

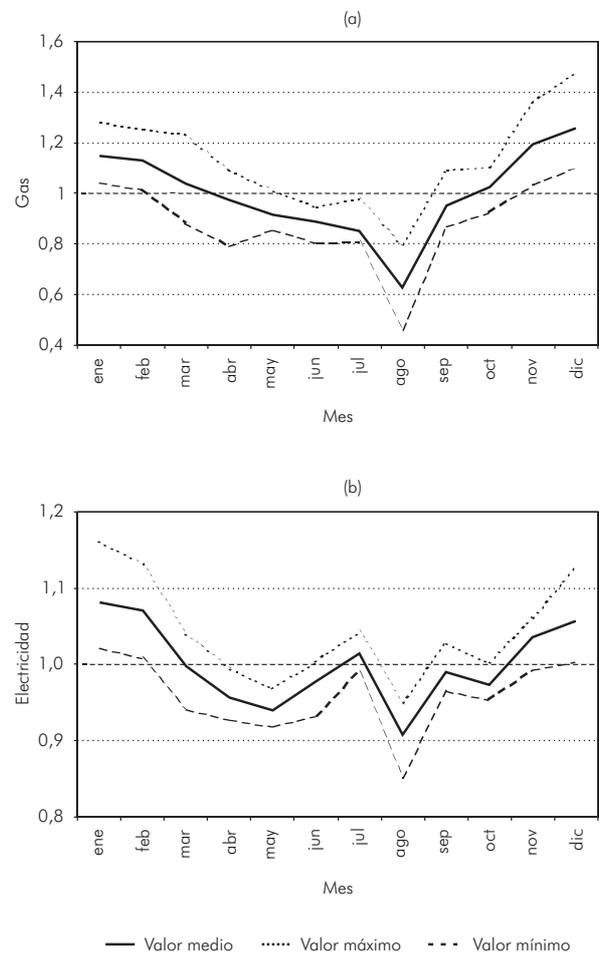
EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE GAS Y DE ELECTRICIDAD, 1987-1998*



NOTA: * Evolución de las series de consumo de gas (a) y de consumo eléctrico (b) mensuales, en el período 1987-1998, antes y después de efectuar la corrección de tendencia definida en la ecuación [2].

GRÁFICO 2

VARIACIÓN ESTACIONAL DE LOS CONSUMOS DE GAS Y ELECTRICIDAD, 1987-1998*



NOTA: * Índices de variación estacional mensuales de los consumos de gas (a) y electricidad (b) a lo largo de los doce meses del año durante el período 1987-1998. Se presentan el valor medio, máximo y mínimo del índice estacional.

Variables climáticas

Hemos considerado diferentes magnitudes que se miden en las estaciones meteorológicas con el fin de contrastar su influencia en los datos de consumo mensuales de gas y de electricidad. En concreto, se han usado los promedios mensuales de la temperatura (°C), la velocidad del viento en la racha máxima diaria (km/h), la humedad relativa (%), la presión atmosférica (hPa), la precipitación total (mm) y la insolación (h)⁵. Dado que los datos de consumo de gas y electricidad no están desagregados regionalmente, se precisa la definición de las variables climáticas de modo que sean capaces de dar cuenta de las variaciones en la demanda a escala peninsular. Por ello, a partir de las medidas realizadas en distintas estaciones distribuidas a lo largo de la Península se han construido, siguiendo a Valor *et al.* (2001b), índices ponderados, siendo el factor de ponderación la población relativa asignada a cada estación de medida⁶. Las

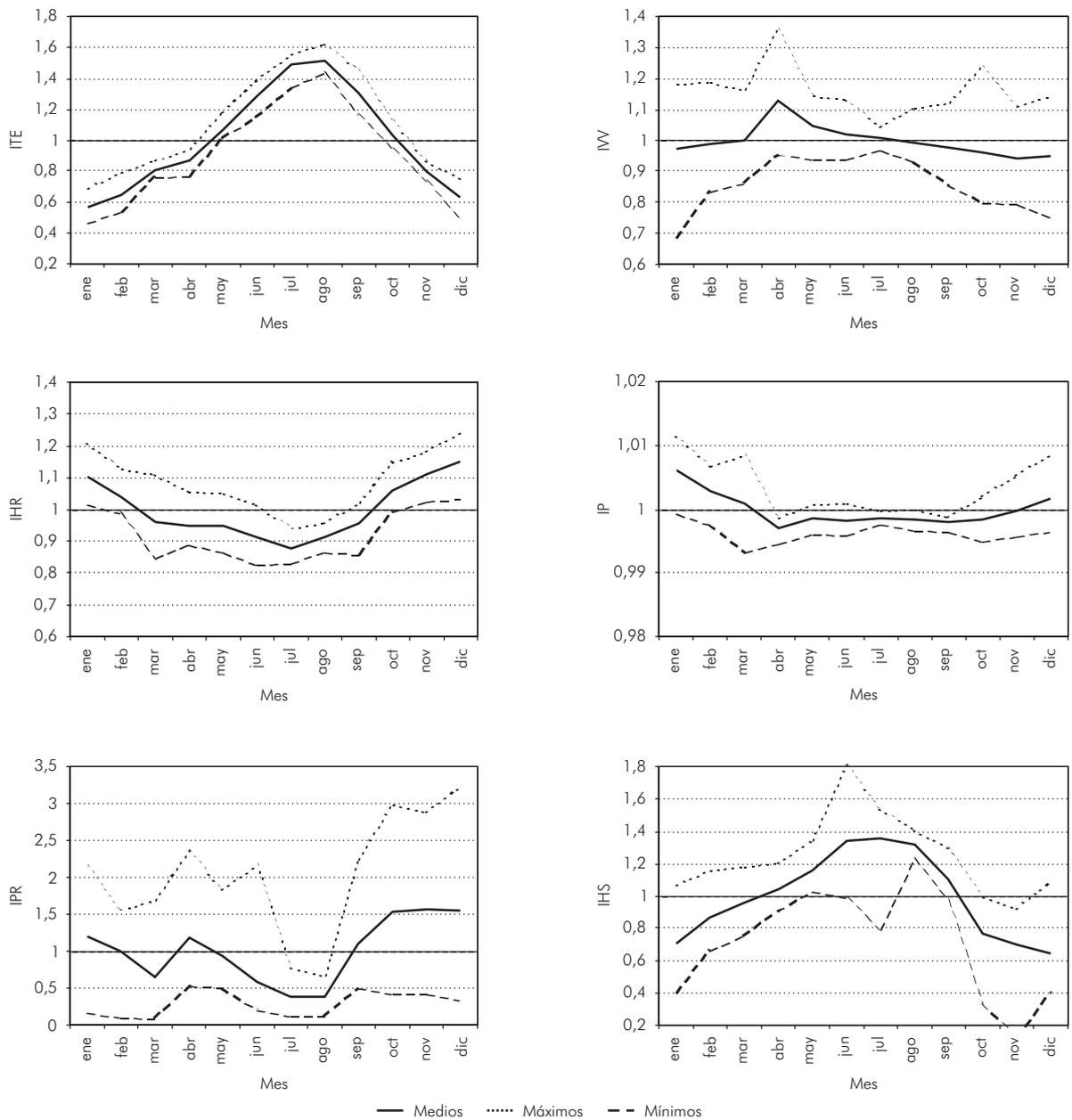
series temporales de los índices de temperatura (*ITE*), de velocidad del viento (*IVV*), de humedad relativa (*IHR*), de presión atmosférica (*IP*), de precipitación (*IPR*), y de insolación (*IHS*) se han calculado determinando primeramente los índices con frecuencia diaria, y posteriormente calculando los promedios o los totales, según el caso, mensuales. En el Cuadro 1 se presentan los estadísticos descriptivos de las series obtenidas, junto con los de la serie de consumo de gas y electricidad. Ninguno de estos índices muestra una tendencia clara.

Con el fin de caracterizar el comportamiento de estas variables, se han calculado sus *IVEM*, cuyos valores medio, máximo y mínimo se presentan en el Gráfico 3. Obsérvese que la temperatura tiene una estacionalidad marcada, con un máximo en verano y valores mínimos en invierno, presentando su rango de variación estacional una gran uniformidad, lo cual demuestra la estabilidad de esta variable a lo largo del período analizado. La velocidad del viento no presenta un comportamiento estacional claro, salvo un máximo en abril, siendo su rango de variación estacional pequeño en los meses de verano, y mayor en primavera e invierno. Por su parte, la humedad relativa tiene un comportamiento estacional opuesto a la temperatura, con un mínimo en verano y un máximo en invierno, siendo sus rangos de variación estacional mayores en primavera y otoño que en el resto del año. La presión atmosférica se revela mucho más estable si consideramos la pequeña fluctuación de su perfil de variación estacional, siendo esta variabilidad mayor los primeros y los últimos meses del año. La precipitación tiene una estacionalidad similar a la de la humedad relativa, pero con dos picos claramente diferenciados en los meses de abril y noviembre. También cabe destacar la magnitud de su rango de variación estacional, y su variación a lo largo de los meses del año, mostrando un comportamiento muy irregular. Por último, la insolación tiene una estacionalidad pareja a la temperatu-

⁵ La temperatura que suele ser relevante en las pautas de consumo es la temperatura del aire, que se mide en grados Celsius (°C). Normalmente se utiliza la temperatura media diaria, calculada como media aritmética de las temperaturas máxima y mínima diarias. La velocidad del viento en la racha máxima determina el máximo valor observado diariamente en esta magnitud, midiéndose en kilómetros por hora (km/h). La humedad relativa determina el contenido de vapor de agua de la atmósfera (en tanto por ciento, %) y contribuye a aumentar la sensación de frío en invierno, y de calor en verano, a una temperatura determinada. La presión atmosférica se mide en hectopascales (hPa), siendo un indicador de las situaciones de estabilidad (altas presiones) y de frentes tormentosos y borrascas (bajas presiones). La precipitación total considera la cantidad de agua de lluvia caída acumulada a lo largo de todo un día, y se mide en milímetros (mm). Finalmente, la insolación representa el número de horas de sol (h) que se registra diariamente.

⁶ Las estaciones meteorológicas se han elegido en Madrid, Valencia, Bilbao y Sevilla. Los índices peninsulares se han calculado como medias aritméticas de los valores obtenidos en las cuatro estaciones de medida, siendo la población asignada a cada una de ellas el factor de ponderación. A efectos de población se han asignado a Madrid las comunidades de Castilla-León, Castilla-La Mancha, Madrid y La Rioja; a Valencia han correspondido Cataluña, Murcia y Valencia; Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Navarra han sido asignadas a Bilbao; y finalmente Sevilla ha sido ponderada con la población de Andalucía y Extremadura.

GRÁFICO 3
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS*



NOTA: * Índices de variación estacional mensuales medios, máximos y mínimos de los diferentes índices climáticos considerados.

ra, aunque con una menor estabilidad, como se deduce de sus mayores rangos de variación estacional, en particular en los meses junio, julio y noviembre.

3. El clima y el consumo de energía

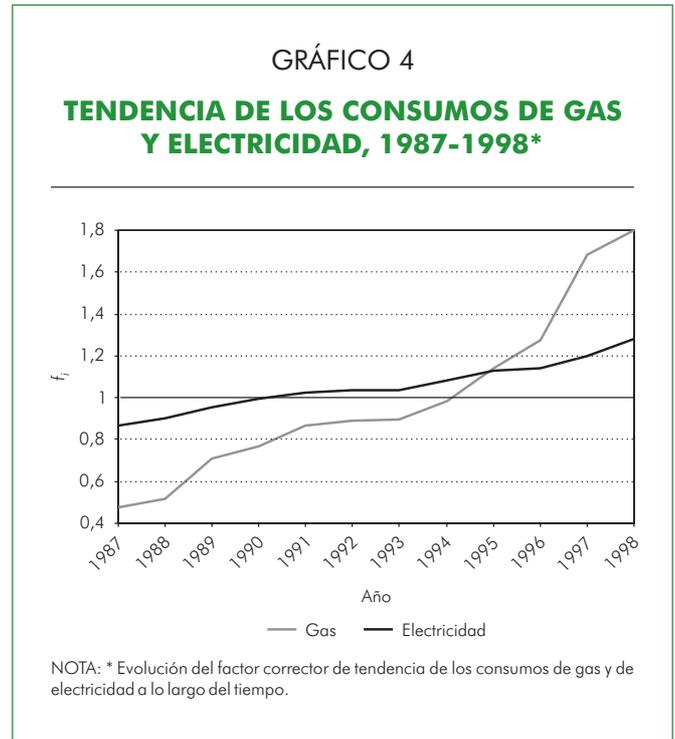
Como se ha podido comprobar, las series de consumo de gas y electricidad muestran una acusada tendencia alcista, que tiene su explicación en el crecimiento de la economía española, mientras que los índices climáticos no presentan una tendencia significativa en ningún sentido. Puesto que el objetivo del trabajo es analizar la parte del patrón de consumo ligada a las variaciones del clima, conviene aislar estos efectos de aquellos de origen distinto. Por esta razón se ha procedido a corregir las series de demanda de gas y electricidad del efecto de la tendencia, como paso previo al análisis de la influencia de los factores climáticos. Para ello se ha utilizado un factor de corrección f_i , similar al usado por Sailor y Muñoz (1997), que recoge dicho efecto:

$$f_i = \frac{\bar{E}_i}{\bar{E}} \quad [1]$$

donde \bar{E}_i es el consumo eléctrico mensual medio del año i y \bar{E} es el consumo eléctrico mensual medio de toda la serie. De este modo, el consumo corregido de tendencia es:

$$E_{cij} = \frac{E_{ij}}{f_i} \quad [2]$$

siendo E_{cij} el consumo eléctrico corregido en el mes i del año j y E_{ij} el consumo original para el mismo mes. La definición de este factor para los datos de consumo de gas es análoga. El Gráfico 4 muestra conjuntamente la evolución de ambos factores de corrección, donde se aprecian períodos de estancamiento (1991-1993) y de mayor crecimiento (1994-1998), que coinciden con



la evolución de la economía española, de un modo más claro en el caso del gas que en el de la electricidad. Esto puede explicarse si tenemos en cuenta el importante incremento experimentado en la implantación de sistemas basados en el uso de gas durante los últimos años, frente a los sistemas eléctricos que ya tenían una implantación más consolidada. Las series resultantes sin tendencia pueden observarse en el Gráfico 1 junto a las series originales.

La comparación de los *IVEM* de las series de consumo por una parte, y de los de las series de índices climáticos por la otra, proporciona una primera indicación de cuáles de éstos pueden ser relevantes en la modelización de los consumos de energía. Con el fin de detectar posibles interrelaciones, se han construido gráficos de dispersión de las variables de demanda de gas y de electricidad frente a cada uno de los índices climáticos considerados, que se mues-

tran en los Gráficos 5 y 6, respectivamente. Con relación al consumo de gas, éste presenta una relación aproximadamente lineal e inversa con el *ITE*, de modo que decrece con el aumento del mismo, indicando la variación del consumo debido al uso de la calefacción y del agua caliente. La variable *IVV* no muestra una relación clara con el consumo, ni tampoco lo hacen *IP* e *IPR*. En cambio, el *IHR* muestra una relación lineal con el consumo, pero en este caso directa, lo que resulta coherente si tenemos en cuenta que un mayor grado de humedad se traduce en una mayor sensación de frío a una temperatura dada. Por su parte, la variable *IHS* presenta una relación lineal inversa al consumo de gas, de modo que un aumento del número de horas de sol coincide con una disminución del consumo. Esta relación es parecida a la mostrada con el *ITE*, lo que podría conllevar problemas de multicolinealidad entre estas variables, cosa que habrá de comprobarse en la modelización (véase Gráfico 5).

En el caso de la demanda de electricidad las características observadas son similares excepto por el hecho de que la relación con el *ITE* es claramente no lineal, de modo que por debajo de un cierto umbral que podría situarse alrededor de 18 °C (Valor *et al.*, 2001a) el consumo eléctrico aumenta con la disminución del *ITE* (relación inversa), mientras que por encima del umbral el comportamiento es el contrario (relación directa). La explicación de este comportamiento se encuentra en el uso dual de la energía eléctrica, que puede utilizarse tanto con fines de calefacción en invierno, como para aire acondicionado en verano, lo que no sucede con el gas (véase Gráfico 6).

En la sección siguiente se contrastan los comportamientos aquí observados mediante la obtención de modelos explicativos del consumo de gas y electricidad.

4. Modelización de los consumos de gas y electricidad

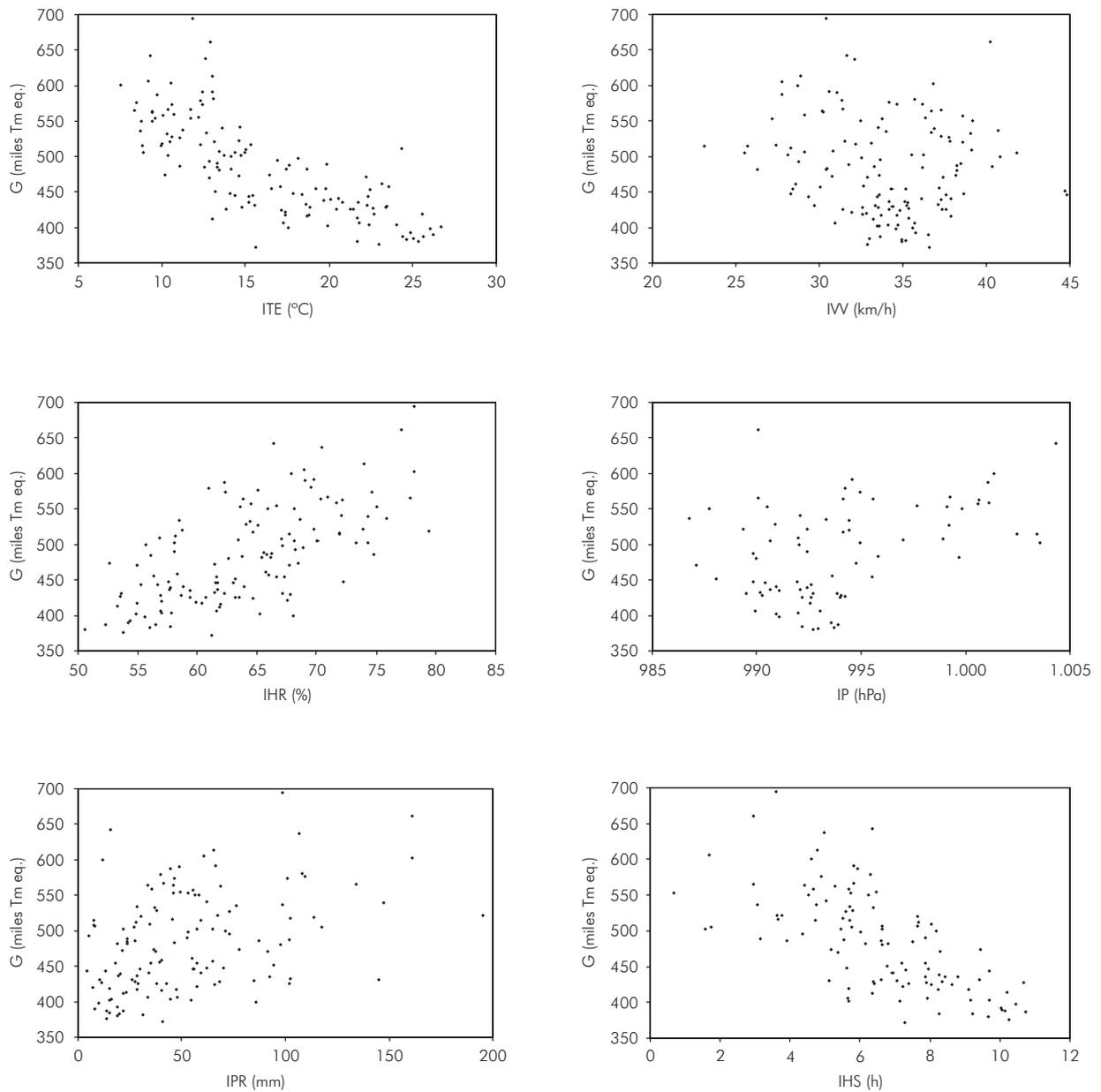
Con el fin de precisar la relación existente entre los índices climáticos y el consumo de gas y de electricidad, se plantea la estimación de dos modelos económicos. Las variables a explicar son los consumos de gas y de electricidad mensuales en España, y las variables explicativas son las magnitudes climáticas presentadas en los apartados anteriores, además de las variables ficticias correspondientes a cada uno de los meses del año, recogiendo así el carácter estacional de ambos consumos⁷. La autocorrelación de los residuos del modelo se ha tratado mediante la modelización Box-Jenkins.

Los grados-mes

Respecto de las variables climáticas es importante realizar unas precisiones en cuanto a la utilización de la variable temperatura a través del *ITE*. Ésta no puede incorporarse directamente en modelos de regresión lineal explicativos del consumo de electricidad, puesto que la relación detectada entre ambas en el apartado 3 es claramente no lineal, como se deduce de la correspondiente figura de dispersión (véase el Gráfico 6). Para especificar correctamente el modelo en este caso existen dos alternativas. Una primera consiste en utilizar dos modelos distintos, uno para los datos cuyo *ITE* sea superior a una temperatura de referencia dada (ITE_{ref}), que marque el cambio de tendencia en el patrón de consumo eléctrico, y otro para el resto. La otra posibilidad, que permite la especificación de un modelo único para toda

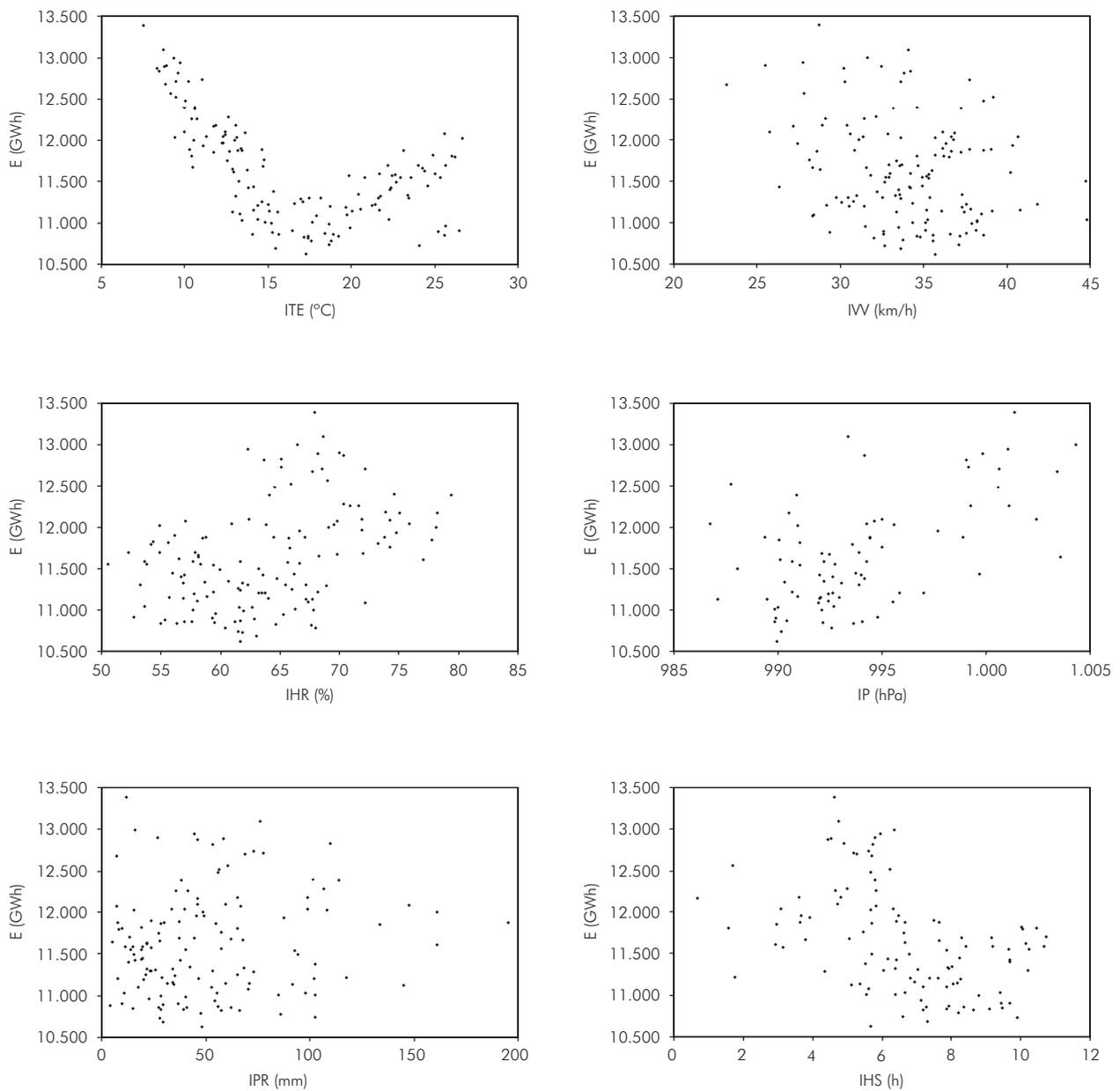
⁷ Alternativamente al uso de variables ficticias puede optarse por incorporar este patrón estacional a través de funciones sinusoidales. Véase TORRÓ *et al.* (2001) para la serie diaria del *ITE*.

GRÁFICO 5
CONSUMO DE GAS FRENTE A LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS*



NOTA: * Gráficos de dispersión del consumo de gas mensual frente a los valores mensuales de los diferentes índices climáticos considerados.

GRÁFICO 6
CONSUMO DE ELECTRICIDAD FRENTE A LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS*



NOTA: * Gráficos de dispersión del consumo de electricidad mensual frente a los valores mensuales de los diferentes índices climáticos considerados.

la serie, se basa en hacer uso de una variable derivada de la temperatura y que a la vez sea capaz de separar ambos comportamientos. Con ese fin se puede usar el concepto de grados-día, que se define como la diferencia entre la temperatura media diaria del aire y la temperatura de referencia ya mencionada, la cual representa físicamente aquella temperatura a la cual no se utilizan ni los aparatos de aire acondicionado ni los de calefacción (la temperatura de confort para algunos autores). Así definida, la variable grados-día toma valores positivos cuando la temperatura real supera la de referencia, y valores negativos en caso contrario. Para evitar esa dualidad, se suelen usar dos variables grados-día diferentes, definidas ambas positivamente: los grados-día calor (*GDC*) como $GDC = \max(ITE_{ref} - ITE; 0)$, y los grados-día frío (*GDF*), como $GDF = \max(ITE - ITE_{ref}; 0)$. De este modo, los *GDC* darán cuenta de la variación del consumo en los días de frío, mientras que los *GDF* explicarán el patrón de consumo los días calurosos, todo ello dentro de un único modelo.

La temperatura de referencia a usar depende, en principio, de cada zona en particular debido a las características climáticas, a las técnicas de edificación utilizadas, e incluso al comportamiento de los agentes frente al frío y el calor propios de cada una de ellas. La figura correspondiente al *ITE* en el Gráfico 6 indica que la estructura de consumo eléctrico cambia entre 15 °C y 20 °C, situándose la temperatura de referencia (ITE_{ref}) más adecuada alrededor de los 18 °C para el caso de España (Valor *et al.*, 2001a).

Las variables *GDF* y *GDC* propuestas se obtienen diariamente y son, por tanto, útiles cuando se trata de explicar los patrones de consumo de frecuencia diaria. Con el fin de disponer de variables mensuales, adecuadas para el tipo de datos analizado en este trabajo, los grados-día calculados se han acumulado de forma aditiva durante todos los días de cada mes, dando lugar a las variables grados-mes calor (*GMC*) y grados-mes frío

(*GMF*). El Cuadro 2 presenta la distribución de valores de los grados-mes calor y frío en la serie analizada. Se observa la complementariedad de los datos: los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre sólo muestran valores no nulos para los grados-mes calor; los meses de junio, julio, agosto y septiembre prácticamente sólo presentan valores no nulos para los grados-mes frío; y los restantes (abril, mayo y octubre) son una transición entre estaciones climáticas. Los datos acumulados por años indican la intensidad del frío y del calor en inviernos y veranos. El invierno más frío se dio en 1991 y el más suave en 1997; por su parte, el verano más caluroso fue el de 1990 y el más fresco el de 1993.

Estas nuevas variables (*GMC* y *GMF*) son las que se han considerado en la modelización del consumo de electricidad. Aunque en el caso del gas no es necesaria esta distinción, también se han usado estas mismas variables a efectos comparativos entre los consumos de las dos fuentes de energía. Las restantes variables climáticas son utilizadas en su forma primitiva, dado que no muestran una relación no lineal con los datos de consumo a la vista de las figuras del Gráfico 6.

Metodología de modelización

La metodología utilizada en la modelización económica difiere de la planteada por otros trabajos que han estudiado el consumo eléctrico y de gas con frecuencia mensual, tales como son el de Sailor y Muñoz (1997) y Lam (1998). En nuestro caso se incorporan de forma progresiva, y en el orden enunciado previamente, las diferentes variables explicativas, determinando, en cada caso, la necesidad de mantener cada variable en el modelo en función de su nivel de significatividad individual (*t-student*). Este método de selección de modelos ha sido aplicado previamente por Engle *et al.* (1992) y Peirson y Henley (1994) para la modelización de la demanda eléctrica diaria.

CUADRO 2

DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS GRADOS-MES, 1987-1998*

Grados-mes calor: $GMC_{ij} = \sum_{k=1}^{n_j} \max(18 - ITE_{ijk}; 0)$ $i = \text{año}; j = \text{mes}; k = \text{día del mes}, n_j = \text{n.º días mes } j$

| Año | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Anual |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1987 | 296 | 218 | 153 | 73 | 32 | 1 | 0 | 0 | 0 | 49 | 161 | 191 | 1.173 |
| 1988 | 213 | 223 | 146 | 98 | 31 | 1 | 0 | 0 | 1 | 22 | 148 | 269 | 1.154 |
| 1989 | 282 | 194 | 129 | 143 | 8 | 3 | 0 | 0 | 0 | 7 | 100 | 157 | 1.024 |
| 1990 | 265 | 127 | 134 | 136 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 167 | 299 | 1.171 |
| 1991 | 286 | 260 | 159 | 140 | 69 | 0 | 0 | 0 | 4 | 88 | 167 | 249 | 1.420 |
| 1992 | 325 | 240 | 166 | 90 | 18 | 13 | 0 | 0 | 3 | 82 | 115 | 232 | 1.283 |
| 1993 | 285 | 235 | 176 | 118 | 30 | 0 | 0 | 0 | 7 | 97 | 188 | 236 | 1.371 |
| 1994 | 266 | 206 | 111 | 123 | 23 | 0 | 0 | 0 | 9 | 24 | 98 | 225 | 1.084 |
| 1995 | 246 | 162 | 150 | 85 | 6 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 102 | 193 | 948 |
| 1996 | 208 | 248 | 169 | 78 | 50 | 0 | 0 | 0 | 2 | 31 | 147 | 231 | 1.165 |
| 1997 | 248 | 143 | 86 | 54 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 131 | 229 | 926 |
| 1998 | 236 | 159 | 105 | 111 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 150 | 273 | 1.099 |
| Media. | 260 | 200 | 140 | 110 | 30 | 2 | 0 | 0 | 3 | 40 | 140 | 240 | 1.250 |
| Desv. est. . . | 30 | 50 | 30 | 30 | 20 | 4 | 0 | 0 | 3 | 30 | 30 | 40 | 150 |

Grados-mes frío: $GMF_{ij} = \sum_{k=1}^{n_j} \max(ITE_{ijk} - 18; 0)$ $i = \text{año}; j = \text{mes}; k = \text{día del mes}, n_j = \text{n.º días mes } j$

| Año | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Anual |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1987 | 0 | 0 | 0 | 3 | 13 | 111 | 187 | 219 | 189 | 16 | 0 | 0 | 738 |
| 1988 | 0 | 0 | 2 | 2 | 13 | 59 | 199 | 219 | 128 | 27 | 0 | 0 | 650 |
| 1989 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | 132 | 254 | 246 | 98 | 30 | 0 | 0 | 794 |
| 1990 | 0 | 0 | 1 | 0 | 36 | 131 | 237 | 241 | 164 | 24 | 0 | 0 | 834 |
| 1991 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 127 | 228 | 261 | 166 | 5 | 0 | 0 | 810 |
| 1992 | 0 | 0 | 0 | 2 | 56 | 33 | 218 | 231 | 116 | 8 | 0 | 0 | 664 |
| 1993 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 110 | 205 | 217 | 83 | 4 | 0 | 0 | 628 |
| 1994 | 0 | 0 | 0 | 7 | 36 | 138 | 269 | 262 | 92 | 21 | 0 | 0 | 826 |
| 1995 | 0 | 0 | 0 | 1 | 57 | 111 | 249 | 235 | 74 | 57 | 3 | 0 | 787 |
| 1996 | 0 | 0 | 0 | 2 | 24 | 149 | 213 | 189 | 65 | 14 | 0 | 0 | 655 |
| 1997 | 0 | 0 | 0 | 13 | 38 | 103 | 173 | 224 | 154 | 74 | 0 | 0 | 778 |
| 1998 | 0 | 0 | 0 | 2 | 18 | 140 | 235 | 238 | 133 | 7 | 0 | 0 | 775 |
| Media. | 0 | 0 | 0,3 | 3 | 30 | 110 | 220 | 232 | 120 | 24 | 0,3 | 0 | 750 |
| Desv. est. . . | 0 | 0 | 0,7 | 4 | 16 | 30 | 30 | 20 | 40 | 22 | 0,9 | 0 | 70 |

NOTA: * Se muestran los grados-mes para cada mes de los años estudiados. Las dos últimas filas contienen la media y la desviación estándar para cada mes, indicando la intensidad del frío y del calor respectivamente en cada uno de ellos así como su variabilidad. La última columna muestra los valores acumulados por año, siendo indicativos de la intensidad del frío en cada invierno, y la del calor en cada verano.

La selección del modelo más apropiado en cada caso se realiza verificando que a medida que se incorporan las diferentes variables explicativas, la estimación resultante supone una mejora con respecto al modelo previo, es decir, que cada vez son menores los valores correspondientes a los criterios de información de Akaike (*AIC*) y Schwarz (*SC*), que el coeficiente de determinación corregido cada vez es mayor, y que los residuos del modelo definitivo no presentan problemas de autocorrelación (medido a través del estadístico *Q* de Ljung-Box). Además, las estimaciones se han realizado considerando la corrección propuesta por Newey y West (1987) que proporciona estimadores consistentes ante la presencia de autocorrelación y heteroscedasticidad.

Modelo de consumo de gas

El modelo estimado tiene la siguiente expresión:

$$G_t = \alpha_0 + \alpha_1 GMC_t + \alpha_2 GMF_t + \alpha_3 IVV_t + \alpha_4 IHR_t + \alpha_5 IP_t + \alpha_6 IPR_t + \alpha_7 IHS_t + \sum_h \beta_h M_{ht} + \varepsilon_t \quad [3]$$

$$\varepsilon_t = \frac{\theta(L)}{\phi(L)} \xi_t$$

en la que: G_t es el consumo de gas, GMC_t son los grados-mes calor, GMF_t los grados-mes frío, IVV_t el índice de velocidad del viento, IHR_t el índice de humedad relativa, IP_t el de la presión atmosférica, IPR_t el de la precipitación, IHS_t el índice de insolación, M_{ht} la variable ficticia que toma valor 1 en el mes h (h = enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre, diciembre; el mes de agosto se toma como base) y valor 0 en el resto, y $\theta(L)$ y $\phi(L)$ recogen los polinomios autorregresivos y de medias móviles, respectivamente.

En el Cuadro 3 se presenta el modelo finalmente estimado usando el método de mínimos cuadrados ordinarios, tras seguir el análisis con los criterios establecidos previamente. Dicho modelo explica el comportamiento de la demanda de gas mensual durante el período 1987-1998. Se observa que de las dos variables explicativas relacionadas con el *ITE* sólo son significativos los grados-mes calor, indicativo de la sensibilidad del consumo de gas ante temperaturas bajas, como se ha apuntado con anterioridad. Además, ninguno de los restantes índices climáticos resulta significativo. En lo que respecta a la estacionalidad, ésta se ha contrastado mediante la inclusión en el modelo de variables ficticias. Una vez se han solucionado las deficiencias de la estimación, debidas a problemas de autocorrelación de los residuos, se observa que el modelo definitivo explica el 84 por 100 del comportamiento del consumo de gas, indicativo del buen nivel de ajuste alcanzado. Los resultados obtenidos para las variables ficticias constatan el comportamiento estacional detectado previamente en el estudio de los índices de variación estacional [véase Gráfico 2(a)].

Modelo de consumo eléctrico

Siguiendo un esquema similar, se ha procedido a la estimación de un modelo para el consumo de electricidad mensual. El modelo estimado coincide con el de la ecuación [3], pero en este caso la variable dependiente es el consumo eléctrico mensual (E_t). En el Cuadro 4 se presenta la estimación del modelo que explica en mejor medida el comportamiento de la demanda eléctrica mensual durante el período 1987-1998. Del mismo se desprende que sólo las variables relacionadas con el *ITE* son significativas, destacando el valor del coeficiente de los grados-mes calor sobre los grados-mes frío, indicativo de la mayor respuesta del consumo eléctrico a temperaturas bajas. Una vez se han

CUADRO 3
ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE GAS MENSUAL, 1987-1998*

| Variable | Coefficiente | Error Est. | Estadístico t | Prob. |
|-----------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------|-------|
| C | 351 | 15 | 23,05 | 0,00 |
| GMC | 0,39 | 0,13 | 2,94 | 0,00 |
| Enero | 190 | 40 | 4,62 | 0,00 |
| Febrero | 150 | 30 | 4,28 | 0,00 |
| Marzo | 170 | 30 | 6,12 | 0,00 |
| Abril | 130 | 30 | 5,21 | 0,00 |
| Mayo | 149 | 22 | 6,91 | 0,00 |
| Junio | 129 | 21 | 6,22 | 0,00 |
| Julio | 125 | 18 | 6,83 | 0,00 |
| Septiembre | 162 | 18 | 8,85 | 0,00 |
| Octubre | 204 | 21 | 9,55 | 0,00 |
| Noviembre | 240 | 30 | 8,67 | 0,00 |
| Diciembre | 260 | 40 | 7,10 | 0,00 |
| AR(1) | 0,28 | 0,08 | 3,27 | 0,00 |
| MA(12) | 0,31 | 0,08 | 3,82 | 0,00 |
| R ² | 0,86 | Media var. depend. | | 550 |
| R ² Ajustado | 0,84 | Error Est. var. depend. | | 100 |
| Error Est. regresión | 40 | AIC | | 10,27 |
| LMV | -719,49 | SC | | 10,58 |
| DW | 1,99 | Estadístico F | | 55,44 |
| | <i>k</i> | <i>r_k</i> | p-valor ¹ | |
| | 12 | 9,9726 | 0,443 | |
| | 24 | 20,458 | 0,554 | |
| | 36 | 36,153 | 0,368 | |

NOTAS: * LMV indica el logaritmo de la función de máxima verosimilitud; DW recoge el valor del estadístico Durbin-Watson; AIC indica el Criterio de Información de Akaike y SC el criterio de Schwarz. Las estimaciones se han realizado mediante mínimos cuadrados ordinarios teniendo en cuenta la corrección de Newey-West (1987).

¹ Nivel de significación crítico correspondiente al estadístico Q Ljung-Box.

solucionado las deficiencias de la estimación debidas a problemas de autocorrelación de los residuos, se observa que el modelo definitivo explica un 89 por 100 del comportamiento del consumo eléctrico.

Respecto de las variables ficticias, se toma como base agosto. Tras la estimación resulta que febrero y abril no son significativas, a diferencia de los resultados ob-

tenidos para el gas. Salvando esta diferencia, el patrón estacional recogido en ambas estimaciones con variables ficticias es claramente significativo. Ha de tenerse en cuenta, sin embargo, que las variables ficticias y los grados-mes aportan parcialmente información común al modelo, ya que ambas reflejan el comportamiento estacional de las pautas de consumo. La estimación in-

CUADRO 4
ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO MENSUAL, 1987-1998*

| Variable | Coefficiente ($\times 10^{-4}$) | Error Est. ($\times 10^{-4}$) | Estadístico t | Prob. |
|---|-----------------------------------|--|----------------------|-------|
| C | 998 | 13 | 79,68 | 0,00 |
| GMC | 0,86 | 0,07 | 12,64 | 0,00 |
| GMF | 0,43 | 0,06 | 6,88 | 0,00 |
| Enero | 69 | 12 | 5,92 | 0,00 |
| Marzo | 72 | 8 | 8,59 | 0,00 |
| Mayo | 82 | 11 | 7,39 | 0,00 |
| Junio | 79 | 11 | 6,96 | 0,00 |
| Julio | 119 | 10 | 11,65 | 0,00 |
| Septiembre | 96 | 11 | 8,72 | 0,00 |
| Octubre | 120 | 13 | 8,98 | 0,00 |
| Noviembre | 79 | 12 | 6,59 | 0,00 |
| Diciembre | 65 | 13 | 5,13 | 0,00 |
| AR(1) | $0,35 \times 10^{-4}$ | $0,09 \times 10^{-4}$ | 4,14 | 0,00 |
| AR(12) | $0,23 \times 10^{-4}$ | $0,09 \times 10^{-4}$ | 2,64 | 0,01 |
| R ² | 0,90 | Media var. depend. ($\times 10^{-4}$) | | 1.170 |
| R ² Ajustado | 0,89 | Error Est. var. depend. ($\times 10^{-4}$) | | 70 |
| Error Est. regr. ($\times 10^{-4}$) | 23 | AIC | | 27,61 |
| LMV | -1.808,02 | SC | | 27,91 |
| DW | 2,07 | Estadístico F | | 79,10 |
| | <hr/> | <hr/> | <hr/> | <hr/> |
| | k | r_k | p-valor ¹ | |
| | 12 | 7,4467 | 0,683 | |
| | 24 | 18,698 | 0,664 | |
| | 36 | 23,246 | 0,918 | |

NOTAS: * LMV indica el logaritmo de la función de máxima verosimilitud; DW recoge el valor del estadístico Durbin-Watson; AIC indica el Criterio de Información de Akaike y SC el criterio de Schwarz. Las estimaciones se han realizado mediante mínimos cuadrados ordinarios teniendo en cuenta la corrección de Newey-West (1987).

¹ Nivel de significación crítico correspondiente al estadístico Q Ljung-Box.

dependiente del modelo con las variables ficticias solamente, proporciona unos coeficientes con una interpretación más coherente, pero supone una clara disminución en la capacidad explicativa. Esto mismo se observa cuando la modelización se realiza con los grados-mes por separado. Ello lleva a pensar que ambos tipos de variables proporcionan al modelo información solapada en parte (lo que dificulta la interpretación directa de

los parámetros de las variables ficticias), pero también aportan información separada e independiente, lo que produce un aumento significativo de la capacidad explicativa del modelo cuando ambas variables se usan conjuntamente. Por ello se ha optado, finalmente, por presentar el modelo completo por ser el que mejores resultados proporciona, teniendo presente las limitaciones expuestas a la hora de su interpretación.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la influencia del clima en el consumo de gas y de electricidad en España a escala peninsular, usando series de datos mensuales que presentan tendencia y una clara estacionalidad con consumos máximos en invierno y mínimos en verano en el gas, y máximos en invierno y en verano en la electricidad.

Los gráficos de dispersión que relacionan las variables climáticas con los consumos de las dos variables energéticas demuestran que puede existir una relación con las variables *ITE*, *IHR* e *IHS*, no observándose dependencia alguna con el resto. En el caso de la variable *ITE*, se ha procedido a obtener las variables derivadas grados-mes frío y grados-mes calor a la vista de la no linealidad de su relación con el consumo de electricidad, sobre cuya evolución a lo largo del período analizado se ha proporcionado información relevante.

La modelización del consumo de gas indica que únicamente el *ITE* es significativo y, además, sólo en términos de grados-mes calor, puesto que la variable explicada responde a variaciones de temperatura en el invierno pero no en el verano. Esto resulta coherente con el hecho que el gas es utilizable en calefacción, y no en sistemas de refrigeración.

Por último se ha procedido a modelizar la demanda de electricidad, obteniendo que de todos los índices climáticos únicamente resulta significativo el *ITE*, tanto en términos de grados-mes frío como grados-mes calor, dada la relación no lineal entre ambas variables. Este resultado se corresponde con la utilización dual

de la energía eléctrica para producir calor en invierno y frío en verano.

Referencias bibliográficas

- [1] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2001): «Informe Marco sobre la demanda de energía eléctrica y gas natural, y su cobertura» (Aprobado por el consejo de administración de 20 de diciembre de 2001), www.cne.es.
- [2] ENGLE, R. F.; MUSTAFA, C. y RICE, J. (1992): «Modelling Peak Electricity Demand», *Journal of Forecasting*, volumen 11, páginas 241-251.
- [3] LAM, J. C. (1998): «Climatic and Economic Influences on Residential Electricity Consumption», *Energy Conversion and Management*, volumen 39, número 7, páginas 623-629.
- [4] NEWEY, W. y WEST, K. (1987): «A Simple Positive Semi-definite, Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent Covariance Matrix», *Econometrica*, volumen 55, páginas 703-708.
- [5] PARDO, A.; MENEU, V. y VALOR, E. (2002): «Temperature and Seasonality Influences on Spanish Electricity Load», *Energy Economics*, volumen 24, páginas 55-70.
- [6] PEIRSON, J. y HENLEY, A. (1994): «Electricity Load and Temperature. Issues in Dynamic Specification», *Energy Economics*, volumen 16, número 4, páginas 235-243.
- [7] SAILOR, D. J. y MUÑOZ, J. R. (1997): «Sensitivity of Electricity and Natural Gas Consumption to Climate in the USA-methodology and Results for Eight States», *Energy*, volumen 22, número 10, páginas 987-998.
- [8] TORRÓ, H.; MENEU, V. y VALOR, E. (2001): «Single Factor Stochastic Models with Seasonality Applied to Underlying Weather Derivatives Variables», *Documento de Trabajo del IVIE*, WP-EC 2001-22, 28 páginas.
- [9] VALOR, E.; MENEU, V. y CASELLES, V. (2001a): «Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain», *Journal of Applied Meteorology*, volumen 40, número 8, páginas 1413-1421.
- [10] VALOR, E.; PARDO, A.; MENEU, V. y CASELLES, V. (2001b): «Consumo eléctrico y meteorología», *Revista Española de Física*, volumen 15, número 4, páginas 21-27.