

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA RESIDENCIAL

Jadraque, E.^(P); Ordoñez, J.; Alegre, J.; Martínez, G.

Abstract

Energy certification of buildings is a requirement under Directive 2002/91/EC. Regarding energy certification, partially transposing this directive into Spanish law through Royal Decree 47/2007 of January 19, which approves the basic procedure for the certification of energy efficiency of new buildings. This article analyzes and compares three models for estimating energy demand. This study aims to develop an optimization model of energy consumption in residential buildings in order to identify potential savings and implement improvement measures to enable more efficient energy consumption in each building and the identification of potential incorporate energy.

Keywords: Energy certification. Energy efficiency. Energy consumption.

Resumén

La Certificación Energética de los Edificios es una exigencia derivada de la Directiva 2002/91/CE. En lo referente a la certificación energética, esta Directiva se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. El presente artículo analiza y compara tres modelos de estimación de la demanda de energía. Este estudio tiene como finalidad el desarrollo de un modelo de optimización del consumo energético en los edificios residenciales con el fin de identificar potenciales ahorros y llevar a cabo medidas de mejora que permitan eficientizar el consumo de energía en cada edificio así como la identificación del potencial de incorporar energías.

Palabras clave: Certificación energética. Eficiencia energética. Consumo energético. Sector residencial.

1. Introducción

La edificación en Europa, representa más del 40 % del consumo final de energía de los Estados miembros de la Unión Europea (UE), de los cuales el uso residencial representa el 63 % del consumo total de energía. En consecuencia, un aumento en las políticas encaminadas a la construcción de edificios energéticamente eficientes podría constituir un importante instrumento en los esfuerzos para aliviar la dependencia de las importaciones de energía de los países que constituyen la UE (actualmente en torno al 48 %) y cumplir con el Protocolo de Kyoto para reducir las emisiones de dióxido de carbono [1]; [2]. Todo ello dentro de las exigencias marcadas por la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios [3].

Por otro lado, la insostenibilidad del actual modelo de producción-consumo de energía pone de manifiesto el carácter limitado de los recursos energéticos convencionales, así como la degradación del medio ambiente resultado de este modelo [4]; [5].

Las reservas actuales de petróleo y gas natural solo pueden cubrir el consumo de energía para los próximos 40 años en el caso del petróleo, y para 60 años en el caso del gas natural [5].

El aumento del uso y promoción de energías renovables parece una solución viable para los problemas producidos en el medio ambiente por otras fuentes de energía [2]. Por esta razón, las políticas actuales se centran en fomentar el desarrollo y uso de las energías renovables en Europa [6].

En España el sector de la edificación residencial consume el 10 % (10.793 ktep.) del consumo de energía total [7].

En el año 1998 se desarrolló la primera investigación detallada y profunda sobre la demanda eléctrica en España. Los datos de este proyecto y la descripción de los rasgos y pautas del uso de la energía eléctrica y su evolución hasta la fecha de inicio del funcionamiento del mercado de electricidad, el 1 de enero de 1998, quedaron reflejados en la publicación denominada "Atlas de Demanda Eléctrica Española. Proyecto INDEL"[8].

La importancia que tiene en el consumo de energía eléctrica la edificación residencial, justifica el desarrollo de modelos que permitan obtener la estructura por usos (climatización, electrodomésticos, iluminación, agua caliente sanitaria,...) de dicho consumo. Diversos autores han desarrollado modelos que tienen este objetivo: Y. Yamaguchi y otros., 2007 [9], John E. Seem., 2005 [10], Adil Al-Mumin y otros., 2003 [11], Linda Farinaccio y otros., 1999 [12], Yoshiyuki Shimoda y otros., 2006 [13].

2. Análisis de tres modelos de consumo de energía en el sector residencial

El consumo de energía del sector residencial, por sus características, es complejo. Por ello, se necesitan modelos para evaluar el impacto de la adopción de la eficiencia energética y las tecnologías de energía renovable adecuadas para aplicaciones residenciales.

Los autores Swan L.G. y Ugursal V.I. ofrecen una revisión actualizada de las diversas técnicas de modelado del consumo de energía en el sector residencial. Esta revisión se realiza bajo dos enfoques [14]:

1. **Descendente:** Trata al sector de la vivienda como un sumidero de energía y no se refiere a los distintos usos finales. Utiliza los valores históricos de la energía total y retrocede al consumo de energía de las viviendas en función de variables de nivel superior como los indicadores macroeconómicos (PIB, desempleo, Inflación...), los precios de la energía y el clima.(Ver figura 1)
2. **Ascendente:** Extrapola la estimación del consumo de energía de un conjunto representativo del sector residencial a nivel regional y nacional, y se compone de dos tecnologías: el método estadístico y el método de ingeniería. Cada método se basa en diferentes niveles de entrada de información, de simulación o técnicas de cálculo deferentes, y proporcionan resultados con diferentes aplicaciones.(Ver figura 1)

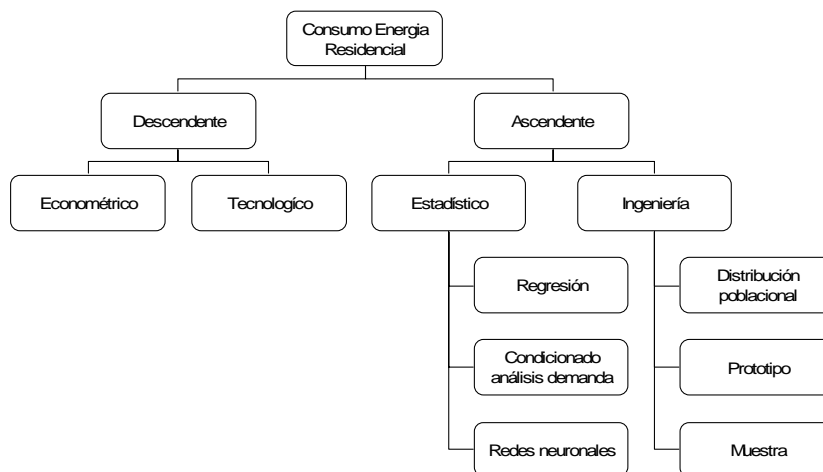


Figura 1. Técnicas de modelado descendente y ascendente para la estimación regional y nacional del consumo de energía en el sector residencial. Fuente: Swan LG, Ugursal VI. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renew Sustain Energy Rev (2009).

A continuación se analizan tres modelos de consumo de energía residencial, dos de ellos incluidos en el Atlas de Demanda Eléctrica Española del proyecto INDEL y otro desarrollado por Shimoda y otros [15].

2.1. Atlas de demanda eléctrica española. Proyecto INDEL

El Atlas de la Demanda Eléctrica del proyecto INDEL trata de definir donde se encuentran las claves de evolución de la demanda. Analizando la demanda del sector residencial, el Atlas parte de la información aportada por una muestra de consumidores compuesta por 1.500 hogares principales, representativos de la población peninsular, y que han aportado información sobre su consumo, equipamiento y uso de la energía desde 1988 [8].

Su consumo horario se midió mediante un sistema constituido por equipos registradores de potencia durante el periodo 1991-1997. El número de hogares colaboradores con el Proyecto fue de 5.467. Por medio de un cuestionario se realizó una segmentación de la población española según estilos de vida y se hizo un estudio de las actitudes y conductas respecto al medio ambiente y el consumo energético de los diferentes grupos [8]. Las conclusiones se lograron aplicando dos metodologías de análisis matemático:

1. Análisis de la Evolución.
2. Explicación de la Curva de Carga por Usos.

Estas metodologías de análisis de la demanda de energía se engloban dentro de los métodos ascendentes estadísticos, clasificados a su vez en modelos de regresión, condicionados al análisis de la demanda y neuronales[14], y han sido desarrollados por diversos autores Hirst y otros.[16], Raffio y otros.[17], Parti and Parti [18], Aigner y otros. [19], Caves y otros. [20], Kreider and Habetr [21], Issa y otros. [22].

La metodología para el Análisis de la Evolución, ayuda a comprender los factores que influyen en la demanda y prever su comportamiento futuro a medio y largo plazo, según escenarios económicos y tecnológicos. Mediante la determinación cuantitativa del impacto de una serie de factores (datos que alimentan el análisis) sobre la demanda de energía y

aplicando la metodología de análisis de la evolución, este modelo predice la demanda de energía. Se aplica a cualquier serie de demanda mensual de energía, ya sea la del sistema o la de segmentos de consumidores. (Ver figura 2)

Esta metodología abarca 16 modelos estadísticos que incorporan técnicas de clasificación, tipificación, análisis multivariante, análisis de series temporales y técnicas de desestacionalización. Transforma las variables exógenas (estadísticas españolas, indicadores de actividad económica, temperatura, calendarios y equipamiento y/o sensibilidad a la temperatura por sectores) en indicadores relevantes para el análisis de la demanda eléctrica. Estima la influencia de los distintos factores sobre la demanda y su evolución a largo plazo, prediciendo cada factor a corto y largo plazo. (Ver figura 2)

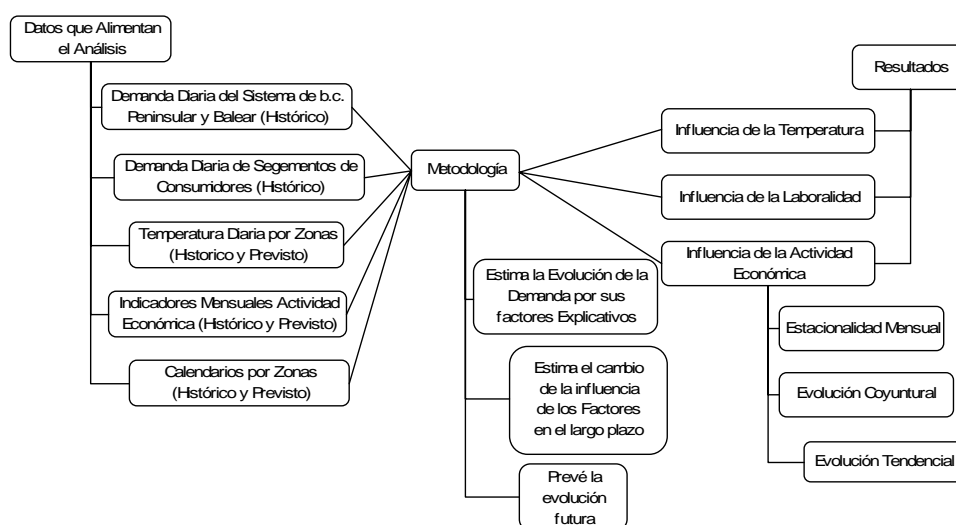


Figura 2. Metodología de análisis de demanda de energía mediante el análisis. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

Como aplicación de esta metodología, se analiza a continuación la influencia de la temperatura en la evolución de la demanda residencial.

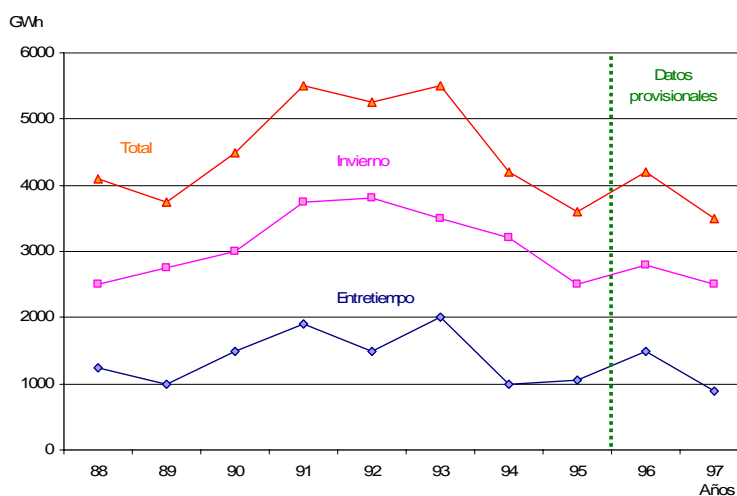


Figura 3. Influencia de la temperatura en la demanda residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

La temperatura es la causa principal del cambio de la demanda en los hogares. Su efecto, 4.570 GWh de media en el periodo 1989-1996, supone el 18 % de la demanda total residencial [8]. La mayor parte de este efecto se concentra en los meses de invierno, diciembre, enero y febrero, 3.140 GWh. Supone un 12.2 % de la demanda total para el mismo periodo. En el periodo de entretiempo, noviembre, marzo y abril, la influencia es mucho menor: 5.5 % de la demanda. (Ver figura 3)

La metodología de Explicación de la Curva de Carga por Usos, se compone de 24 modelos estadístico-matemáticos y de simulación que incorporan técnicas de clasificación, tipificación de formas, análisis multivariante, análisis y proyección de series temporales y proyección demográfica. Estos modelos, transforman los datos medidos de curva de carga, procesos de uso y características de los consumidores en factores relevantes que alimentan el análisis, construyen el consumo horario de cada uso en cada tipo de día, en base a características encuestadas al consumidor, realizan una estimación simultánea de la influencia de estos factores sobre la curva de carga registrada a cada consumidor y sobre un segmento o sector de consumidores y por último, proyectan a corto y largo plazo la evolución de cada uso basándose en escenarios tecnológicos, demográficos o económicos, obteniendo la curva de carga demandada por usos de un sector o segmento de consumidores. (Ver figura 4)

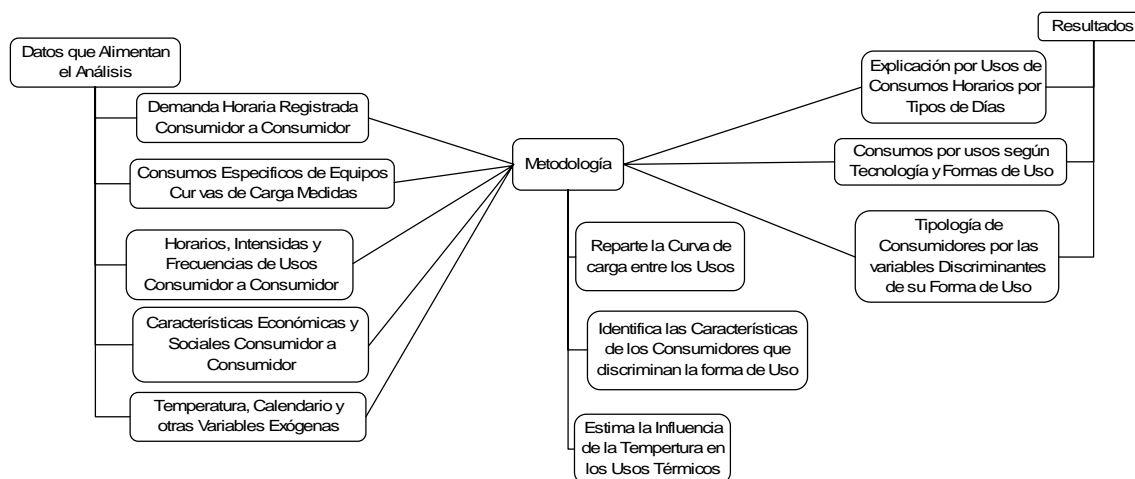


Figura 4. Metodología de Explicación de la Curva de Carga por Usos. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

Aplicando la metodología descrita arriba, se obtiene la figura 5 y la figura 6. La figura 5 representa la explicación por usos del consumo anual residencial. Se puede ver que los usos de mayor peso tienen son el frigorífico, televisión, iluminación y pequeños electrodomésticos. El consumo del frigorífico supone un 27.3 % de la demanda residencial, la iluminación el 23.5 % y la televisión aporta el 12 %. A pesar de que prácticamente toda la población posee lavadora, ésta supone tan solo el 5 % del consumo total residencial, pues su uso no es continuo a lo largo del día. El consumo por calefacción eléctrica es del 10 % de esta demanda.

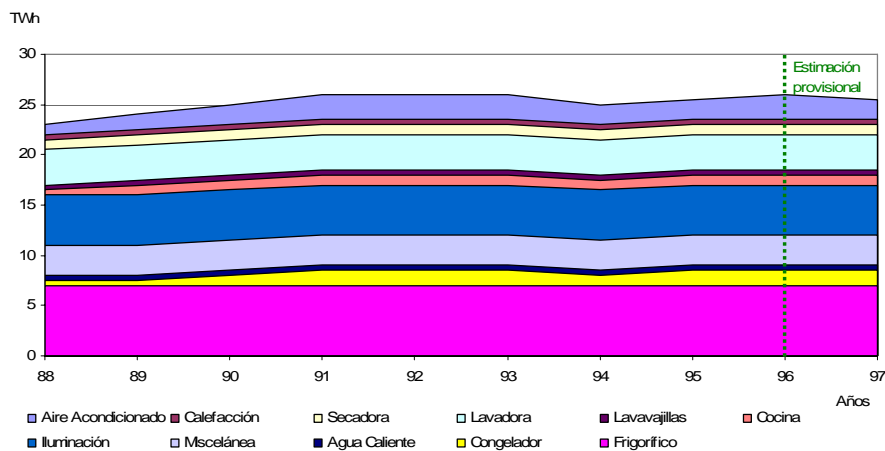


Figura 5. Explicación por usos del consumo anual residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

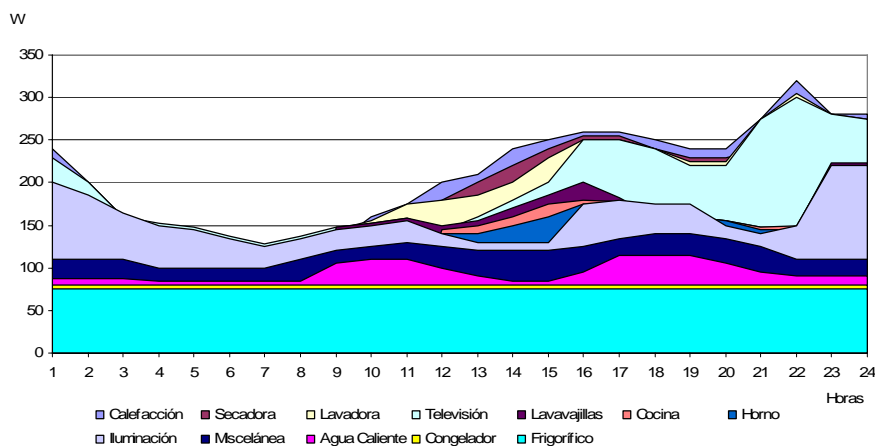


Figura 6. Curva de carga del hogar medio en un día tipo laborable. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

En la figura 6, se aprecia que la curva de carga del sector residencial tiene su punta de 21 a 22 horas, momento de mayor ocupación en el hogar. La lavadora y la secadora concentran su consumo durante las mañanas. A las 12 horas, estos dos usos suponen el 21 % de la demanda total residencial. Durante la noche existe otra punta de consumo de lavadora y secadora consecuencia del trabajo fuera de casa de los componentes principales de un número de hogares. El agua caliente tiene dos puntas claras, a las 9 de la mañana y a las 5 de la tarde, que coinciden con el aseo matinal y el fregado de vajilla posterior a la comida.

Los usos relacionados con la comida en el hogar, cocina y horno, concentran su consumo en las horas previas a la comida, 2 de la tarde, y cena, en menor medida, a las 9 de la noche.

El lavavajillas tiene sus puntas de consumo en las horas posteriores a dichos momentos, de comida y cena, es decir, hacia las 16 y 22 horas.

Iluminación, calefacción y televisión mantienen un perfil que coinciden con los niveles de ocupación de los hogares. El frigorífico y congelador mantienen el mismo nivel de consumo a lo largo del día, al no desconectarse en ningún momento.

2.2. Residential end-use energy simulation at city scale [15]

Según la clasificación establecida por Swan L.G. y Ugursal V.I [14], este modelo de estimación de la demanda de energía es un método ascendente, de ingeniería y de diseño de prototipos.

Los modelos de ingeniería estiman el consumo de energía de los usos finales, en función de sus calificaciones y características. Estos modelos pueden determinar plenamente el consumo de energía del sector, sin necesidad de recurrir a información estadística (al contrario que los dos modelos analizados anteriormente, que si que partían de datos históricos). La metodología de diseño de prototipos, se utiliza para clasificar las viviendas de acuerdo a determinados factores (tamaño, tipo de casa, etc.). A partir de estas variables incluidas en las ecuaciones del modelo, se obtiene la demanda de energía.

Las estimaciones del consumo de energía obtenidas del modelo se escalan para que sean representativas del consumo regional o nacional de viviendas, multiplicando el resultado por el número de viviendas que se ajustan a la descripción de cada prototipo.

MacGregor y otros.[23], Kohler y otros.[24], Huang and Broderik.[25], han sido algunos de los autores que han desarrollado modelos de demanda de energía de estas características

La metodología objeto de este análisis, permite desarrollar un modelo de simulación para predecir el uso final de consumo de energía en sectores residenciales de una ciudad y región. En este modelo, el consumo anual de energía de una vivienda es simulado a través del calendario de las actividades de sus ocupantes (mediante encuestas), datos meteorológicos y la eficiencia energética de los aparatos y de las viviendas. El total de la energía consumida para el sector de la vivienda en una región puede ser estimado utilizando los resultados de la simulación para las diferentes categorías de hogares. El uso de la energía de las viviendas se calcula iterativamente para 23 tipos de hogares y 20 tipos de vivienda (10 viviendas aisladas y 10 bloques). Multiplicando el consumo de energía simulado por el número de hogares de cada tipología se obtiene el consumo total de energía para el sector residencial en la región objeto del estudio.

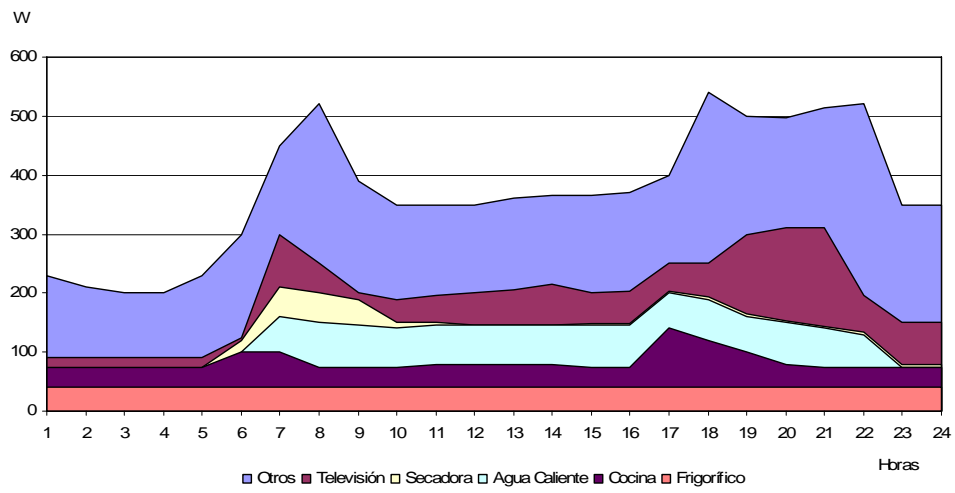


Figura 7. Consumo por hora simulado de electricidad por usos en un día tipo laborable. Fuente: Shimoda Y, Fujii T, Morikawa M, Mizuno M. Residential end-use energy simulation at city scale. Building and Environment 2004;39(8):959–67.

3. Resultados

Aplicando los modelos analizados y desarrollados en el Atlas de la Demanda Eléctrica Española, se obtiene los siguientes consumos anuales de energía en España para la serie de años 1989-1996:

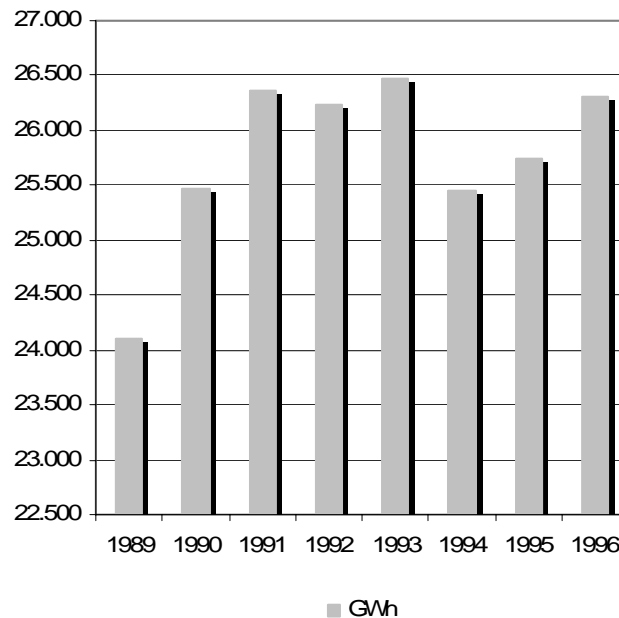


Figura 8. Consumo anual residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

La demanda eléctrica anual de los hogares se estima en 25.768 GWh/año, como promedio, en el periodo analizado.

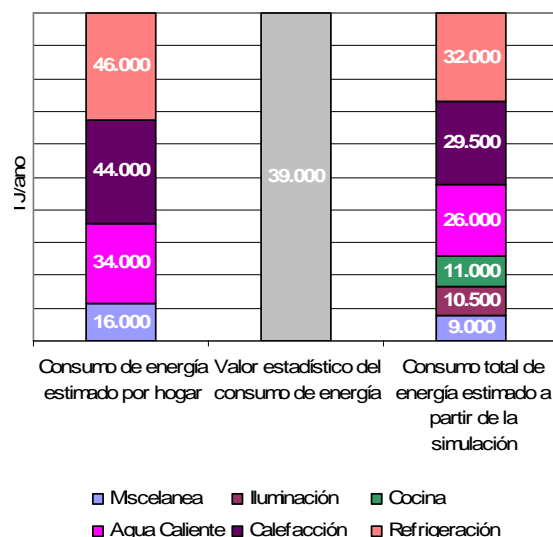


Figura 9. Consumo total de energía del sector residencial en la ciudad de Osaka (Japón). Fuente: Shimoda Y, Fujii T, Morikawa M, Mizuno M. Residential end-use energy simulation at city scale. Building and Environment 2004;39(8):959-67.

La figura 8, representa el consumo total de energía del sector residencial en la ciudad de Osaka (Japón), calculado a partir de la simulación, el valor estadístico del consumo de energía en el año de referencia 1999 y la estimación de los valores derivados del producto entre el número total de hogares en la ciudad analizada y el consumo de energía estimado por hogar. Se obtiene que el consumo total de energía calculado, a partir de la simulación, es 32.018 TJ/año.

Comparando las curvas de carga (ver figura 10 y figura 11), hay que señalar como características comunes, que los distintos modelos analizados, tienen en cuenta como se distribuyen las distintas tipologías de viviendas y hogares en la región de estudio.

Los modelos analizan el efecto del cambio de estilo de vida en el consumo de energía, ya que el uso de aparatos con consumo energético está vinculado a las actividades cotidianas de los ocupantes del hogar.

En cada uno de los modelos, se obtiene una distribución del consumo por hora de electricidad por usos distinta, condicionada por la diferencia entre unas regiones y otras en aspectos tales como: tamaño y tipología de las viviendas, calendario de actividades de sus ocupantes, eficiencia energética de los aparatos y viviendas, datos meteorológicos, etc.

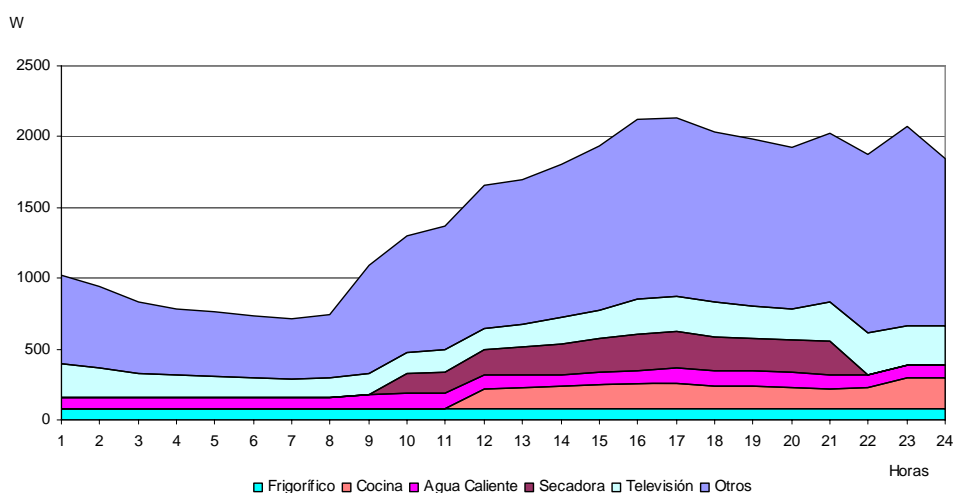


Figura 10. Curva de carga del hogar medio en un día tipo laborable. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

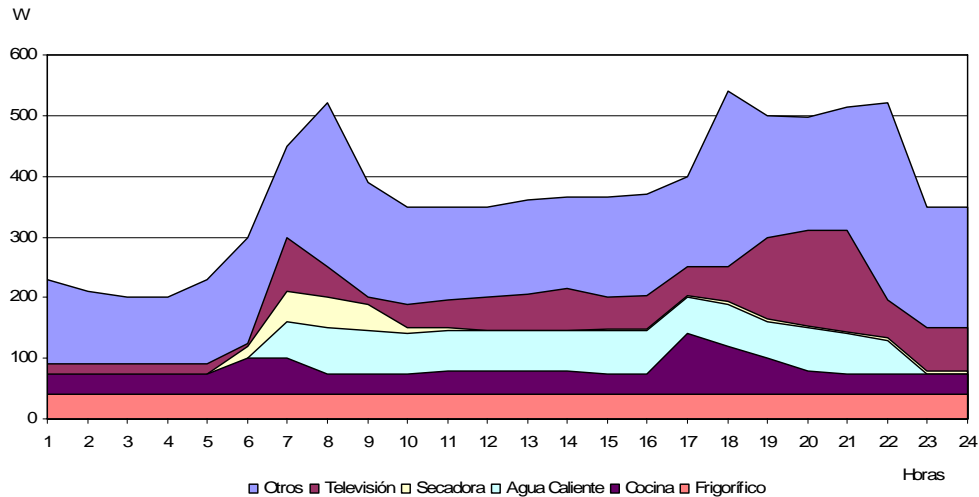


Figura 11. Consumo por hora simulado de electricidad por usos en un día tipo laborable. Fuente: Shimoda Y, Fujii T, Morikawa M, Mizuno M. Residential end-use energy simulation at city scale. Building and Environment 2004;39(8):959–67.

4. Conclusiones

La importancia que tiene en el consumo de energía eléctrica la edificación residencial, justifica el desarrollo de modelos que permitan obtener la estructura por usos (climatización, electrodomésticos, iluminación, agua caliente sanitaria,...) de dicho consumo.

El desarrollo de modelos energéticos puede desempeñar una función primordial a la hora de evaluar el efecto de políticas destinadas a la conservación de la energía y el impacto que ocasionarían cambios en la eficiencia energética de los aparatos de consumo eléctrico.

Por último, conociendo el consumo energético de una vivienda, estos modelos permitirían evaluar el efecto provocado, en dicho consumo, por modificaciones en el aislamiento térmico.

Referencias

- [1] Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renew Sust Energy Rev* 2000;4:157–75.
- [2] Montes G, Serrano MM, Rubio MC, Menéndez A. An overview of renewable energy in Spain. The small hydro-power case. *Renew Sust Energy Rev* 2005;9:21–534.
- [3] Constantinos A. Balaras, Athina G. Gaglia, Elena Georgopoulou, Sevastianos Mirasgedis, Yiannis Sarafidis, Dimitris P. Lalas. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment* 42 (2007) 1298-1314.
- [4] Xiaowu W, Ben H. Energy analysis of domestic-scale solar water heaters. *Renew Sust Energy Rev* 2005;9:639–45.
- [5] Michael Jefferson .Sustainable energy development: performance and prospects. *Renewable Energy* 31 (2006) 571–582.
- [6] Javier Ordoñez García, Eulalia Jadraque Gago, Javier Alegre Bayo, Germán Martínez Montes. The use of solar energy in the building construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 2166-2178.

- [7] Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012. Plan de acción 2008-2012. Julio 2007. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía.
- [8] Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.
- [9] Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, M. Mizuno. Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management. *Energy and Buildings* 39 (2007) 580–592.
- [10] John E. Seem. Pattern recognition algorithm for determining days of the week with similar energy consumption profiles. *Energy and Buildings* 37 (2005) 127–139.
- [11] Adil Al-Mumin, Omar Khatib, Gopiseti Sridhar. Occupants behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences. *Energy and Buildings* 35 (2003) 549–559.
- [12] Linda Farinaccio, Radu Zmeureanu. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses. *Energy and Buildings* 30 1999 245–259.
- [13] Yoshiyuki Shimoda, Takahiro Asahi, Ayazo Taniguchi, Minoru Mizuno. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy* 32 (2007) 1617-1633.
- [14] Swan LG, Ugursal VI. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renew Sustain Energy Rev* (2009), doi:[10.1016/j.rser.2008.09.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033).
- [15] Shimoda Y, Fujii T, Morikawa M, Mizuno M. Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment* 2004;39(8):959–67.
- [16] Hirst E, Goeltz R, White D. Determination of household energy using ‘fingerprints’ from energy billing data. *Energy Research* 1986;10(4):393–405.
- [17] Raf.o G, Isambert O, Mertz G, Schreier C, Kissock K. Targeting residential energy assistance. In: *Proceedings of energy sustainability conference; 2007*. p. 489–95.
- [18] Parti M, Parti C. The total and appliance-specific conditional demand for electricity in the household sector. *The Bell Journal of Economics* 1980;11 (1):309–21.
- [19] Aigner DJ, Sorooshian C, Kerwin P. Conditional demand analysis for estimating residential end-use load profiles. *The Energy Journal* 1984;5(3):81–97.
- [20] Caves DW, Herriges JA, Train KE, Windle R. A Bayesian approach to combining conditional demand and engineering models of electricity usage. *The Review of Economics and Statistics* 1987;69(3):438–48.
- [21] Kreider JF, Haberl JS. Predicting hourly building energy use: the great energy predictor shootout—overview and discussion of results. *ASHRAE Transactions* 1994;100(2):1104–18.
- [22] Issa RRA, Flood I, Asmus M. Development of a neural network to predict residential energy consumption.. In: *Proceedings of the sixth international conference on the application of artificial intelligence to civil & structural engineering computing; 2001*. p. 65–6.
- [23] MacGregor WA, Hamdullahpur F, Ugursal VI. Space heating using small-scale fluidized beds: a techno-economic evaluation. *International Journal of Energy Research* 1993;17(6):445–66.
- [24] Kohler N, Schwaiger B, Barth B, Koch M. Mass flow, energy flow and costs of the German building stock. CIB, 2nd international conference on buildings and the environment, Paris, France; 1997.
- [25] Huang Y, Broderick J. A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire US building stock. Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-46303; 2000.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Eulalia Jadrake Gago.
Área de Proyectos de Ingeniería.
Universidad de Granada.
Campus Universitario Fuentenueva.
Avenida de Severo Ochoa, s/n.
18071 GRANADA.
Teléfono +34 958 24 27 15.
FAX +34 958 24 94 41.
E-mail: ejadrake@ugr.es