

# AUTOCONSUMO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CON GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA: EL SISTEMA GEDELOS-FV

Estefanía Caamaño Martín<sup>(1)</sup> - [estefan@ies-def.upm.es](mailto:estefan@ies-def.upm.es)  
Manuel Castillo Cagigal<sup>(1,2)</sup> - [Manuel.castillo@ies-def.upm.es](mailto:Manuel.castillo@ies-def.upm.es)  
Daniel Masa Bote<sup>(1)</sup> - [dmasa@ies-def.upm.es](mailto:dmasa@ies-def.upm.es)  
Álvaro Gutiérrez Martín<sup>(2)</sup> - [aguti@etsit.upm.es](mailto:aguti@etsit.upm.es)  
Eduardo Matallanas de Ávila<sup>(2)</sup> - [e.matallanas@alumnos.upm.es](mailto:e.matallanas@alumnos.upm.es)  
Félix Monasterio-Huelin Maciá<sup>(2)</sup> - [felix.monasteriohuelin@upm.es](mailto:felix.monasteriohuelin@upm.es)  
F.Javier Jiménez Leube<sup>(3)</sup> - [jleube@etsit.upm.es](mailto:jleube@etsit.upm.es)

Universidad Politécnica de Madrid:

<sup>(1)</sup> Instituto de Energía Solar; <sup>(2)</sup> Departamento de Tecnologías Especiales aplicadas a la Telecomunicación – ETSI Telecomunicación; <sup>(3)</sup> Departamento de Tecnología Electrónica – ETSI Telecomunicación

**Resumen.** El sistema GeDELOS-FV es un ejemplo de valor añadido de la energía solar fotovoltaica que combina tecnología fotovoltaica híbrida de última generación con estrategias de Gestión de la Demanda Eléctrica. En este trabajo se ha configurado el sistema con el objetivo de maximizar la cantidad e energía fotovoltaica generada localmente y consumida por las cargas locales (autoconsumo), tanto de manera directa como indirecta mediante el uso de almacenamiento eléctrico. Se han realizado simulaciones teóricas que relacionan el porcentaje de energía con diferentes capacidades de almacenamiento. Además, se han realizados experimentos reales en un prototipo de vivienda solar autosuficiente con el objetivo de validar los resultados teóricos. Estos estudios se han realizado con y sin Gestión de la Demanda Eléctrica, demostrando las mejoras que produce el uso de esta técnica en el porcentaje de autoconsumo. Como conclusión, se puede afirmar que el uso de sistemas de almacenamiento a pequeña escala y estrategias de Gestión de la Demanda Eléctrica proporcionan un alto nivel de control sobre la energía generada localmente, permitiendo maximizar el aprovechamiento de esta. Esta combinación jugará un papel importante en el desarrollo de las redes inteligentes.

**Palabras-clave:** Fotovoltaica, Gestión de la demanda, Almacenamiento en baterías, Sistemas de control.

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de los precios de la electricidad en todo el mundo, unido al descenso de los precios de la tecnología fotovoltaica hace prever que la paridad de la electricidad fotovoltaica con la electricidad convencional procedente de la red eléctrica puede alcanzarse en los próximos diez años en la Unión Europea (ASIF, 2009). Este hecho, unido al progresivo descenso en las primas por inyección a red de la electricidad fotovoltaica y a la aparición de incentivos para promover el autoconsumo (existentes en Alemania desde el año 2009 y actualmente en debate en España) sugieren que se deben explorar nuevos modos de funcionamiento de la generación fotovoltaica distribuida. Un ejemplo de un modo de funcionamiento alternativo es la integración de la demanda local y el patrón de generación local, de manera que se pueda alcanzar un uso óptimo de la energía fotovoltaica generada localmente. Este aumento del consumo local no sólo tiene ventajas técnicas como puede ser reducir las pérdidas de transporte eléctrico y dar mayor estabilidad al sistema energético local, sino que reduce el efecto económico que tienen las subidas de precios de la tarifa eléctrica en el usuario.

## 2. GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA

La Gestión de la Demanda Eléctrica (GDE) se define en este artículo como el conjunto de acciones cuyo objetivo común es influir sobre el uso que los consumidores hacen de la electricidad, de forma que se produzcan los cambios deseados, tanto para producir un ahorro de energía como para aumentar la eficiencia, ya sea en el ámbito individual como en la curva de demanda agregada (J.I. Pérez et al., 2005). Conviene resaltar que la propia Comisión Europea, en un análisis realizado para diseñar la estrategia a seguir para garantizar la seguridad de suministro energético concluye que, ante las escasas posibilidades para actuar en el suministro, ésta debe concentrarse en la actuación sobre la demanda (European Commission, 2002).

La combinación de la GDE con tecnologías híbridas de generación fotovoltaica de última generación (inversores conectados a red con sistemas de almacenamiento de pequeña escala y control activo de la interfaz de red) es un nuevo concepto llamado Gestión Activa de la Demanda Eléctrica (GADE) que no sólo permite optimizar el uso de la generación fotovoltaica, sino que puede proporcionar beneficios para otros consumidores conectados a la red eléctrica

(a través de estrategias cooperativas) así como para la propia red (en respuesta a comandos procedentes del Operador de la Red, por ejemplo, para contribuir a la estabilidad de la red).

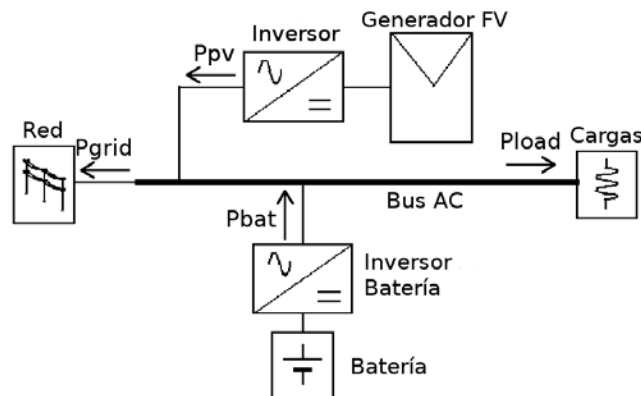
Los consumidores residenciales pueden ser los primeros beneficiados del uso de estrategias de GADE mediante el uso de tecnologías de control que faciliten (automaticen) las tareas de gestión de la demanda sin comprometer la satisfacción de necesidades y preferencias del usuario. Actualmente la GADE esta incrementando sus posibilidades de implementación debido a la aparición en el mercado de electrodomésticos y dispositivos electrónicos con capacidad de monitorización y control (M. Hinnells, 2008). Por otro lado, la implementación de la GADE debe afrontar una serie de retos:

- Desde una perspectiva de la ingeniería fotovoltaica, es necesaria la supervisión y gestión del sistema eléctrico en tiempo real, así como predicciones de generación a corto plazo (por ejemplo, en un horizonte a 24 horas).
- Desde una perspectiva de la ingeniería de control, se debe disponer de capacidad de control sobre un parte de la demanda de forma que esta pueda ser modificada en función de diferentes variables de estado que influyen en el perfil de demanda. Además, debe de ser tomada en cuenta información proveniente del sistema energético local y la red eléctrica.

Estos retos han motivado el desarrollo del proyecto “Gestión de la Demanda Eléctrica Doméstica con Tecnología Solar Fotovoltaica” (GeDELOS-FV), llevado a cabo por diferentes departamentos e institutos de la Universidad Politécnica de Madrid. En este artículo se demuestran las posibilidades de la GADE para optimizar el uso de generación fotovoltaica local.

## 2.1 El Factor de autoconsumo

La Fig. 1 muestra un diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red eléctrica. En el diagrama se puede observar las principales variables de potencia que son manejadas en nuestros experimentos ( $P_{pv}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{grid}$  y  $P_{load}$ ), donde las flechas marcan el sentido positivo de la potencia en nuestras ecuaciones.



**Figura 1:** Esquema del sistema híbrido con generación fotovoltaica

Con el objetivo de maximizar el uso de la energía local, se ha establecido que el sistema de almacenamiento (banco de baterías) tan sólo puede cargarse con energía proveniente de la generación local (generadores fotovoltaicos) no permitiéndose almacenar energía de la red eléctrica. Por otro lado, también se ha establecido que la descarga de batería tan sólo puede producirse para abastecer a las cargas locales y por tanto no se puede entregar energía proveniente del sistema de almacenamiento a la red eléctrica.

Las siguientes ecuaciones definen los balances eléctricos en el sistema:

- Respecto a la generación fotovoltaica:

$$E_{pv} = E_{pv,load} + E_{pv,bat} + E_{pv,grid} \quad (1)$$

donde  $E_{pv,load}$ ,  $E_{pv,bat}$  y  $E_{pv,grid}$  son la energía fotovoltaica que alimenta directamente a las cargas, la almacenada en baterías y la entregada a la red eléctrica respectivamente.

- La relación al almacenamiento en baterías:

$$E_{pv,bat} = E_{bat,load} + E_{bat(SoC)} - E_{bat(SoC,0)} \quad (2)$$

donde  $E_{pv,bat}$  es la energía fotovoltaica almacenada en baterías,  $E_{bat,load}$  es la energía extraída de batería y entregada a las cargas,  $E_{bat(SoC)}$  es el estado de carga de batería (SoC en sus siglas inglesas) al final del periodo de tiempo analizado y  $E_{bat(SoC,0)}$  es el estado de carga de batería al comienzo de dicho periodo.

- Respecto a la demanda local:

$$E_{load} = E_{pv,load} + E_{bat,load} + E_{grid,in} \quad (3)$$

donde  $E_{\text{grid,in}}$  es la electricidad importada desde red.

Con el objetivo de evaluar nuestro sistema se ha definido el factor de autoconsumo ( $\xi$ ). Este factor indica el porcentaje de energía demandada que es abastecido por las fuentes locales, tanto directamente como indirectamente:

$$\xi = \frac{E_{\text{pv,load}} + E_{\text{bat,load}}}{E_{\text{load}}} \quad (4)$$

El rango de este factor está comprendido entre 0 y 1 ( $\xi \in [0,1]$ ), donde 0 significa que toda la energía demanda ha sido entregada por la red eléctrica, por ejemplo una vivienda clásica sin fuentes locales y 1 indica que toda la energía demanda ha sido entregada por fuentes locales, por ejemplo un sistema aislado.

### 3. EL SISTEMA GEDELOS-FV

#### 3.1 Descripción general

El sistema GeDELOS-FV es un ejemplo de valor añadido de la electricidad fotovoltaica combinando tecnología híbrida de última generación con GADE. El principal objetivo de este sistema es abastecer las necesidades energéticas del usuario optimizando el uso de la electricidad fotovoltaica. Para conseguir este objetivo se han seguido dos estrategias principales: i) el uso de un sistema de almacenamiento en baterías de pequeña escala para poder usar la energía fotovoltaica de manera indirecta y ii) modificar el patrón de consumo local (GADE) integrándolo con el patrón de generación local (E. Caamaño-Martín et al., 2009).

El sistema ha sido desarrollado en un prototipo de vivienda solar auto-suficiente llamado “MagicBox”. Esta vivienda esta dotada de 7 kWp de generador fotovoltaico distribuido en 4 planos de captación (12°, 25°, 39° y 90°) y 6 ramas independientes (1 rama = conjunto de módulos asociados en serie y conectados a un mismo inversor), 7.7 kW de potencia de conexión con la red eléctrica, 5 kW de potencia nominal del inversor de batería con 36 kWh de capacidad de banco de batería. Además, dispone de una estación meteorológica que toma medidas de irradiancia y temperatura ambiente y un complejo sistema de monitorización de los flujos de potencia existentes dentro de la vivienda mediante el uso de contadores eléctricos digitales e información proveniente de los inversores tanto de fotovoltaica como de batería. La vivienda también dispone de electrodomésticos típicos de una casa altamente electrificada (lavadora, secadora, lavavajillas, frigorífico, congelador, vitrocerámica, aire acondicionado, iluminación, horno y dispositivos audiovisuales). Las cargas de mayor consumo (cocina y electrodomésticos de lavado) son controlados remotamente usando tecnologías de comunicación e información y son considerados cargas “diferibles”, por otro lado las el resto de cargas (iluminación, ordenadores, etc.) son consideradas cargas “no diferibles” y su momento de trabajo es indicado instantáneamente por el usuario.

La Fig. 2(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 energía —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. La Fig. 2(b) muestra una imagen del prototipo “Magic Box”.

Por encima de la instalación anteriormente descrita, la cual correspondería a la parte hardware del sistema GeDELOS-FV, se encuentran una serie de herramientas software que supervisan el funcionamiento de los componentes del sistema y controlan los flujos de potencia mediante el inversor de batería y las cargas diferibles. Con todo esto se definen las principales características del sistema como:

- En el nivel de Supervisión, se ha desarrollado un bloque de predicciones que proporciona estimaciones de la producción fotovoltaica horaria en la próximas 24 horas. Estas estimaciones están basadas en predicciones de irradiancia solar y temperatura ambiente provenientes de la Agencia Española de Meteorología, junto a modelos que tiene en cuenta las características particulares de la instalación fotovoltaica.
- En el nivel del Control de Cargas, el control de la demanda de la vivienda es realizado por un planificador compuesto por una parte distribuida y otra centralizada, como podemos ver en la Fig. 3 (Castillo et al., 2009). La parte distribuida del planificador esta dividida en agentes, donde cada agente representa un electrodoméstico. Estos agentes contienen información sobre el consumo de su electrodoméstico asociado (la curva de consumo en potencia y el tiempo de duración de una tarea como por ejemplo poner una lavadora a 90°), las ordenes que puede realizar y un módulo de comunicaciones encargado en comunicarse con los demás agentes. Cada agente produce una planificación de acuerdo con las preferencias y necesidades del usuario, el estado del sistema energético y las predicciones de generación fotovoltaica. La parte centralizada del planificador (Coordinador) recibe las planificaciones realizadas por los diferentes

agentes y evalúa energéticamente cada una de ellas. Finalmente el Coordinador pasa a decidir una de las planificaciones de acuerdo a un criterio energético, en nuestro caso la maximización de autoconsumo, para posteriormente enviar las órdenes de actuación a los electrodomésticos en los momentos indicados en la planificación. Con todo esto queda implementado el sistema de GADE dentro del sistema GeDELOS-FV.

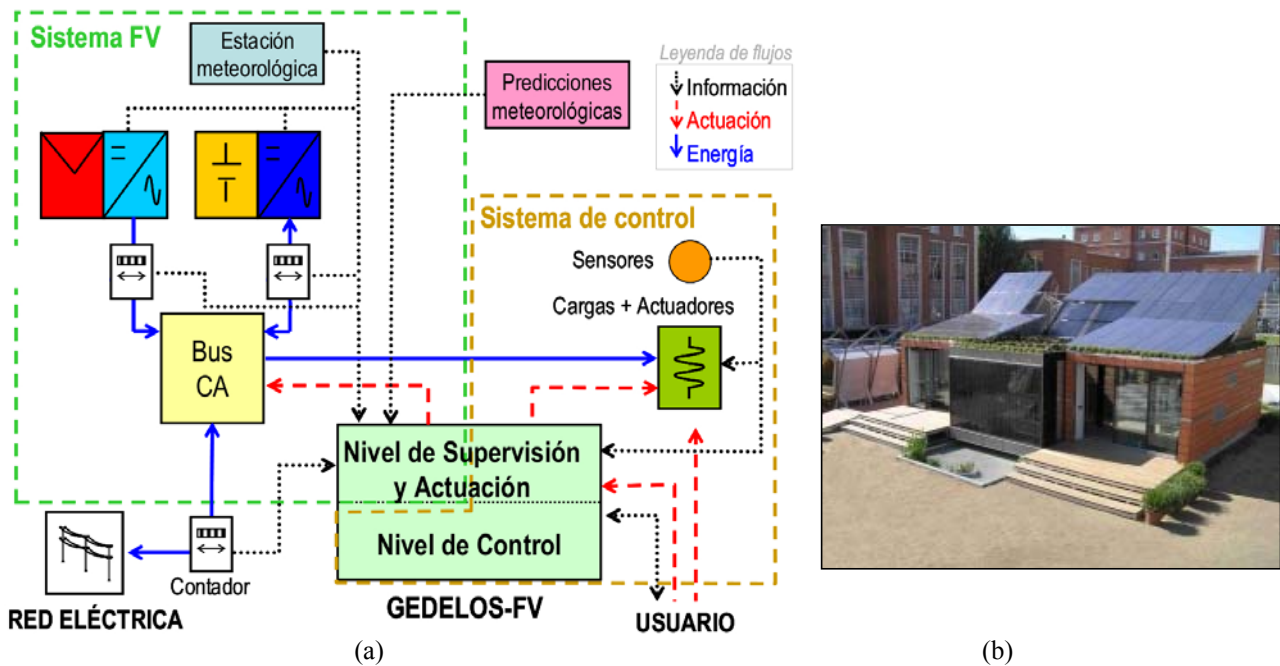


Figura 2: Sistema GEDELOS-FV (a) Estructura del sistema (b) Prototipo "magic Box"

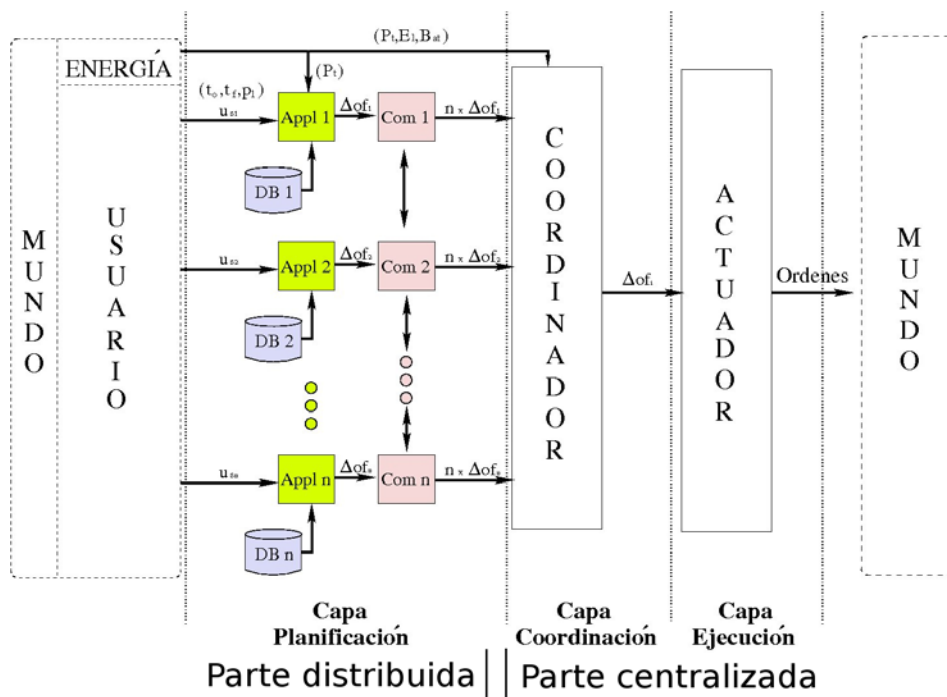


Figura 3: Arquitectura del sistema de GADE

- Asimismo, se ha desarrollado un Controlador de Batería que determina el uso de la energía fotovoltaica de forma indirecta y con ello los flujos de potencia en la vivienda. Este controlador de batería es un controlador de alto nivel que hace uso de los limitadores de corriente del inversor de batería para modificar la carga y descarga de las baterías (M. Castillo, 2010). El objetivo de este controlador es maximizar el autoconsumo ( $\xi$ ) controlando los flujos de potencia y variando su estado de funcionamiento en función del SoC de la batería (ver Fig. 4):

- Estado “Autoconsumo”: es el estado principal de funcionamiento y en el cual se maximiza el autoconsumo de la vivienda. En este estado las baterías tiene capacidad suficiente para almacenar más energía y energía suficiente como para abastecer la demanda eléctrica ( $20\% < \text{SoC} < 95\%$ ). Por lo tanto, no es necesaria la red eléctrica para el correcto funcionamiento de la vivienda, por ello el excedente de energía fotovoltaica es almacenado en baterías y la demanda que no pueda ser abastecida por los generadores fotovoltaicos es entregada por la batería. En este estado no hay intercambio energético con la red y por tanto  $\xi = 1$ .
- Estado “Sobrecarga”: en este estado la batería se encuentra en un SoC muy elevado ( $\text{SoC} = 95\%$ ) siendo perjudicial para la vida de la batería seguir introduciendo energía en ella. En este caso el excedente fotovoltaico es entregado a la red eléctrica y el excedente de consumo es abastecido por la batería.
- Estado “Sobredescarga”: en este estado la batería se encuentra en un SoC demasiado bajo siendo posible dañar la batería. Por lo tanto no se extrae más energía de la batería siendo el excedente de consumo abastecido por la red eléctrica y el excedente fotovoltaico almacenado en batería.

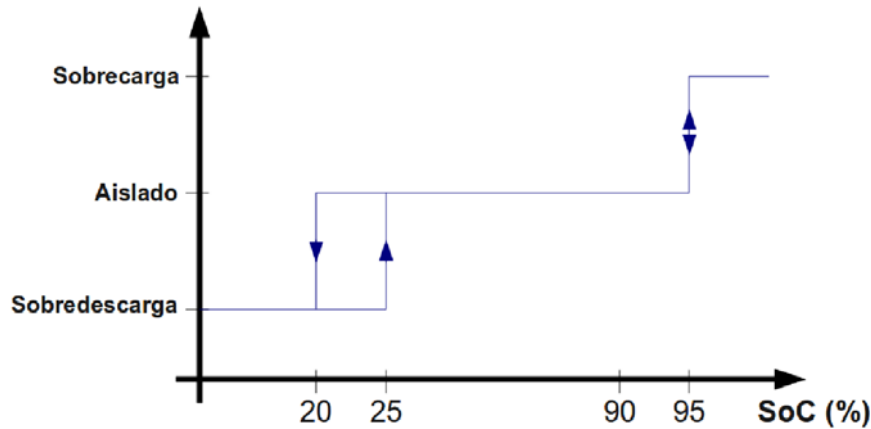


Figura 4: Cambios de estado del controlador de batería

### 3.2 Nuevos parámetros característicos

Con el objeto de identificar los flujos de electricidad en el interior de la red local (instalación interior de la vivienda, incluyendo la interfaz con la red eléctrica) se han definido nuevos parámetros característicos que complementan los tradicionalmente empleados para sistemas fotovoltaicos conectados a la red (IEA-PVPS, 2001; Caamaño-Martín et al., 2009):

- Uso de la electricidad fotovoltaica. Como es bien sabido, la normalización de la producción eléctrica de la instalación fotovoltaica ( $E_{pv}$ ) con respecto a la potencia nominal del generador fotovoltaico ( $P_{nomG}$ ) da lugar al parámetro “Productividad final” ( $Y_f$ , del inglés “Final Yield”). A partir de la ecuación (1) este parámetro se puede descomponer en la fracción destinada a abastecer la demanda, la carga en baterías y la inyección a la red:

$$Y_f (h) = \frac{E_{pv}}{P_{nomG}} = \frac{E_{pv,load}}{P_{nomG}} + \frac{E_{pv,bat}}{P_{nomG}} + \frac{E_{pv,grid}}{P_{nomG}} = Y_{f,load} + Y_{f,bat} + Y_{f,grid} \quad (5)$$

- Uso de la electricidad almacenada en baterías. Se propone el parámetro “Factor de uso de batería”:

$$F_{bat} (h) = \frac{E_{bat} (> 0)}{P_{nomG}} \quad (6)$$

siendo  $E_{bat}$  la energía entregada por el inversor de batería en el modo de descarga ( $P_{bat} > 0$ ).

Este factor puede descomponerse a su vez en dos, dependiendo del uso final de la electricidad almacenada para suministro de las cargas locales o inyección a la red ( $F_{bat,l}$  y  $F_{bat,grid}$ ):

$$F_{bat} = F_{bat,load} + F_{bat,grid} \quad (7)$$

En el caso que nos ocupa, el controlador de batería desarrollado evita en todo momento la carga y descarga de las baterías desde/hacia la red eléctrica, es decir:  $F_{bat,grid} = 0$ .

- Uso de la red eléctrica. Se propone el parámetro “Factor de uso de la red”:

$$F_{grid} (h) = \frac{E_{grid,in}}{P_{nomG}} \quad (8)$$

Al igual que en el caso anterior, este factor puede descomponerse en dos, en función del uso de la electricidad para abastecer las cargas locales o cargar la batería:

$$F_{grid} = F_{grid,load} + F_{grid,bat} \tag{9}$$

Como se ha mencionado anteriormente, el controlador de batería desarrollado evita en todo momento el uso de la red para cargar las baterías, esto es:  $F_{grid,bat} = 0$ .

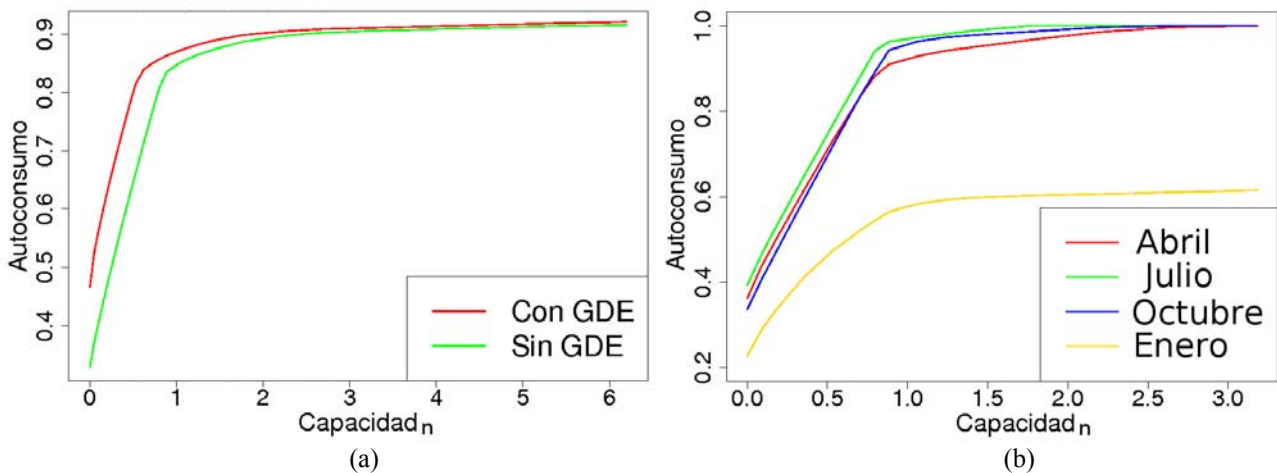
El interés de definir los parámetros anteriores estriba en la posibilidad de comparar el uso de la batería, la red y el sistema fotovoltaico en términos de “horas equivalentes” de funcionamiento de este último (véase la normalización realizada con respecto a la potencia nominal del generador). Además, pueden utilizarse en términos instantáneos (de potencias) o integrados (energías), lo que permite realizar un seguimiento detallado de los flujos eléctricos en el sistema.

### 3.3 Resultados de simulaciones teóricas

Con el objetivo de hacer experimentos de larga duración y con diferentes parámetros de funcionamiento del sistema se ha desarrollado un simulador que modela el comportamiento eléctrico de la vivienda. Se han realizado simulaciones haciendo de un perfil real de generación de un año completo (desde 14/7/2009 hasta 13/7/2010) medido por el mismo sistema GeDELOS-FV anteriormente. Como patrón de consumo se ha fijado una demanda diaria de 11,31 kWh, con una distribución a lo largo del día típica de un día entre semana en una familia española, donde la mayoría del consumo se produce a las últimas horas del día (ver Fig. 6(a)). La demanda diferible y por tanto la controlable por el sistema de GADE representa el 22% del consumo total, el cual corresponde a la lavadora, el lavavajillas y la secadora. Además, con el objetivo de que la generación sea proporcional a la demanda, el perfil de generación ha sido atenuado a un generador de 5,6 kWp de potencia nominal (en vez de los 7 kWp instalados realmente en la vivienda) quedando una generación anual de 5,71 MWh.

La Fig. 5 muestra los resultados generales de las simulaciones. Se ha representado el factor de autoconsumo ( $\xi$ ) en función de la capacidad en baterías, para lo cual se ha simulado el funcionamiento del sistema sin GADE durante un año completo por cada valor de capacidad e interpolando los puntos se ha obtenido la curva verde de la figura. Posteriormente se ha seguido el mismo procedimiento activando el sistema de GADE obteniéndose la curva roja representada en la figura. La capacidad de batería se muestra normalizada por el consumo diario (11,31 kWh), de esta manera la capacidad queda representada en días de autonomía, como se suele mostrar en los sistemas aislados:

$$C_n = \frac{C_{bat}(\text{kWh})}{E_{load}(\text{kWh})} \tag{10}$$



**Figura 5:** (a) Resultados estudio anual (b) Resultados estudio mensual

Del estudio de estas curvas se deduce:

- Para ambos casos existe una primera región de pequeña capacidad (hasta aproximadamente un día de autonomía), para la cual existe una fuerte pendiente en la evolución de la curva capacidad-autoconsumo. Para capacidades elevadas ambas curvas se saturan siendo necesario un gran aumento en la capacidad del sistema para poder conseguir incrementos considerables en el autoconsumo. En la zona de transición de estas dos regiones se encuentra la capacidad de batería recomendada, la cual no debe de ser excedida para conseguir un equilibrio entre autoconsumo y tamaño del sistema de almacenamiento.
- Un punto relevante de estas curvas es para  $C_n=0$ , es decir sin presencia de batería. Para este caso y sin GADE, se alcanza un  $\xi=0.33$  (33%), este porcentaje es la cantidad de energía consumida que coincide con la generación fotovoltaica de forma natural. Con presencia de GADE tenemos un  $\xi=0.47$  (47%), experimentando el autoconsumo un aumento del 14% gracias a la presencia de esta técnica.
- Si observamos la dos curvas de la Fig. 4(a) vemos como la mejora que produce el sistema de GADE no es constante. Para pequeños valores de capacidad esta mejora es del orden del 15% y pasa a disminuir conforme aumenta la capacidad. Esto se debe principalmente a que conforma mayor sea el sistema de almacenamiento,

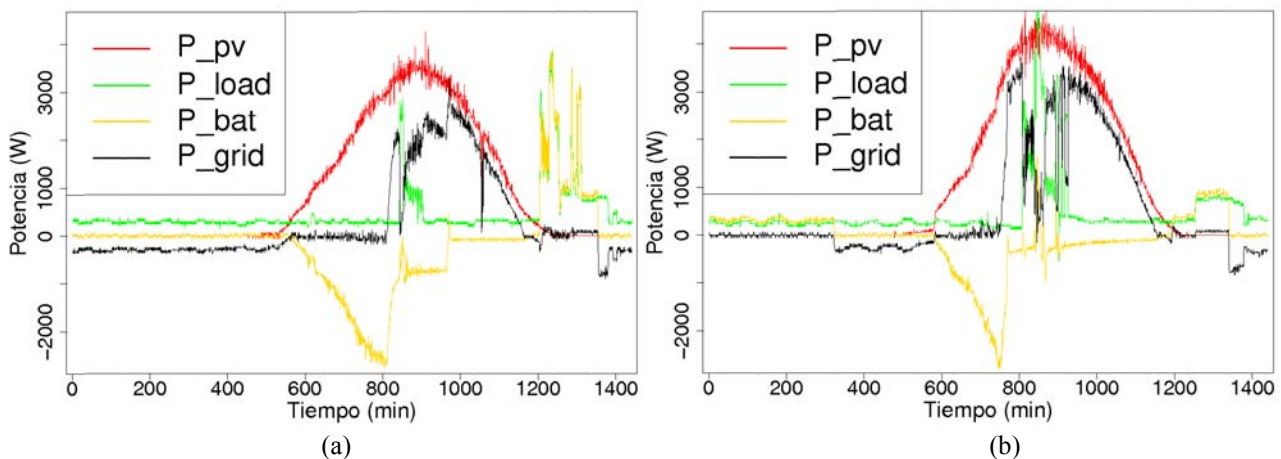
más cantidad de energía fotovoltaica es consumida de forma indirecta y por tanto menor será el efecto de hacer coincidir el patrón de demanda eléctrica con el patrón de generación.

Los resultados anuales no permiten ver la evolución a lo largo del año del autoconsumo, aunque para una vivienda interesa en la mayoría de los casos la media anual. Este estudio también se ha realizado en periodos mensuales para todos los meses del año, en este caso las curvas capacidad-autoconsumo evolucionarán rápidamente para los meses de verano, consiguiéndose niveles de autoconsumo del 100% para valores pequeños de capacidad y se saturarán a valores menores para los meses de invierno debido a la falta de generación local (ver Fig. 5(b)).

### 3.4 Resultados experimentales

Se han realizado medidas en experimentos reales de funcionamiento durante los meses de julio, agosto y septiembre de 2010 con el objetivo de validar el sistema GeDELOS-FV. En esta sección se han resumido los resultados de dos semanas de funcionamiento ininterrumpido de la casa (sistema FV híbrido + cargas + sistema GeDELOS-PV). La demanda eléctrica diaria varía entre 11 y 13 kWh y la capacidad de batería ha sido de 5,4 kWh ( $C_n = 0,5$ ). Las variables de potencia han sido medidas cada minuto siguiendo el criterio de signos explicado en la Sec. 2. Asimismo, se han registrado las condiciones de operación (irradiancia incidente en los módulos fotovoltaicos, temperatura ambiente, humedad relativa), y las potencias DC y AC a la entrada/salida de los inversores.

La Fig. 6(a) muestra los flujos de potencia para un día sin GADE, tan solo con el sistema de batería, donde las cargas se sitúa a medio día y en torno a las 20:00 horas cuando ya no hay presencia de generación fotovoltaica. Se puede observar como la demanda eléctrica nocturna es abastecida por las baterías hasta que esta es descargada ( $SoC < 20\%$ ) y es necesario tomar energía de la red eléctrica. En presencia de exceso de potencia fotovoltaica la batería comienza a cargarse hasta que alcanza el estado de sobrecarga y por tanto el exceso de generación pasa a ser exportado a la red eléctrica. En las horas centrales del día se puede observar un pico de consumo, al cual es abastecido por la generación fotovoltaica sufriendo la red un decremento de la potencia que estaba recibiendo.



**Figura 6:** Resultados de medidas experimentales (a) Sin GADE (b) Con GADE

La Fig. 6(b) muestra otro día de medidas, en este caso con presencia del sistema de GADE, donde las cargas diferibles han sido desplazadas a las horas centrales del día con el objetivo de aprovechar el máximo posible la energía generada localmente y con ello aumentar considerablemente el factor de autoconsumo. El funcionamiento del sistema de almacenamiento es similar al del ejemplo anterior, la principal diferencia se ve en las horas de la noche, donde al verse reducida la demanda eléctrica la instalación es capaz de autoabastecerse energéticamente durante más tiempo. En este ejemplo se puede observar un pico de consumo muy elevado a las horas centrales del día, llegando a ser la potencia demanda mayor que la generación. En este caso las baterías pasan a descargarse, ayudando a la generación fotovoltaica a abastecer este exceso de potencia demandada y evitando la importación de energía de la red eléctrica. Es de notar que existe potencia demandada de la red, aunque teóricamente no debería de ocurrir, esto se debe principalmente a retardos entre los equipos de medida, comunicación y actuación creando situaciones indeseadas. Pero estas situaciones aún pudiendo llegar a ser relevantes en potencia no lo son en energía, ya que representan periodos de tiempo reducidos y por tanto cantidades energéticas varios órdenes de magnitud menores que las manejadas durante el resto del día.

La Tab. 1 muestra los resultados de las principales variables energéticas y factor de autoconsumo ( $\xi$ ) para los días anteriormente mostrados y las medias semanales de estos valores. Se indican asimismo, en la parte inferior de la tabla, las pérdidas debidas al almacenamiento eléctrico ( $E_{lost,bat}$ , en kWh y como porcentaje de la energía útil producida por el sistema,  $E_{pv}$ ) y, dentro de éstas, las debidas al inversor de batería ( $E_{lost,inv-bat}$ , en porcentaje de las pérdidas debidas al almacenamiento).

**Tabla 1:** Resultados de medidas experimentales: energías y factor de autoconsumo

	<b>Día sin GADE</b>	<b>Semana sin GADE</b>	<b>Día con GADE</b>	<b>Semana con GADE</b>
$E_{load}$ (kWh)	11,974	10,818	11,960	11,788
$E_{pv}$ (kWh)	22,392	22,887	25,479	23,149
$E_{pv,load}$ (kWh)	4,161	3,817	6,326	6,130
$E_{pv,bat}$ (kWh)	8,211	8,231	5,338	5,911
$E_{pv,grid}$ (kWh)	10,020	10,839	13,815	11,108
$E_{bat,load}$ (kWh)	4,139	3,819	3,569	3,642
$E_{grid}$ (kWh)	3,674	3,183	2,065	2,832
$\xi$ (%)	69,3	70,7	83,0	77,8
$E_{lost,bat}$ (kWh)	4,074	4,010	2,613	2,832
(% $E_{pv}$ )	18,2	17,5	10,1	12,3
$E_{lost,inv-bat}$ (kWh)	0,899	0,845	0,901	0,818
(% $E_{lost,bat}$ )	22,1	21,1	29,3	29,4

Obsérvese que los resultados del factor de autoconsumo para los días que no hubo GADE son coherentes con los valores mostrados en la Fig. 5(b) para los meses típicos de verano (julio en nuestro caso). Además, los incrementos en el factor de autoconsumo debidos al uso de GADE son coherentes con las simulaciones y demuestran las mejoras esperadas tras realizar el estudio teórico del problema. En lo que respecta a las pérdidas, se pueden observar valores relativamente elevados debido al uso de un sistema de almacenamiento (entre el 17 y el 18 por ciento de la electricidad útil producida por el sistema fotovoltaico). Se considera que estas pérdidas pueden ser reducidas adecuando el tamaño del sistema de almacenamiento: ya que la capacidad de batería real utilizada en los experimentos es de 36 kWh, para poder emular una capacidad de 5.4 kWh se han limitado mediante software los límites del SoC permitido (entre el 88% y 100%), lo que ha dado lugar a que la mayoría del tiempo la batería haya estado trabajado en zonas cercanas a la sobrecarga donde su rendimiento farádico es bajo.

La Fig. 7 muestra los flujos eléctricos definidos por las ecuaciones (5)–(9) de los 2 días representados en la Fig. 5 en términos horarios. De la comparación de ambas figuras se observa claramente el efecto de la Gestión Activa de la Demanda Eléctrica, la cual permite optimizar el uso directo de la electricidad fotovoltaica (parámetro  $Y_{f,load}$ ) así como reducir el uso de la batería ( $Y_{f,bat}$  y  $F_{bat,load}$ ). Resulta notable observar cómo el uso de la red eléctrica, para alimentar consumos únicamente, no supera en ningún momento el valor normalizado de 0,1, equivalente a 0,56 kW.

La Tab. 2 los resultados diarios de los días mostrados en la figura anterior, así como el promedio diario de las 2 semanas de experimentos realizada. Se ha añadido a la tabla los valores de la productividad de referencia, que caracteriza el emplazamiento del generador en términos de “horas de sol equivalentes” a una irradiancia constante e igual a 1000 W/m<sup>2</sup> y se define como:

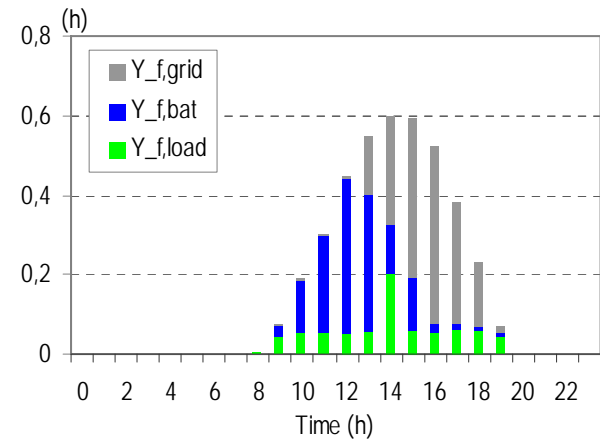
$$Y_r(h) = \frac{E_{incident}(W/m^2)}{1000 W/m^2} \quad (11)$$

**Tabla 2:** Resultados de medidas experimentales: parámetros característicos

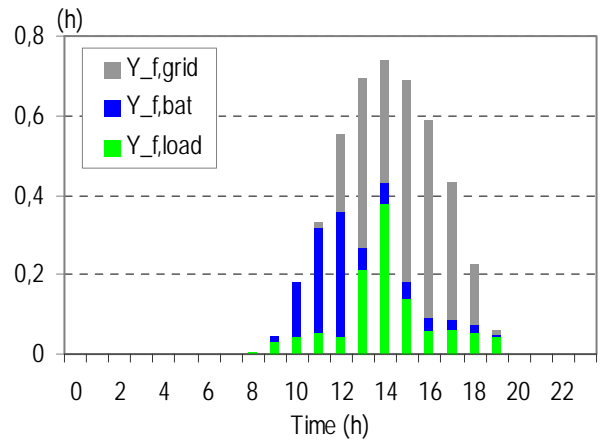
	<b>Día sin GADE</b>	<b>Semana sin GADE</b>	<b>Día con GADE</b>	<b>Semana con GADE</b>
$Y_r$ (h)	6,650	6,725	6,604	6,093
$Y_f$ (h)	4,017	4,102	4,570	4,152
$Y_{f,load}$ (h)	0,746	0,718	1,135	1,100
$Y_{f,bat}$ (h)	1,473	1,443	0,957	1,060
$Y_{f,grid}$ (h)	1,797	1,941	2,478	1,992
$F_{bat}$ (h) = $F_{bat,load}$ (h)	0,742	0,788	0,640	0,653
$F_{grid}$ (h) = $F_{grid,load}$ (h)	0,659	0,584	0,370	0,505

El análisis de los resultados numéricos corrobora los comentarios anteriores. Comparando los resultados de los días sin y con GADE, el porcentaje del consumo diario suministrado directamente por la electricidad fotovoltaica se incrementa desde un 35% a un 53%; el porcentaje del consumo suministrado indirectamente por la fotovoltaica (a través de las baterías) pasa de ser un 35% al 30%; finalmente, el uso de la red para suministrar el consumo diario se reduce del 30% al 17%. Nótese cómo la red en ningún momento se ha utilizado para cargar las baterías o verter la electricidad almacenada en éstas ( $F_{grid,bat} = 0$  y  $F_{bat,grid} = 0$ ). En términos semanales (semana sin y con GDE), el porcentaje del consumo suministrado directamente por la electricidad fotovoltaica se incrementa desde un 36% a un 49%; el porcentaje del consumo suministrado indirectamente (a través de las baterías) pasa de ser un 35% al 28%; finalmente, el uso de la red para suministrar el consumo se reduce del 29% al 22%.

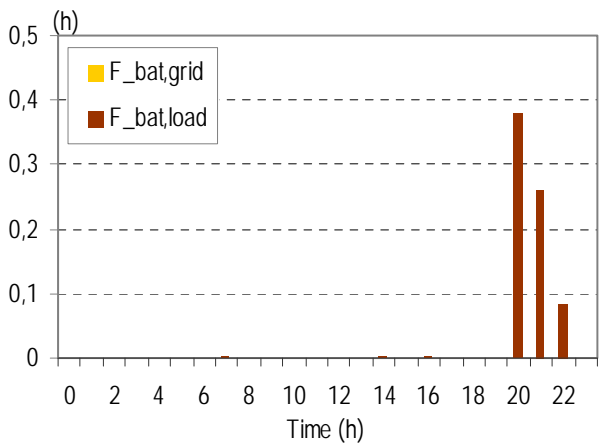




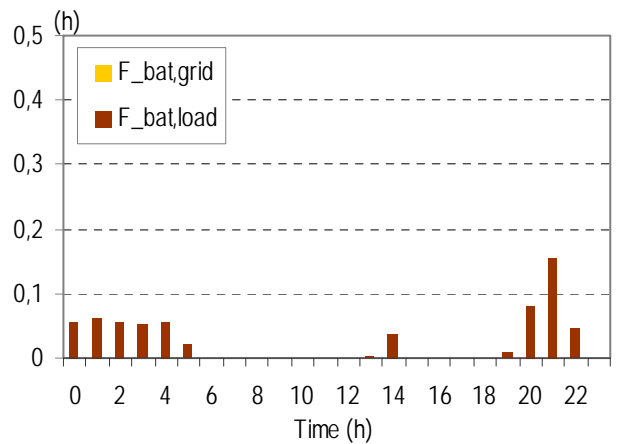
(a) Uso de electricidad fotovoltaica, sin GADE



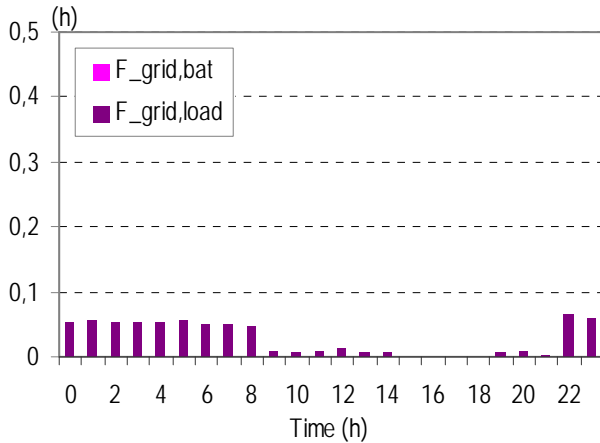
(b) Uso de electricidad fotovoltaica, con GADE



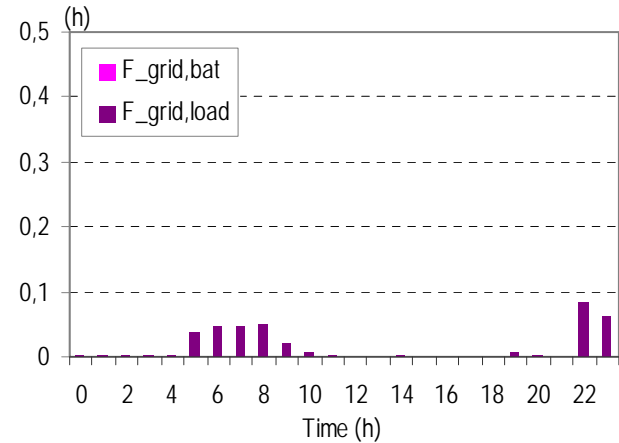
(c) Uso de electricidad almacenada, sin GADE



(d) Uso de electricidad almacenada, con GADE



(e) Uso de la red, sin GADE



(f) Uso de la red, con GADE

**Figura 7:** Parámetros característicos de 2 días sin GADE (a,c,e) y con GADE (b,d,f)

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado un sistema de Gestión Activa de la Demanda Eléctrica completo, haciendo uso del control directo de la demanda de una vivienda junto a un sistema híbrido de generación fotovoltaica, el sistema GeDELOS-FV. En es te estudio el sistema ha sido configurado para maximizar el uso de la energía generada localmente (autoconsumo), tanto de forma directa como indirecta.

Se han realizado simulaciones de los flujos energéticos de la vivienda durante un año completo para diferentes valores de capacidad con y sin GADE. Con ellos se ha representado la relación entre la capacidad y el factor de autoconsumo mostrando una relación no lineal entre ambos. De estas curvas se puede deducir que para pequeños valores de capacidad ( $C_n < 1$ ) las curvas crecen rápidamente pasando a saturarse para valores mayores. Esto es un criterio de diseño importante a la hora de dimensionar un sistema fotovoltaico híbrido que debe de ser tenido en cuenta para conseguir un correcto equilibrio entre beneficios energéticos y tamaño del sistema de almacenamiento, pudiéndose ser traducido este tamaño en costes de la instalación. Además, Se ha observado una relación similar en los beneficios del uso de GADE, siendo estos mayores para valores de capacidad menores.

También han sido llevados a cabo medidas experimentales durante dos semanas en el prototipo de vivienda solar autosuficiente “MagicBox”. Se ha podido demostrar que la GADE aumenta de forma considerable (en torno al 11% de media semanal) el factor de autoconsumo ayudando a aprovechar lo máximo posible la energía generada localmente y a depender en menor medida de la red eléctrica, incluso en el caso de no existir sistemas de almacenamiento se consiguen valores del factor de autoconsumo anual similares a los conseguidos con el uso de un sistema de almacenamiento a pequeña escala (GADE consigue un  $\xi = 47\%$  con  $C_n=0$  y sin GADE es necesario tener un  $C_n=0.2$  para conseguir este mismo nivel). El uso de GADE tiene múltiples ventajas, a continuación se nombran algunas relacionadas con el presente estudio:

- Reducción de pérdidas: Esta técnica hace principalmente uso de técnicas software, esto implica que no afectan al comportamiento físico del sistema energético y por tanto no existen pérdidas relacionadas con la eficiencia.
- Reducción del tamaño de batería: El uso de esta técnica permite emplear sistemas de almacenamiento de menor escala y por tanto reducir los costes del sistema.
- Mayor control energético: La posibilidad de gestionar la demanda eléctrica permite implementar nuevos comportamientos energéticos de cara a la red y con ello conseguir mayores niveles de estabilidad.
- Escalabilidad: Al ser sistemas software y hacer uso de un nivel de electrónica sencillo, permiten la fácil implementación y expansión en diferentes sistemas independientemente del tamaño.

Como conclusión general, a través del sistema “GeDELOS-FV” se ha demostrado que la combinación de sistemas de almacenamiento a pequeña escala combinado con técnicas de Gestión Activa de la Demanda mejoran considerablemente el uso de la energía local incrementando e valor añadido de tecnologías como la fotovoltaica. Esta combinación jugará un papel importante en la evolución de las llamadas redes inteligentes, las cuales necesitan de la introducción de nuevas técnicas de gestión en las redes actuales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia Español (Plan Nacional I+D+I 204-2007) como parte del proyecto “Gestión de la Demanda Eléctrica Doméstica con Tecnología Solar Fotovoltaica ” (GeDELOS-FV, ENE2007-66135). Los autores también quieren agradecer a los fabricantes de los componentes fotovoltaicos (SMA-Ibérica), electrodomésticos (Siemens) y contadores eléctricos (Orbis) su ayuda en el soporte técnico, y a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación por su ayuda en la construcción y mantenimiento del prototipo “MagicBox”.

## REFERENCIAS

- ASIF “Informe Estratégico para el sector fotovoltaico en España: acercándonos a la paridad de red”, Informe ASIF (2009).
- E. Caamaño-Martín, D. Masa, A. Gutiérrez, F. Monasterio, M. Castillo, J. Jiménez-Leube, J. Porro, “Optimizing PV use through Active Demand Side Management”. Proceedings 24<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference (2009), pp. 3149-3155, Hamburg (Alemania).
- European Commission, “Towards a EU strategy for the security of energy supply”, COM (2002) 321, 2002.
- International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Program, Task 2, “Country reports on PV system performance”, IEA-PVPS T2-05:2004 (2004).
- J.I Pérez Arriaga, L.J. Sánchez, M.Pardo, “La gestión de la demanda de electricidad”, Ed. Fundación Alternativas, Madrid (2005).
- M. Castillo, “Optimización del uso de tecnología fotovoltaica en entornos residenciales”, Trabajo Fin de Master, E.T.S.I. Telecomunicación (2010), Universidad Politécnica de Madrid.
- M. Castillo, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, D. Masa, E. Caamaño, J. Jiménez-Leube, J. Porro, “Sistema de Control Distribuido para la Gestión de la Demanda en el Sector Residencial”. Actas I Congreso de Generación Distribuida (2009), pp. 121-126, Madrid (España).
- M. Hinnells, “Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings”. Energy Policy 36 (2008) 4427.