

# Aprovechamiento de la Energía Solar en la Argentina y en el Mundo

Julio C. Durán, Elena M. Godfrin

*Se presenta la evolución histórica y el estado actual del aprovechamiento de la energía solar a nivel mundial y, en particular, en la Argentina. Se analizan tanto los aspectos tecnológicos cuanto los de mercado. El trabajo se divide en cinco secciones que tratan los siguientes temas: generalidades sobre la energía solar, conversión fototérmica, conversión fotovoltaica, mercado fotovoltaico mundial y mercado fotovoltaico en la Argentina.*

## La Energía Solar

El sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde que dio sus primeros pasos en la Tierra, puede satisfacer todas nuestras necesidades. Ha brillado en el cielo desde hace unos 5000 millones de años, y se estima que brillará algunos 6000 millones de años más. Además, diariamente arroja sobre el planeta aproximadamente 15 000 veces la energía primaria consumida mundialmente en la actualidad.

Además del empleo de la energía solar a través de los procesos naturales, es posible utilizarla convirtiéndola artificialmente en energía térmica y eléctrica para satisfacer las necesidades diarias en forma similar a la de las fuentes de energía más conocidas (petróleo, gas,

carbón, hidroelectricidad o energía nuclear). El aprovechamiento de la energía solar con tecnologías muy simples fue realizado por el hombre desde sus comienzos; basta mencionar como ejemplos el secado de carnes y frutas y el cultivo en invernaderos. El uso intensivo de esta fuente de energía requiere el empleo de una serie de tecnologías de conversión más elaboradas, que han sido desarrolladas en los últimos 30 años y que todavía se encuentran en estado de evolución, fundamentalmente para disminuir sus costos.

La energía solar tiene dos características importantes: su condición de energía prácticamente inagotable y el hecho de ser no contaminante. Además, es una

fuerza de energía disponible, en mayor o menor medida, en cualquier parte del planeta, pudiendo ser colectada y transformada en el lugar de utilización. Esto último puede ofrecer ventajas económicas considerables, particularmente en áreas remotas y aisladas, para las cuales el costo de transporte de combustibles convencionales (derivados del petróleo y gas) o de distribución de electricidad pueden ser muy elevados.

El quemado de energéticos de origen fósil (petróleo, gas y carbón) está siendo seriamente cuestionado por sus consecuencias contaminantes, tanto a nivel local (formación de "smog") cuanto

regional (producción de lluvia ácida) y global (incremento del efecto invernadero y disminución de la capa de ozono). El reemplazo paulatino, aunque sea parcial, de estas fuentes de energía por otras más limpias (solar, eólica, etc.), contribuirá a atenuar la contaminación en forma creciente.

Cabe acotar, sin embargo, que la energía solar tiene baja densidad y su suministro es intermitente. Es necesario, por lo tanto, captarla sobre superficies relativamente grandes y acumular la energía necesaria para su utilización en horas nocturnas o en períodos de menor insolación como el invierno.

### Recurso Energético Disponible

El recurso energético solar no puede ser cuantificado en la misma forma que los recursos energéticos convencionales (petróleo, gas, carbón, uranio, recursos no renovables) donde puede determinarse la cantidad de energía almacenada en los reservorios y extraíble periódicamente mediante una tecnología dada. Debe tenerse en cuenta su característica de energía renovable, inagotable pero de disponibilidad cíclica y variable.

La cantidad de energía solar que llega diariamente a la superficie de nuestro planeta es enorme. Considerando únicamente la superficie de los cinco continentes, África, América, Asia, Australia y Europa, que aproximadamente tienen 132,5 millones de km<sup>2</sup>, la energía solar incidente, promedio anual,

es entre 11 y 14 MJ/(m<sup>2</sup>.día) (3,1-3,9 kWh/(m<sup>2</sup>.día)). Adoptamos, a los fines del siguiente análisis, un valor medio de 12,5 MJ/(m<sup>2</sup>.día) (3,5 kWh/(m<sup>2</sup>.día)), considerando, además, que por razones ecológicas, económicas y técnicas, sólo es posible utilizar una fracción de la superficie considerada.

El consumo mundial de energía primaria para 2001 fue de aproximadamente 112 000 TWh (112x10<sup>12</sup> kWh) [1] y el consumo estimado para el año 2050, entre 576 y 1044x10<sup>12</sup> MJ (entre 160 y 290x10<sup>12</sup> kWh). Considerando una eficiencia promedio de conversión de energía solar en otras formas de energía del 40 %, la demanda mundial de 2001 se podría haber satisfecho con la energía solar incidente sobre el 1,4 por mil del área continental antes considera-

da y la del año 2050 con el 2-3 por mil de dicha área.

Igualmente, como ejemplo ilustrativo, podemos considerar una de las zonas de mayor radiación solar, Arabia Saudita, donde llegan, en promedio anual, 25 MJ/(m<sup>2</sup>.día) (6,9 kWh/(m<sup>2</sup>.día)) sobre un área de 2,25 millones de km<sup>2</sup>. Las demandas mundiales antes consideradas para los años 2001 y 2050, tomando la misma eficiencia de conversión de energía solar, se podrían satisfacer con la energía solar incidente sobre el 5 y el 13 por ciento del área de Arabia Saudita, respectivamente.

Consideramos ahora el caso de la República Argentina. La radiación solar, promediando la que llega en la zona comprendida al norte del río Colorado, que cubre un total de 2 millones de km<sup>2</sup>, es de 16,5 MJ/(m<sup>2</sup>.día) (4,6 kWh/(m<sup>2</sup>.día)) promedio anual. El consumo anual de energía en todas sus formas fue de 500 TWh (500x10<sup>9</sup> kWh) para 2001 [1]. Haciendo un análisis similar al realizado para la demanda a nivel mundial, el consumo antes considerado se podría satisfacer con la energía solar recogida sobre el 0,4 por mil del área mencionada.

Los valores antes analizados nos indican que desde el punto de vista del recurso energético, la energía solar es abundante, y su empleo masivo dependerá de los costos relativos que se alcancen para un uso integral de la misma, incluyendo los

costos de los sistemas de acumulación, en los casos necesarios.

Para un correcto aprovechamiento del recurso energético de las fuentes renovables es necesario disponer de los valores medios mensuales de las variables meteorológicas de la región donde se deseen instalar. En particular, para la energía solar, la más importante de estas variables es la radiación solar media incidente en el plano de captación.

### Aprovechamiento de la Energía Solar

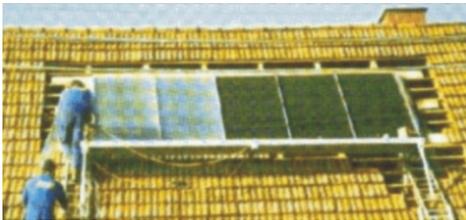
Parte de la radiación solar que llega a nuestro planeta es colectada y convertida en otras formas de energía por el gran sistema termodinámico formado por el conjunto Tierra-atmósfera: la energía eólica o la energía disponible a través de procesos de bioconversión, son ejemplos de los productos de ese proceso natural de conversión.

Como dijimos anteriormente, es posible aprovechar la energía solar que llega a la Tierra y no sufre ninguna modificación natural, a través de colectores solares y convertirla en alguna forma de energía para su utilización directa. En general, se clasifica a los colectores solares de acuerdo con el proceso de conversión: fototérmica y fotovoltaica. La primera convierte la energía solar en energía térmica a diferentes temperaturas según el tipo de colector que se utilice; la segunda, convierte directamente la energía solar en energía eléctrica.

## Conversión Fototérmica

Las aplicaciones de los diferentes tipos de aprovechamiento de la energía solar mediante su conversión fototérmica pueden agruparse en tres clases: **colectores planos** (para temperaturas de operación inferiores a 100°C), **concentradores de foco lineal** (100-500°C), y **concentradores de foco puntual** (superiores a 500°C).

Los colectores planos se emplean para calentamiento de agua para uso domiciliario, calefacción de viviendas, secado de productos agrícolas, destilación de agua, refrigeración (ciclo de absorción) y usos industriales. En la figura se muestra la instalación en un techo de colectores planos para calentamiento de agua y un conjunto de secaderos de productos agrícolas.



**Colectores Planos para Calentamiento de Agua Domiciliaria**



**Secaderos de Productos Agrícolas**

La difusión del uso de estos sistemas depende fuertemente de políticas de incentivos implementados desde el estado respecto del ahorro de combustibles convencionales.

Existen en la Argentina numerosas actividades de investigación y desarrollo vinculadas con el aprovechamiento térmico de la energía solar (ver, por ejemplo, Ref. [2]). Por el contrario, las aplicaciones comerciales en el tema son prácticamente nulas, debido esencialmente a la falta de políticas de promoción.

En la Unión Europea, donde existe una subvención de los gobiernos, la superficie de colectores instalados y funcionando hasta 2002 es cercana a los 13 millones de m<sup>2</sup>, equivalentes a una producción energética de 0,49 Mtep. Hasta 2001, el crecimiento del mercado fototérmico fue, en promedio de aproximadamente 10 % anual, registrando en 2002 una baja de 23,7 % debido a varios factores entre los cuales pueden mencionarse la disminución de los subsidios, el cambio de moneda en la Unión Europea e incertidumbres electorales. Para 2003, la decisión política de reactivar el mercado térmico en varios países (Alemania, Italia, Francia, España) permitía esperar un crecimiento superior al promedio antes mencionado [3].

Los concentradores de radiación solar se utilizan para refrigeración, aplicaciones industriales y generación de energía

mecánica y eléctrica (ver figura). Su aplicación más importante fue las centrales de potencia instaladas en California, EE.UU., basadas en concentradores cilíndrico parabólicos. En 1985 entró en operación, entregando energía de pico a la red, la primera central de 14 MW eléctricos. En años sucesivos se pusieron en marcha nuevas centrales de

este tipo, alcanzando una capacidad total instalada e interconectada de 354 MW. Recientemente, la Unión Europea ha retomado el tema a través del proyecto DISS (Direct Solar Steam) en Almería, España, cuyo objetivo es perfeccionar la tecnología y los procedimientos de operación de dicho tipo de plantas solares [4].



**Vista de una Central solar en California, EE.UU**



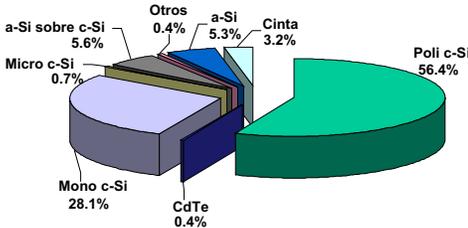
**Vista de una Central solar en California, EE.UU**

## Conversión Fotovoltaica

La conversión directa de la energía solar en electricidad se obtiene mediante la utilización de dispositivos fotovoltaicos (FV). Desde 1958 y hasta la primera crisis del petróleo en 1973, las celdas solares tuvieron principalmente aplicaciones en los campos espacial y militar. Las crisis del petróleo durante la década del 70 impulsaron el desarrollo de la tecnología FV para usos terrestres. A mediados de los noventa, las actividades en el campo FV recibieron un renovado impulso, esta vez gracias a la creciente presión ecologista de la sociedad y a la baja en el costo de los sistemas.

El elemento básico principal de la industria FV es y seguirá siendo, al menos en el mediano plazo, el silicio cristalino (c-Si). La tecnología de este semiconductor se encuentra sumamente desarrollada por ser la base de la industria electrónica. En la constante búsqueda por bajar costos, se han desarrollado dispositivos de película delgada de diferentes materiales semiconductores, siendo el silicio amorfo (a-Si) el que se encuentra desde hace años en el mercado. De más reciente aparición son las celdas solares de CdTe y de  $\text{CuInSe}_2$  (CIS). En la figura

se muestra la distribución de las diferentes tecnologías de la industria FV [5].



Distribución de las Diferentes Tecnologías de la Industria Fotovoltaica

El elemento fundamental de un sistema FV es el módulo FV (ver figura).



Módulos Fotovoltaicos

Éstos se caracterizan por la potencia (en  $W_{pico}$ ) que pueden entregar al ser iluminados con una radiación solar de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Dado que la principal aplicación FV involucra la carga de baterías, la mayoría de los módulos comerciales están diseñados para entregar corriente continua a tensiones algo superiores a 12 V.

Un sistema FV típico incluye módulos, baterías, sistema de control y acondicionamiento de potencia y una estructura

de montaje. Los sistemas pueden clasificarse en dos grandes categorías: aislados e interconectados a la red de distribución eléctrica. A continuación se enumeran aplicaciones de ambas categorías:

### Sistemas aislados ("stand-alone")

- Espaciales
- Electrificación rural
- Bombeo de agua
- Comunicaciones (repetidoras, radiotelefonía, etc.)
- Monitoreo remoto (climático, sísmico, etc.)
- Boyas para navegación
- Protección catódica
- Productos de consumo (relojes, calculadoras, etc.)
- Cargadores de baterías
- Autos solares

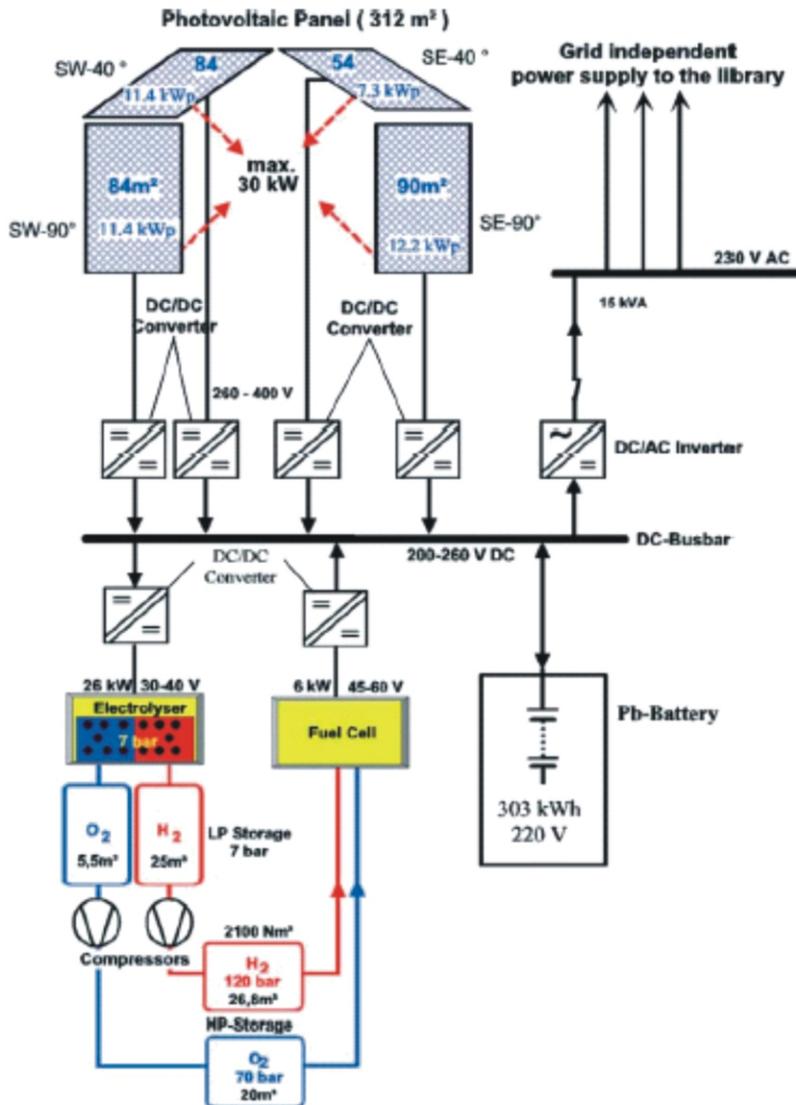
### Sistemas interconectados a red

- Integrados a edificios ("PV in buildings")
- Centrales de potencia

Una alternativa a los sistemas FV convencionales, basados en el almacenamiento de energía eléctrica en baterías, está dada por sistemas compuestos por paneles solares, un electrolizador (para generar hidrógeno) y una celda de combustible. Diversos laboratorios han realizado importantes esfuerzos para producir hidrógeno a partir de FV en pequeña escala [6] y a

escala industrial [7], tanto para aplicaciones estacionarias cuanto para vehículos [8]. La Figura muestra, a modo

de ejemplo, la configuración de la planta de demostración PHOEBUS [9], en Jülich, Alemania.

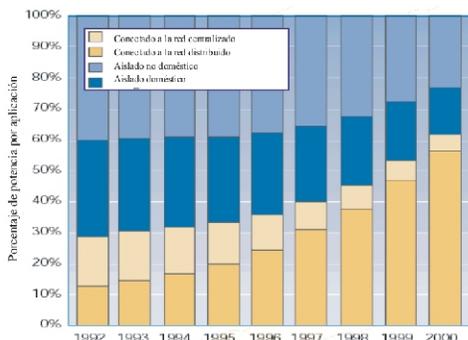
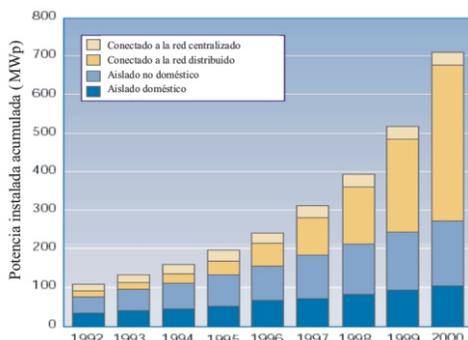


**Esquema de la planta de demostración PHOEBUS [9], Jülich, Alemania**

## Mercado Fotovoltaico Mundial

La potencia FV total instalada en el mundo entre las diferentes aplicaciones supera los 2000 MW<sub>pico</sub>, con ventas anuales de aproximadamente 700 MW<sub>pico</sub> y costos de paneles FV de alrededor de 3-4 U\$\$/W<sub>pico</sub>. El mercado mundial ha crecido en promedio más del 16 %/año desde 1980 y claramente por encima del 30 %/año en los últimos 5 años [5,10,11]. En 1998, aproximadamente el 70 % de las ventas correspondían a un mercado completamente

competitivo (alternativa confiable y de menor precio en aplicaciones aisladas de baja potencia) y el resto a un mercado subsidiado. Este porcentaje se ha reducido sustancialmente en los últimos años debido al fuerte crecimiento en la instalación de sistemas interconectados a la red eléctrica, impulsado por políticas de promoción (subsidios, créditos a tasas preferenciales, etc.) en países desarrollados (ver figura).



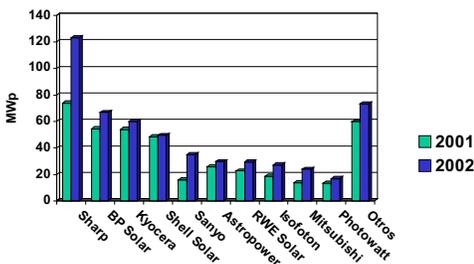
### Crecimiento de las Diferentes Aplicaciones Fotovoltaicas

Los programas en marcha en diversos países desarrollados están orientados a lograr un cambio de escala en el mercado FV, con la consecuente disminución de costos a través de la introducción de técnicas de producción modernas y automatizadas. EE.UU., Europa y Japón han puesto el mayor impulso durante los últimos años en el área de los sistemas interconectados a la red, a través de programas oficiales y diferen-

tes políticas de promoción. De alcanzarse los objetivos planteados, las instalaciones fotovoltaicas en techos y fachadas llegarían en el 2010 a 11.000 MW<sub>pico</sub> en el mundo (más de 5 veces el total instalado hasta el presente).

Los importantes esfuerzos en investigación y desarrollo en EE.UU., Europa, Japón y Australia han permitido alcanzar nuevos récords de eficiencia de conversión y una baja continua de costos. En el

área de producción hay también importantes inversiones en la instalación de plantas totalmente automatizadas con capacidades de producción superiores a los 30 MW<sub>pico</sub>/año. Las mayores producciones de celdas solares corresponden, en orden decreciente, a las siguientes empresas: Sharp, BP Solar, Kyocera, Shell Solar, Sanyo, Astropower, RWE Solar, Isofoton, Mitsubishi y Photowatt, ver figura. Importantes empresas petroleras (BP Amoco, Shell, Agip y Total) están jugando un papel fundamental en el tema.

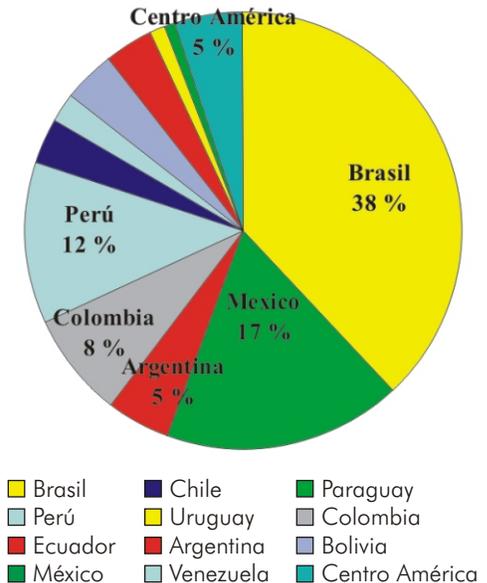


**Distribución de la Producción de Celdas Solares por Empresas**

Europa ha entrado también en la producción de gran escala con una producción anual superior a los 100 MW<sub>pico</sub> en 2002. El desarrollo del mercado FV está impulsado desde la Unión Europea a través de diferentes políticas de promoción.

Por su parte, el mercado latinoamericano ha registrado ventas por un total de 6,3 MW<sub>pico</sub> en el año 2002, con un crecimiento del 26 % respecto de 2001. La distribución de las instalaciones por

países está dada en la figura siguiente, siendo los principales Brasil (2400 kW<sub>pico</sub>), México (1100 kW<sub>pico</sub>), Perú (750 kW<sub>pico</sub>), Colombia (500 kW<sub>pico</sub>), Centro América (320 kW<sub>pico</sub>) y Argentina (300 kW<sub>pico</sub>).



**Distribución de las Instalaciones Fotovoltaicas en Latinoamérica en 2002**

Las aplicaciones de sistemas FV en satélites artificiales merecen un párrafo aparte por sus características y perfiles productivos claramente diferenciados de los correspondientes a las aplicaciones terrestres. La elevada confiabilidad requerida junto con la necesidad de diseñar y construir a medida los paneles FV en función de las características de las misiones y de la geometría de los

satélites, hacen que los precios se eleven órdenes de magnitud por encima de los terrestres. Típicamente, los paneles solares para un satélite de observación como los previstos en el Plan Espacial Nacional tienen un costo superior a los 2 millones de U\$S para una potencia nominal inferior a 1 kW (aproximadamente, 2.000 U\$S/W). El mercado FV espacial se encuentra en franca expansión como consecuencia de los numerosos proyectos de constelaciones de

satélites. Existen en el mundo unas pocas empresas, relativamente pequeñas, que producen paneles (basados en celdas solares de Si o en semiconductores derivados del GaAs) para usos espaciales. En la Argentina, la Comisión Nacional de Energía Atómica está trabajando en el desarrollo de paneles solares para las futuras misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional [12].

### Mercado Fotovoltaico en la Argentina

El mercado FV argentino está segmentado en tres tipos de demandas: usos rurales, usos profesionales o empresariales y demanda institucional. Las demandas internas totales de módulos FV han mantenido un crecimiento sostenido de entre un 20 y un 50 % anual hasta el año 1999, alcanzando un valor superior a 1000 kW<sub>pico</sub>/año (ver tabla). A partir de ese momento y muy particularmente luego de la devaluación, la demanda de sistemas FV ha sufrido una fuerte regresión que recién ha comenzado a revertirse durante 2003.

La demanda rural está conformada por los requerimientos de quienes poseen y/o explotan establecimientos ganaderos y agrícolas o aquéllos que residen en el medio rural. La provisión de los sistemas FV se realiza usualmente a través de los mismos canales que proveen otros servicios y equipamiento para sus actividades. Los tipos de equipos y componentes más demanda-

dos son: módulos FV (50-80 W<sub>pico</sub>) para carga de baterías destinadas a puestos y viviendas rurales, sistemas para iluminación (30 y 100 W<sub>pico</sub>), y alimentación para pequeñas bombas de agua (50 y 400 W<sub>pico</sub>) en reemplazo del tradicional molino multipala. El sector rural fue el sector de mayor crecimiento hasta 1998.

Año	Demanda (kW <sub>pico</sub> )
1997	600
1998	900
1999	1100
2000	1100
2001	620
2002	300
2003	650

#### Demanda Total de Módulos FV en la Argentina

El sector profesional o empresarial está conformado por los requerimientos de

unas pocas empresas (del orden de la docena), siendo las prestadoras de servicios telefónicas (Telecom y Telefónica) las más representativas por los volúmenes de módulos adquiridos durante los últimos años. Los usos principales se orientan a la provisión de energía a sistemas de comunicaciones, telemetría, balizamiento, señalización, sistemas de emergencia en autopistas y protección catódica. La característica dominante de estos equipos es la de proveer energía a sistemas que deben prestar servicio en lugares remotos o de difícil acceso. Los tamaños de las instalaciones son muy variados y pueden ir desde 20-50  $W_{pico}$  para pequeños equipos de emergencia en autopistas, 100-400  $W_{pico}$  para repetidoras, hasta más de 20  $kW_{pico}$  para alimentación de válvulas de bloqueo en gasoductos.

El sector institucional incluye los programas de asistencia social, los entes reguladores de energía, las fundaciones y las empresas provinciales de energía cuyo objetivo es proveer de pequeñas cantidades de electricidad a comunidades rurales que se encuentran alejadas de las redes de distribución. La demanda de este sector está fundamentalmente sujeta a jurisdicciones provinciales y utiliza típicamente equipos para provisión de energía eléctrica para iluminación y comunicación social a instituciones (escuelas, dispensarios médicos, puestos de policía, etc.) y usuarios residenciales. Las potencias nominales típicas de estos equipos varían entre 50 y

400  $W_{pico}$ .

La demanda institucional ha tenido un crecimiento importante a partir de la puesta en marcha del Proyecto de Energías Renovables para Mercados Eléctricos Rurales (PERMER) [13], acordado con el Banco Mundial a fines de 1999. Este proyecto prevé la asistencia financiera parcial para la instalación de unos 70 000 sistemas solares domiciliarios en siete provincias. Si se toma en consideración que el tamaño medio de las instalaciones a realizar será de 100  $W_{pico}$ , esto representa un total de aproximadamente 7  $MW_{pico}$  a instalar en aproximadamente 5 años. La magnitud de la demanda potencial del PERMER es tal que podría llegar a duplicar los requerimientos del mercado fotovoltaico argentino del año 2000.

Existen diversos oferentes de paneles FV en la Argentina, los cuales incluyen un único fabricante, Solartec S.A., y diversos representantes o distribuidores de empresas extranjeras: BP-Solar, Shell/Siemens Solar, Total Energie, etc..

Los precios de mercado de los productos FV en la Argentina han sufrido, durante los últimos años, una reducción considerable. Esta reducción se ha notado especialmente en los sectores profesional e institucional, donde los volúmenes de compra son más importantes. Los precios varían entre 4 y 7  $U\$/W_{pico}$  para el módulo FV y entre 7 y 10  $U\$/W_{pico}$  para un sistema básico instalado (sin convertor CC-CA),

dependiendo fuertemente del nicho de mercado del cual se trate y del tamaño de la compra.

Las actividades de normalización de la conversión FV se canalizan en el país a

través del IRAM (Instituto Argentino de Normalización), el cual ha emitido diversas normas relativas al aprovechamiento fototérmico y fotovoltaico de la energía solar.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Marcelo Álvarez y a Jaime A. Moragues la colaboración prestada para la confección del presente artículo.

**Nota:** Trabajo Publicado por la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie Publicaciones Científicas N° 1. Año 2004.

### Referencias

1. Consumo mundial de Energía, <http://www.olade.org.ec> (2001).
2. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), <http://www.asades.org.ar>.
3. Systèmes solaires n° 155 Baromètre du solaire thermique EurObserver, <http://europa.eu.int> (2003).
4. Plataforma Solar de Almería, <http://www.psa.es>.
5. Systèmes solaires n° 154 Baromètre du Photovoltaïque EurObserver, <http://europa.eu.int> (2003).
6. S. Galli y M. Stefanoni, International Journal of Hydrogen Energy 22, 453 (1997).
7. A. Szyszka, International Journal of Hydrogen Energy 23, 849 (1998).
8. P. Hollmuller et al., International Journal of Hydrogen Energy 25, 97 (2000).
9. P.C. Gosh et al., Solar Energy 75, 469 (2003).
10. P. D. Maycock, Renewable Energy World, James & James (Science Publishers) Ltd., Vol. 3, Nros. 4, 58 (2000).
11. P. D. Maycock, Renewable Energy World, Vol. 4, Nros. 4, 144 (2001).
12. C.G. Bolzi et al., Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, 04.07 (2003).
13. Proyecto Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER). Project Appraisal Document. Banco Mundial. <http://www.worldbank.org> (1999).

Julio C. Durán, Elena M. Godfrin.

Grupo Energía Solar Departamento de Física Centro Atómico Constituyentes. Comisión Nacional de Energía Atómica.