

Sistema de Control Distribuido para la Gestión de la Demanda en el Sector Residencial

M. Castillo ¹, A. Gutiérrez ¹, F. Monasterio-Huelin ¹, D. Masa ², E. Caamaño ², J. Jiménez-Leube ³ y J. Porro ²

1 Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Dpto. Tecnologías Especiales Aplicadas a la Telecomunicación, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, mccagigal@gmail.com, aguti@etsit.upm.es, felix.monasteriohuelin@upm.es.

2 Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Instituto de Energía Solar, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, dmasa@ies-def.upm.es, estefan@ies-def.upm.es, jorgeporrob@hotmail.com.

3 Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Dpto. de Tecnología Electrónica, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, jleube@etsit.upm.es.

Resumen

En el presente trabajo presentamos un sistema de control distribuido para la gestión de la demanda en el sector residencial. La mejora de la gestión de la demanda es muy importante en aplicaciones de generación distribuida. La propuesta de este trabajo es la implementación de un sistema de control que genere automáticamente una planificación óptima en términos energéticos, donde se priorice el consumo de energía fotovoltaica, frente al uso de las baterías y de la red eléctrica. El sistema de control está dividido en dos partes fundamentales: una distribuida, que se encarga de realizar las planificaciones de acuerdo a las necesidades del usuario, y un coordinador que recibe las distintas planificaciones de los subsistemas y ejecuta la más óptima en términos energéticos. Los resultados experimentales realizados en una vivienda real demuestran la viabilidad de la arquitectura propuesta, así como una reducción del consumo de la red eléctrica y el aumento de la eficiencia energética.

Palabras clave: Gestión de la demanda, energía fotovoltaica, sistema de control distribuido.

1 INTRODUCCIÓN

La mejora de sistemas de gestión de la demanda eléctrica en el sector residencial es de vital importancia en aplicaciones de generación distribuida. La contribución de este sector es una variable a considerar en la estabilidad del sistema eléctrico, al mismo tiempo que se obtienen otros beneficios: i) menor coste económico para los usuarios, ii) mejora de la eficiencia energética global y iii) reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (CAAMAÑO-MARTIN, E. et al. (2009)).

En este artículo nos centramos en el estudio de un sistema de control distribuido para un sistema de gestión doméstico implementado en una vivienda solar Fig.1a. La vivienda dispone de una fuente de generación fotovoltaica capaz de desplazar la curva de demanda local, teniendo en cuenta las preferencias del usuario, la electricidad fotovoltaica generada localmente, el intercambio de energía entre vivienda y red eléctrica y la energía almacenada localmente. La convergencia del control, la comunicación y la computación (GRAHAM, S. y KUMAR, P.R. (2003) y BALIGA, G. y KUMAR, P.R. (2005)) se plantea en la actualidad como una integración de las tecnologías desarrolladas en cada campo específico, en el que se toma en consideración la interacción con el entorno (VARELA, F.J. et al. (1991) y PFEIFER, R. y BONGARD, J.C. (2006)). Esta convergencia señala la importancia de las arquitecturas computacionales frente a los algoritmos concretos de resolución de tareas (BROOKS, R.A. (1991) y ARBIB, M.A. (1995)).

El sistema de control desarrollado forma parte de la estructura de comunicación que se muestra en la Fig. 1b. Su finalidad es tomar en consideración la lógica de funcionamiento del sistema y en su caso actuar sobre él activando, desactivando o difiriendo las cargas presentes en la vivienda, para cumplir dos objetivos mínimos: i) la eficacia en el servicio, en el sentido de satisfacer la demanda de los usuarios o habitantes de la vivienda, y ii) la optimización del consumo eléctrico en términos, no sólo de potencia y energía, sino también de los costes económicos. La única posibilidad de satisfacer los objetivos mínimos mencionados anteriormente es mediante la colaboración de los usuarios, bajo el supuesto de que no sólo querrán satisfacer sus necesidades de consumo, sino que aceptarán la racionalización de ellas en función de las

condiciones reales del sistema global. Desde este punto de vista es imprescindible diseñar un sistema de comunicación entre el sistema de control y el usuario. El usuario debe estar informado del estado del sistema global de tal manera que pueda participar en la racionalización de sus demandas. El sistema de control por su parte debe reducir el esfuerzo en la toma de decisiones del usuario, por lo que conviene que disponga de cierta autonomía condicionada tanto por las demandas del usuario como por el estado real del sistema. Por lo tanto, las decisiones del usuario constituyen órdenes para el sistema de control de tal manera que se satisfaga el primero de los objetivos mínimos mencionados.



Figura 1a. Vista exterior de la vivienda experimental.

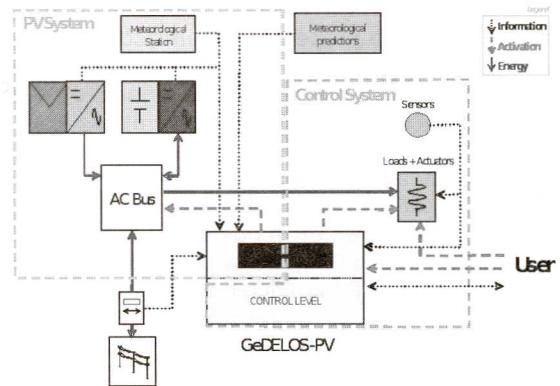
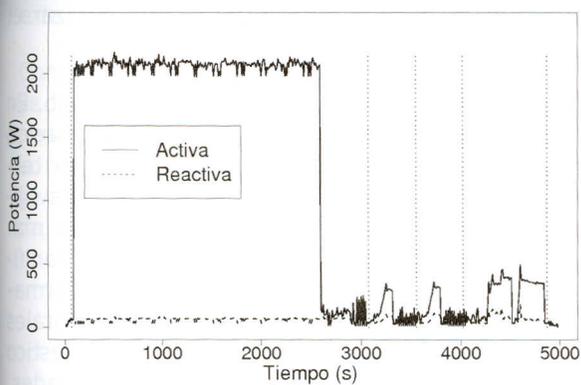


Figura 1b. Esquema general del sistema de gestión de la demanda eléctrica.

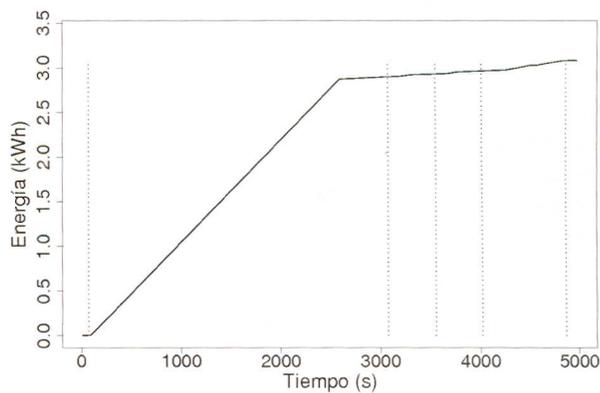
2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CARGAS

Como se ha comentado en la sección anterior, para que el sistema de control pueda realizar una planificación de la gestión de la demanda en base a los requisitos planteados por el usuario, es necesario que disponga de la información relativa al consumo de las diversas cargas. Para obtener dicha información se han caracterizado los diferentes electrodomésticos de la vivienda (lavadora, lavavajillas, secadora, frigorífico, etc.) en base a sus modos de funcionamiento programados.

La caracterización se ha realizado mediante el uso de un vatímetro digital, que permite obtener información del consumo (energía y potencia) del electrodoméstico, así como información sobre la potencia reactiva y estado de los armónicos en la red. En la Fig. 2 se muestra la potencia instantánea y la energía consumida por una lavadora con un programa a 90 °C y 1200 r/min. Observamos que el funcionamiento de la lavadora es divisible en tres grandes fases: una de lavado, otra de aclarado y por último una de centrifugado. En las pruebas realizadas se ha observado que la fase de lavado depende exclusivamente de la temperatura requerida para el mismo. La potencia instantánea durante la fase de lavado siempre es la misma (en torno a los 2000 W), sin embargo la duración de dicha fase es la que diferencia unos programas de otros (ver Tabla I). Igualmente, observamos que el consumo en la fase de centrifugado depende exclusivamente de las revoluciones impuestas al programa, siendo el mayor para 1200 r/min y el menor para 400 r/min Tabla I.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Potencia instantánea y (b) energía consumida en un lavado a 90 °C y 1200 r/min.

Tabla I. Duración, potencia máxima y energía consumida en la fase de lavado y centrifugado de la lavadora a distintas temperaturas y revoluciones.

Temperatura (°C)	Duración (s)	Potencia máxima (W)	Energía (Wh)
20 (Frío)	490	280	38.11
50	1567	2000	759.44
70	2554	2000	1307.77
90	3074	2000	1596.66
Revoluciones (r/min)	Duración (s)	Potencia máxima (W)	Energía (Wh)
400	426	100	20
1200	928	500	100

Aunque en este apartado se han detallado exclusivamente los consumos de la lavadora, el mismo procedimiento de caracterización se ha seguido para el resto de los electrodomésticos de la vivienda.

3 ARQUITECTURA DE CONTROL

La implementación del sistema de control se realiza mediante un arquitectura distribuida (Fig. 3) en la que los diferentes subsistemas (asociados a cada carga) disponen de información del usuario así como de los consumos estimados de cada uno de sus programas o modos de funcionamiento. Cada subsistema está dotado de una estructura de control inteligente que permite realizar una planificación global que satisface los requisitos planteados por el usuario desde la perspectiva del propio subsistema. Para ello utilizan como información preferente sus estimaciones de consumo y como información secundaria la de los restantes subsistemas. Dichas planificaciones se transmiten a un coordinador que, en base a la energía disponible en el sis-

tema de almacenamiento, las previsiones fotovoltaicas y meteorológicas y el estado de la red eléctrica, elabora un plan de acción global. El objetivo de este coordinador es maximizar el rendimiento en términos de energía y potencia.

La arquitectura se encuentra dividida en dos bloques: uno distribuido y el otro centralizado. En el bloque distribuido, cada subsistema, asociado a cada electrodoméstico, recibe información sobre las necesidades impuestas por el usuario (por ejemplo, la lavadora tiene que estar terminada a las cuatro de la tarde con una temperatura y revoluciones determinadas; el lavavajillas debe estar acabado a las ocho de la noche con una carga determinada, etc.). De esta manera, cada electrodoméstico obtiene información de sus consumos estimados e intenta planificarlos dentro de un eje temporal (**Capa de Planificación**). Una vez obtenida dicha información, los electrodomésticos se comunican entre sí para intentar adecuar los límites temporales impuestos por el usuario. Esto hace que tras un número de iteraciones, cada electrodoméstico disponga de una planificación distinta, en la que ha tenido en cuenta no solo sus necesidades, sino las del resto de las cargas del sistema (**Capa de Comunicación**). Una vez concluida esta fase, cada subsistema envía su planificación al coordinador del bloque centralizado.

El coordinador selecciona la mejor planificación atendiendo tanto al estado de la red fotovoltaica como al estado de las baterías y al de la red eléctrica (**Capa de Coordinación**). Igualmente, el coordinador intenta minimizar el consumo de energía en horas en las que no se prevea la generación fotovoltaica, así como una minimización del consumo de la red eléctrica. Por último, el coordinador se comunica con el elemento de actuación del bloque centralizado, que se encarga de enviar las órdenes a cada uno de los electrodomésticos para que se pongan en funcionamiento en el momento previsto por el coordinador (**Capa de Ejecución**).

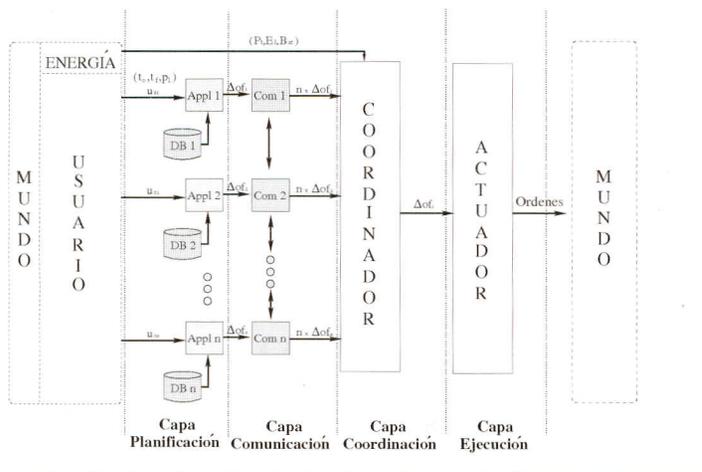


Figura 3. Arquitectura de control.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

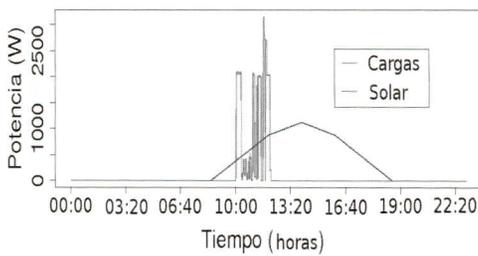
En este trabajo mostramos los resultados de un experimento en el que el usuario quiere activar la lavadora, lavavajillas y secadora con unos programas concretos, especificando los intervalos de tiempo en los que pueden ser activados, tal y como se muestra en la Tabla II. Por ejemplo, la lavadora con un programa concreto (60 °C y 1200 r/min), debe ponerse en funcionamiento a partir de las 10 de la mañana, y debe finalizar antes de las 5 de la tarde. La Fig. 4a muestra la situación energética para el día de la prueba y la planificación seleccionada por el coordinador. En la Fig. 4b se observa el balance detallado de potencia, donde se muestra la generación fotovoltaica y el consumo de las cargas. Dicho consumo es suministrado por la red, las baterías y la fotovoltaica. Observamos que siempre que exista suficiente energía generada por el sistema fotovoltaico, se cubre el consumo con ella. Sin embargo, cuando el consumo es mayor del generado, se extrae energía de las baterías. Una vez que las baterías se han des-

cargado, como se puede ver en la Fig. 4b en la marca D.B. (Descarga de Baterías), el sistema extrae energía de la red eléctrica.

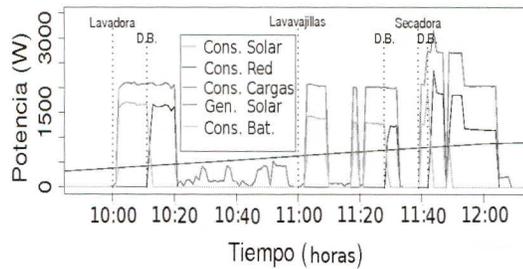
Como se muestra en la Fig. 5a, el balance energético seleccionado por el coordinador constituye la mejor de las opciones obtenidas por el sistema distribuido. En la Fig. 5b se muestra la peor planificación obtenida por el sistema distribuido, en la que se observa que el consumo de la red eléctrica es superior al de la energía fotovoltaica, un resultado indeseable. Igualmente se aprecia que si el sistema fotovoltaico está generando energía, pero no está siendo consumida, ésta es almacenada en las baterías.

Tabla II. Horario de los electrodomésticos planificados por el usuario y por el sistema de control.

Electrodoméstico	Planificación Usuario (s)	Programa
Lavadora	10:00 – 17:00	60 °C y 1200 r/min
Secadora	10:00 - 20:00	Secado rápido (1200 r/min)
Lavavajillas	10:00 – 24:00	Lavado rápido

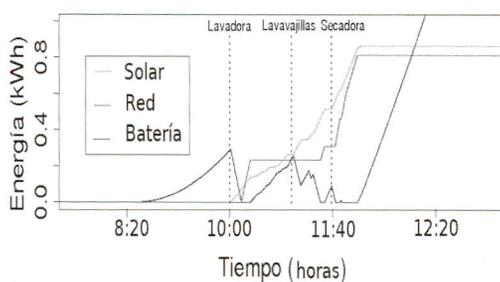


(a)

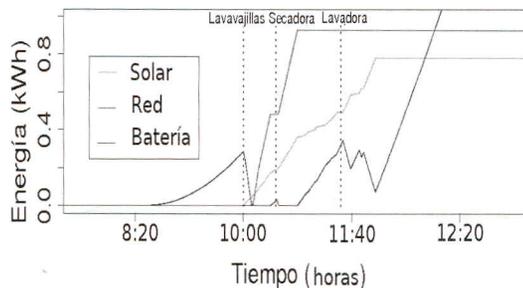


(b)

Figura 4. (a) Planificación diaria de consumo y (b) balance energético de las cargas.



(a)



(b)

Figura 5. Balance energético de (a) la planificación seleccionada por el coordinador y (b) la peor planificación obtenida en el sistema distribuido.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito un sistema de control distribuido para la gestión de la demanda eléctrica en el sector residencial. Cada subsistema ejecuta un algoritmo de planificación, que permite que cada electrodoméstico obtenga información de sus consumos estimados y los planifique en un eje temporal. Un coordinador a la salida del sistema distribuido selecciona del conjunto de las planificaciones, la más eficiente energéticamente.

Se ha mostrado que el sistema de control logra un aprovechamiento inteligente de la energía fotovoltaica generada en la vivienda, minimizando el uso de la red eléctrica. En la actualidad se están desarrollando algoritmos más complejos, para que la capa distribuida se encargue de optimizar el consumo energético, y no sea el coordinador el responsable de la misma. De tal forma, en un futuro próximo, se espera evitar el uso de las capas centralizadas y que cada subsistema distribuido planifique y ejecute las acciones requeridas por el usuario de una manera completamente descentralizada.

6 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, bajo el Plan Nacional de I+D+i 2004-2007 en el proyecto "Gestión de la Demanda Eléctrica Doméstica con Energía Solar Fotovoltaica" (ENE2007-66135).

7 REFERENCIAS

- ARBIB, M.A. (1995).: "Schema Theory", Handbook of Brain Theory and Neural Networks, pp. 830-834. MIT Press. Cambridge, MA.
- BALIGA, G. y KUMAR, P.R. (2005).: "Middleware for Control over Networks", Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2005), pp. 482-487. IEEE Press. Piscataway, NJ.
- BROOKS, R.A. (1991).: "Intelligence without Representation", Artificial Intelligence, Volumen 47, Número 1-3, pp. 139-159.
- CAAMAÑO-MARTIN, E., MASA, D., GUTIÉRREZ, A., MONASTERIO-HUELIN, F., JIMÉNEZ-LEUBE, F.J., PORRO, J. y CAGIGAL, M. (2009).: "Optimizing PV use through Active Demand Side Management". 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Aceptado.
- GRAHAM, S. y KUMAR, P.R. (2003).: "The Convergence of Control, Communication, and Computation?", Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volumen 2775, pp. 458-475. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany.
- PFEIFER, R. y BONGARD, J.C. (2006).: "How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence". MIT Press. Cambridge, MA.
- VARELA, F.J., THOMPSON, E. y ROSCH, E. (1991).: "The Embodied Mind". MIT Press. Cambridge, MA.