

# Optimización del uso de un sistema fotovoltaico mediante gestión activa de la demanda

E. Caamaño-Martín <sup>1</sup>, D. Masa <sup>1</sup>, A. Gutiérrez <sup>2</sup>, F. Monasterio-Huelin <sup>2</sup>, F.J. Jiménez-Leube <sup>3</sup>, J. Porro <sup>1</sup>, M. Castillo <sup>2</sup>

1 Instituto de Energía Solar, ETSI Telecomunicación, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, estefan@ies-def.upm.es, dmasa@ies-def.upm.es, jorgeporrob@hotmail.com

2 Dpto. Tecnologías Especiales Aplicadas a la Telecomunicación, ETSI Telecomunicación, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, mccagigal@gmail.com, aguti@etsit.upm.es, felix.monasteriohuelin@upm.es

3 Dpto. Tecnología Electrónica, ETSI Telecomunicación, Av. Complutense 30, 28040 Madrid, jleube@etsit.upm.es

## Resumen

En el presente artículo se justifica la oportunidad y pertinencia de investigar nuevas estrategias de gestión de instalaciones fotovoltaicas combinadas con mecanismos de gestión de la demanda. Se presenta un sistema de gestión de la demanda doméstica capaz de desplazar la curva de carga en función de las necesidades del usuario, la disponibilidad de generación local y señales procedentes de la red eléctrica, con el objetivo de contribuir a una participación activa de los usuarios domésticos en el sistema eléctrico que redunde en beneficios de carácter económico, energético y medioambiental. Se ilustran las posibilidades del sistema mediante una campaña experimental.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, sistema fotovoltaico híbrido, conexión a la red, gestión de la demanda.

## 1 INTRODUCCIÓN

La creciente penetración de tecnologías de generación distribuida (GD) en redes eléctricas de todo el mundo ha suscitado la necesidad de garantizar que estas tecnologías se integren de forma efectiva en las redes. La solar fotovoltaica, aunque con menor potencia instalada que otras como la eólica, es actualmente la principal tecnología de GD que hace uso de inversores para su acoplamiento, de donde se deriva la conveniencia de tenerla en cuenta en la planificación y operación de infraestructuras eléctricas. Por otra parte, en la mayoría de los países con sistemas regulatorios aplicables a las tecnologías renovables basados en tarifas a la generación ("*feed-in-tariff*"), éstas han sido por lo general superiores al precio de la electricidad convencional, de ahí que los operadores de las instalaciones fotovoltaicas hayan buscado hasta ahora maximizar la energía producida (y vendida). En este sentido, el alza progresiva de los precios de la electricidad unida al descenso de costes de la fotovoltaica va a permitir que se alcance la paridad entre el coste de generación fotovoltaico y el precio del kWh residencial en numerosos países de la Unión Europea en la próxima década. En paralelo con lo anterior, la evolución de los mecanismos de incentivos a la GD (disminución de tarifas a la generación, incentivos al autoconsumo, etc.) permite vislumbrar nuevos escenarios de rentabilidad de las instalaciones en el contexto de mercados eléctricos liberalizados. Conviene explorar, por tanto, nuevos mecanismos de gestión de instalaciones fotovoltaicas que reporten mayores beneficios para el usuario y/o la red que el simple vertido a ésta de la electricidad generada.

## 2 GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Un ejemplo de lo anterior lo constituye la combinación de GD con tecnología fotovoltaica híbrida y mecanismos de gestión de la demanda, aplicada al sector residencial:

- La tecnología fotovoltaica híbrida a la que nos referimos consiste en un sistema fotovoltaico conectado a la red que incluye un elemento acumulador de energía (generalmente baterías electroquímicas). Operan de forma similar a Sistemas de Alimentación Ininterrumpida en situaciones de fallo de la red, y existen soluciones diseñadas para operar en distintas topologías de redes de distribución (TT, TN) que permiten diseñar sistemas modula-

res adecuados a las necesidades del usuario (potencia de la instalación fotovoltaica, capacidad de acumulación), garantizando los debidos niveles de seguridad y fiabilidad. Estos sistemas han comenzado a utilizarse en países como Japón (UEDA Y., et. al. (2007)), si bien únicamente para evitar incrementos de tensión indeseados asociados a la inyección en red de la electricidad fotovoltaica.

- En lo que respecta a la gestión de la demanda, se adoptará aquí una definición amplia del término que engloba todas aquellas acciones que buscan por objetivo influir sobre el uso que los consumidores hacen de la electricidad, de forma que se produzcan cambios para producir un ahorro o incrementar la eficiencia en el ámbito individual y/o en la curva de demanda agregada (PÉREZ ARRIAGA, J.I. et. al. (2005)). En el sector residencial, la mayor parte de experiencias conocidas han sido hasta ahora programas de ahorro y eficiencia que persiguen un aumento de la eficiencia de equipos eléctricos (por ejemplo, campañas de incentivos para el uso de lámparas de bajo consumo), o programas basados en un control indirecto de cargas a través de la tarificación. En cambio, son muy pocas las experiencias conocidas de participación activa de pequeños consumidores en los mercados eléctricos, pese a que este segmento constituye una parte importante del consumo de electricidad (en el mercado eléctrico peninsular entre el 30 y el 45% del total en el periodo 1998-2008) con un gran potencial de ahorro.

Una verdadera integración de ambos conceptos implica que las estrategias de gestión de los consumos eléctricos en una vivienda deberían tener en cuenta, además de las demandas del usuario, la disponibilidad local de electricidad (procedente del sistema fotovoltaico, baterías y la red eléctrica), así como otros posibles factores (por ejemplo, "señales" en forma de precios horarios de la electricidad) que pueden condicionar la elección de uno u otro patrón de consumo. Sin duda existen interesantes retos que, desde la perspectiva de la ingeniería, es necesario abordar para lograr la deseada integración:

- Desde la perspectiva de los sistemas fotovoltaicos, sistemas de supervisión y gestión capaces de conocer en tiempo real el estado de la instalación (sus componentes principales: generadores, inversores y baterías), las posibilidades de generación en un horizonte temporal cercano (predicciones), así como dar respuesta a señales externas al sistema procedentes del usuario y la red eléctrica (precios, indicios de problemas de suministro, etc.).
- Desde la perspectiva de la ingeniería de control, la gestión de consumos domésticos requiere una planificación que tenga en cuenta los numerosos parámetros y variables que influyen en el consumo (necesidades, preferencias, hábitos y conocimientos del usuario; características y posibilidades de control de los equipos eléctricos) y, en consecuencia, procesar gran cantidad de información de manera inteligente. A esta información es necesario añadir la procedente de las fuentes de energía locales (fotovoltaica en este caso), hasta ahora considerada un elemento ajeno e independiente de la problemática de control de los consumos eléctricos, como muestran los desarrollos domóticos actualmente disponibles en el mercado.

Estos y otros retos han inspirado el proyecto "Gestión de la Demanda Eléctrica Doméstica con Tecnología Solar Fotovoltaica" cuyos objetivos, estructura y primeros resultados se describen a continuación.

### **3 EL SISTEMA GeDELOS-FV**

#### **3.1 Objetivos**

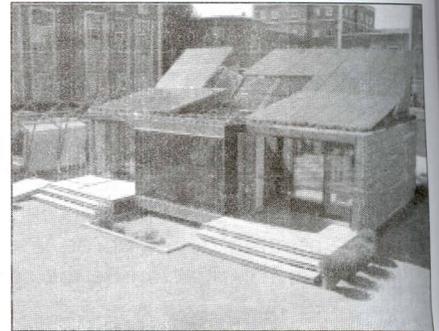
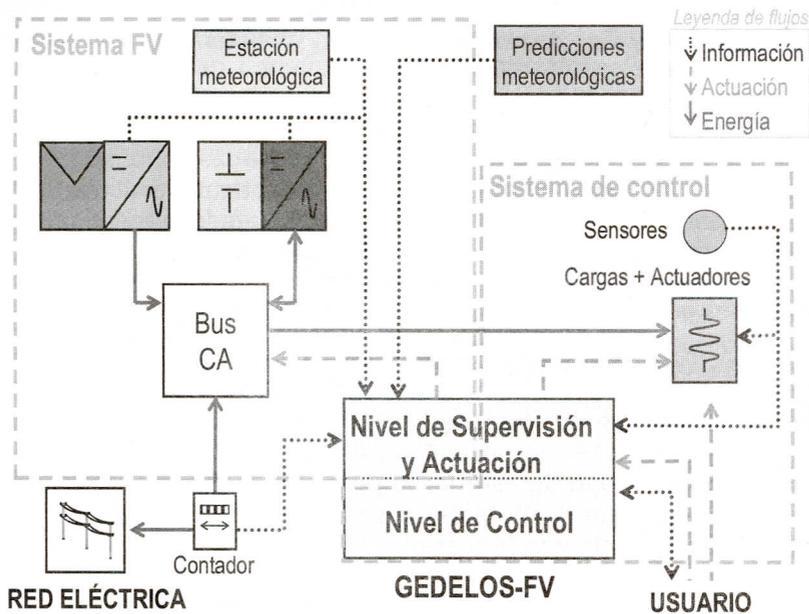
"GeDELOS-FV" es un sistema de gestión de la demanda doméstica capaz de desplazar la curva de carga en función de las necesidades y preferencias del usuario, la disponibilidad de generación eléctrica local y señales procedentes de la red eléctrica, con el objetivo de contribuir a una participación activa de los usuarios en el sistema eléctrico que redunde en beneficios de carácter económico (ahorros), energético (incrementos en la eficiencia asociada al uso de la electricidad, mejoras en la calidad y seguridad de suministro) y medioambiental (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo).

Para la consecución del objetivo general mencionado se plantean los siguientes objetivos específicos relativos a los sistemas fotovoltaicos y de control que integran el sistema global GeDELOS-FV:

- El sistema fotovoltaico debe satisfacer los siguientes requisitos:
  - Supervisión de su funcionamiento, teniendo en cuenta las características particulares de la instalación (tecnologías empleadas), la influencia de las condiciones locales de operación (radiación solar, temperatura, sombras), así como la vigilancia de variables que afectan a la seguridad (aislamiento del generador fotovoltaico, tensión y frecuencia de red).
  - Estimación de la producción eléctrica. Integrar el sistema fotovoltaico en estrategias de gestión de la demanda requiere que su funcionamiento sea de algún modo controlable. Para una fuente de energía como es la solar, dependiente de factores externos no controlables —radiación solar principalmente—, la posibilidad de controlar el recurso energético local consiste en poseer la capacidad de estimar la producción con una antelación mínima de 24 horas, a partir de predicciones meteorológicas disponibles, el modelado y caracterización de los componentes principales (generador fotovoltaico, inversores y baterías)
  - Control del modo de funcionamiento del sistema (aislado o conectado a red), así como del aprovechamiento de la energía almacenada (idealmente de origen fotovoltaico), de acuerdo con las estrategias de gestión de la demanda definidas por el usuario y/o sistema de control.
- Sistema de control. Se han planteado dos objetivos mínimos, a saber, la eficacia del servicio (satisfacción de la demanda del usuario) y la optimización del consumo en base a una “función de coste” definida en sentido amplio, que incluya factores energéticos (potencia consumida por las cargas), económicos (precios de la electricidad de red) y otros relacionados con el confort y bienestar del usuario, como por ejemplo: sensaciones térmicas en el uso de la climatización, priorizar el uso de la electricidad de origen solar frente a la extraída de la red, etc. Otro de los objetivos planteados es la consideración del entorno (demanda externa), concebida como una petición del exterior de determinado suministro de electricidad por parte de la red eléctrica —para ayudar a solucionar problemas de congestión— u otra vivienda próxima. Por todo ello se plantea un sistema de control distribuido en el que se extrapola el concepto de sistemas desacoplados y cooperativos, no sólo a los elementos internos de la vivienda para el control de las cargas individuales, sino a un potencial conjunto de viviendas; con ello se pretende analizar las ventajas e inconvenientes de estrategias de colaboración entre diferentes usuarios que cooperasen en la gestión agregada de sus consumos eléctricos.

### 3.2 Estructura general

La Fig. 1(a) muestra la estructura general del sistema GeDELOS-FV a nivel de bloques, en el que se distinguen el sistema fotovoltaico, sistema de control, cargas (electrodomésticos, iluminación, etc.) y sensores asociados, así como los elementos con los que interactúa el sistema (usuario y red eléctrica). En la figura se señalan mediante flechas azules los flujos de energía entre los distintos elementos susceptibles de generar —generadores fotovoltaicos, batería o red eléctrica— o consumir —cargas, batería y red eléctrica—. Las flechas negras indican el sentido en que los distintos elementos intercambian información entre sí: puede verse cómo GeDELOS-FV recibe información desde todos los elementos y proporciona información a los actuadores (control distribuido) y al propio usuario de la vivienda donde se realiza la gestión activa de la demanda. Por último, las flechas rojas indican el sentido en que viajan los comandos de actuación: GeDELOS-FV es el encargado de actuar sobre el resto de elementos en paralelo con las demandas del usuario, a las cuales se dota de máxima prioridad y que pueden transmitirse a través del sistema o comunicarse directamente a las cargas.



(a) Estructura del sistema GEDELOS-FV.

(b) Prototipo "magic Box".

**Figura 1.** Estructura del sistema GEDELOS-FV y prototipo de pruebas.

GeDELOS-FV se ha implementado en un prototipo de vivienda solar energéticamente autosuficiente denominado "magic Box" Fig. 1(b), dotado de un generador fotovoltaico, inversores y acumulación eléctrica, así como electrodomésticos habituales en hogares con niveles de electrificación elevados (lavadora, secadora, lavavajillas, cocina vitrocerámica, horno, climatización, iluminación, etc.), con funcionalidades de comunicación y programación remota. A continuación se muestran algunos resultados que ilustran las posibilidades del sistema.

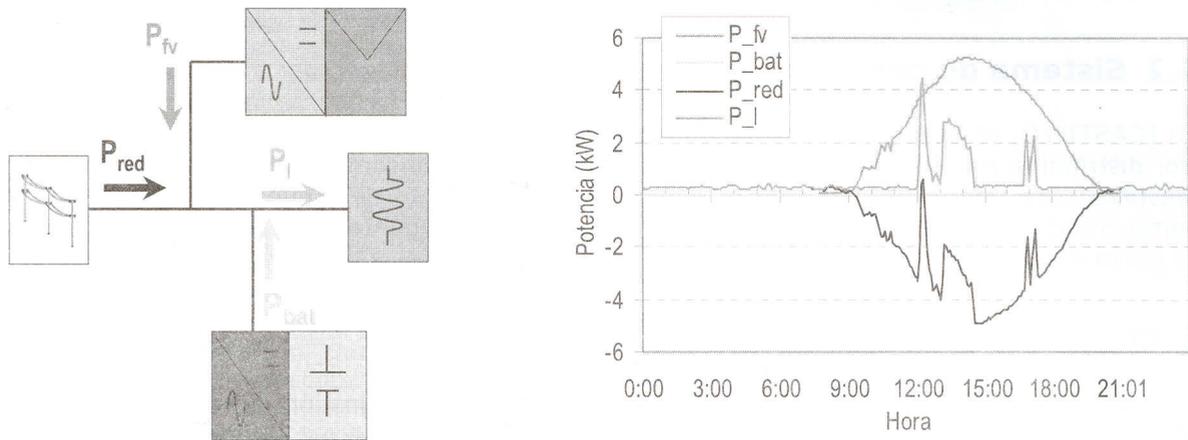
## 4 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SISTEMA

### 4.1 Sistema fotovoltaico híbrido

El sistema fotovoltaico, representado en la Fig. 1 de forma esquemática mediante los símbolos de generador fotovoltaico (en rojo), inversor de conexión a red (azul claro), baterías (naranja) e inversor de baterías (azul oscuro), está formado por seis ramas independientes distribuidas en 4 planos de captación (inclinaciones  $12^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $39^\circ$  y  $90^\circ$ , véase Fig. 1(b)), constituidas cada una de ellas por una asociación en serie de módulos de silicio monocristalino y conectadas a su salida a inversores de conexión a red. La potencia nominal total es de 7 kWp en condiciones estándar de medida (7,7 kW la potencia máxima de los inversores de rama), y se complementa con un banco de baterías estacionarias de Pb-Ácido conectado a un inversor bidireccional de 5 kW.

La Fig. 2(a) muestra la configuración eléctrica de la red local (interna a la vivienda) en el modo de funcionamiento en conexión a red, en la cual la generación fotovoltaica se vierte a la red a través de una línea independiente de la consumo (en modo de funcionamiento aislado se modifican las conexiones de tal forma que la generación fotovoltaica pasa a suministrar directamente a la línea de consumos). Las flechas que acompañan a las potencias fotovoltaica, de baterías, de red y de consumos ( $P_{fv}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{red}$  y  $P_l$  respectivamente) indican el criterio de signos a utilizar en las gráficas siguientes, de forma que  $P_{red} > 0$  implica importación neta de la red ( $P_{red} < 0 \Rightarrow$  exportación) y  $P > 0$  descarga de la batería ( $P_{bat} < 0 \Rightarrow$  carga). La Fig. 2(b) muestra un ejemplo de funcionamiento en un día típico soleado, en el que la generación fotovoltaica se extiende entre las 9 y las 20:30 h (línea de color rojo) y los principales consumos (color verde, lavadora + horno, secadora + vitrocerámica, lavavajillas) se distribuyen en dicho periodo. Como puede observarse, la generación fotovoltaica atiende en primer lugar los consumos, expor-

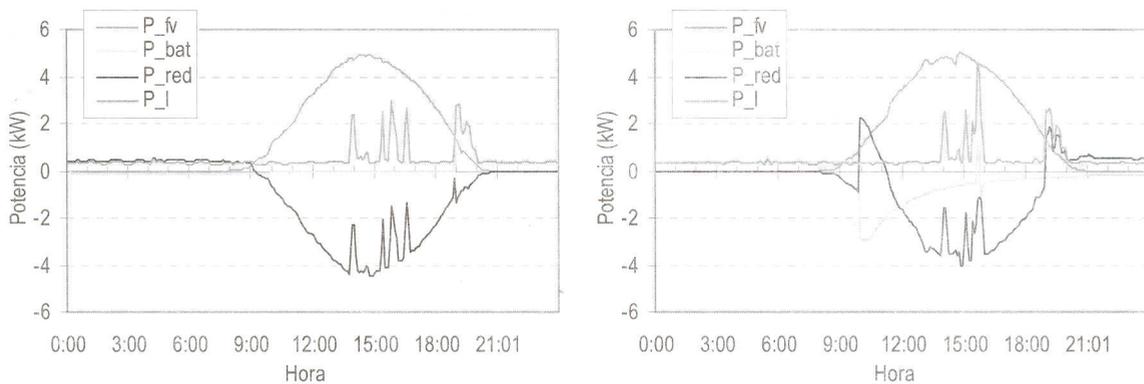
tándose el excedente a la red ( $P_{red} < 0$ ). A lo largo del periodo mencionado, tan sólo en un pequeño intervalo de tiempo (entre las 12:15 y 12:25 h) el consumo es mayor que la generación, resultando una importación de red máxima de 0,6 kW. En términos diarios, el consumo local resultante (11,8 kWh) se satisface en un 69,8% por la generación fotovoltaica y en el 30,2% restante por la red (horas de no generación y pico de demanda antes mencionado).



(a) Configuración de la red local (conexión a red). (b) Día 1: conexión a red convencional (sin baterías).

**Figura 2.** Caracterización experimental del sistema: esquema y día 1.

La Fig. 3 muestra dos ejemplos de uso de las baterías para satisfacer la demanda local. En el día 2, Fig 3 se ha programado la descarga de baterías para cubrir consumos eléctricos de horno y cocina vitrocerámica a partir de las 19:00 h, cuando la generación fotovoltaica es ya relativamente baja. Obsérvese cómo la respuesta dinámica del inversor de batería permite cubrir el rápido incremento de la demanda, de forma que no es necesario importar potencia de la red. En la figura (b) se muestra el día siguiente, en el que la batería ha continuado suministrando los consumos hasta las 10 h (su estado de carga ha bajado del 100% que tenía al inicio del día anterior al 89% al finalizar su descarga), momento en el que comienza a cargarse, inicialmente de la red y generación fotovoltaica y a partir de las 11:20 h. sólo de esta última. La batería continúa cargándose hasta el final del día, y de nuevo se aprecia la respuesta dinámica del sistema entre las 15:40 y 15:50 h cuando el consumo local crece bruscamente (coincidencia en el tiempo de demandas elevadas de lavavajillas y secadora) y entra en descarga la batería: una vez desaparece el pico de consumo la batería pasa nuevamente al régimen de carga, finalzándose esta a las 16:20 h (estado de carga del 100%).



(a) Día 2: batería en descarga.

(b) Día 3: batería en carga y descarga puntual.

**Figura 3.** Caracterización experimental del sistema: días 2 y 3.

En términos diarios el consumo (12 kWh en ambos días) se ha satisfecho, en el día 2, en un 46,4% por la fotovoltaica, en un 27,4% por las baterías y en un 26,2% por la red y, en el día 3, el 48,6%, 29,3% y 22,1% por la fotovoltaica, baterías y red respectivamente. El uso de la energía de la batería puede, por tanto, reducir la demanda de la red de forma programada o puntual, al tiempo que proporcionar una forma de almacenar la electricidad generada localmente y no consumida.

## 4.2 Sistema de control de cargas

En (CASTILLO, M. et. al., (2009)) se muestran los resultados preliminares del sistema de control distribuido para las cargas que permite planificar el consumo de los distintos electrodomésticos para optimizar la eficiencia energética global en un determinado periodo temporal, demostrando así las posibilidades de aprovechamiento inteligente de la electricidad fotovoltaica generada localmente.

## 5 CONCLUSIONES

Se han presentado los objetivos y estructura de un sistema de gestión de la demanda doméstica capaz de desplazar la curva de carga en función de las necesidades y preferencias del usuario, la disponibilidad de generación eléctrica local (incluidas baterías) y señales procedentes de la red eléctrica. De la caracterización experimental realizada se infieren interesantes posibilidades de gestión de la electricidad local generada y/o almacenada que se explorarán conjuntamente con el sistema de control de cargas distribuido antes mencionado para demostrar la viabilidad de una gestión activa de la demanda eléctrica con tecnología fotovoltaica en el ámbito doméstico.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España (Plan Nacional de I+D+i 2004-2007) en el marco del proyecto "Gestión de la Demanda Eléctrica Doméstica con Energía Solar Fotovoltaica" (ENE2007-66135). Los autores desean agradecer a las empresas SMA Technologie, Orbis y BSH Electrodomésticos España por su colaboración, y a la E.T.S.I. Telecomunicación por su apoyo en la construcción y mantenimiento de la vivienda solar "Magic Box".

## 7 REFERENCIAS

- CASTILLO, M. et. al. (2009): "Sistema de Control Distribuido para la Gestión de la Demanda en el Sector Residencial", Actas del I Congreso de Generación Distribuida, Madrid.
- PÉREZ ARRIAGA, J.I. et. al. (2005): "La gestión de la demanda de electricidad" Fundación Alternativas, Madrid
- UEDA, Y. et. al. (2007): "Study on the Over Voltage Problem and Battery Operation for Grid Connected Residential PV Systems". Proceedings 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Conference and Exhibition, Milan (Italia).