

# La electricidad fotovoltaica (PV) y su papel en el presupuesto energético actual y futuro

Marco Raugei\*

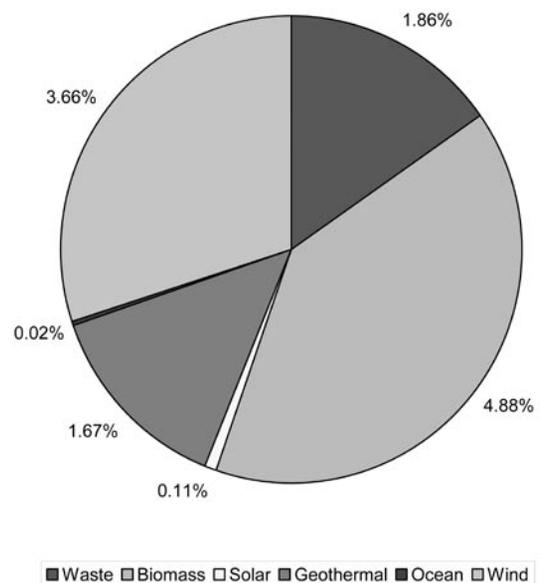
la biomasa, las fotovoltaicas solares (PV), la energía geotermal y la eólica aportan el resto, en porcentajes variables (Figura 1).

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, cerca del 80% del abastecimiento mundial de energía primaria todavía proviene de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), mientras que el resto es satisfecho mediante la energía nuclear y las fuentes energéticas renovables. Estas últimas representan el 13% del abastecimiento energético total, con la biomasa como principal aportadora, especialmente en el sector de la generación de calor. Específicamente, la contribución de las energías renovables a la demanda mundial de calefacción se sitúa en torno al 24%; un porcentaje que en gran medida está representado por los usos tradicionales, como la recolección de leña.

La participación de las energías renovables en la generación de electricidad es menor, aproximadamente el 18%. Gran parte de esta aportación la satisfacen actualmente las represas hidroeléctricas (88%), mientras que los residuos,

Figura 1  
Producción mundial de electricidad renovable según su origen (excluyendo la hidroeléctrica)



Fuente: adaptado de IEA, 2006.

\* Miembro del Grupo de Investigación en Gestión Ambiental (GiGa) de la Escola Superior de Comerç Internacional (ESCI) - Universitat Pompeu Fabra (UPF) (marco.raugei@esci.es).

Actualmente, cada vez es mayor la atención que se presta a la electricidad solar como una de las opciones más prometedoras para contrarrestar los preocupantes efectos sobre el cambio climático mundial y la degradación ambiental asociados con la producción eléctrica convencional. De hecho, la PV virtualmente no supone emisiones durante su fase de uso y, por lo tanto, es percibida como esencialmente «verde». No obstante, inicialmente sufrió limitaciones bien conocidas; entre ellas, principalmente, su elevado coste y una baja aceptabilidad social debido a su falta de estética.

## LA TECNOLOGÍA

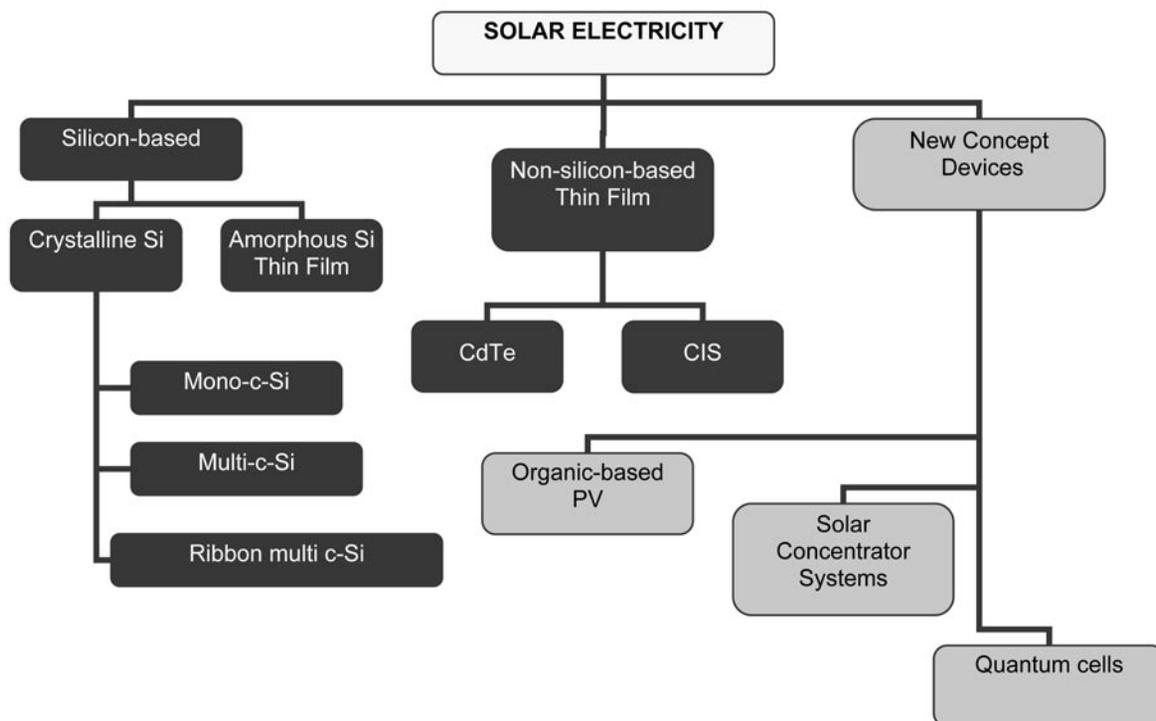
Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar según el tipo de módulos solares empleados. La Figura 2 presenta un diagrama de las tecnologías actualmente disponibles.

La familia más antigua dentro de las tecnologías fotovoltaicas es la basada en la silicona como semiconductor, que se viene desarrollando desde hace décadas y que puede ser considerada la más madura.

Particularmente, las obleas (Wafers) monocristalinas de silicio son las que demandan más energía en su producción, y se obtienen refundiendo desechos de silicona de calidad electrónica (EG-Si) de elevada pureza, su recristalización controlada y el posterior corte en láminas. Esto da como resultado el tipo más puro y eficiente de silicona fotoactiva que, consecuentemente, permite la producción de módulos de elevada eficiencia (pero costosos).

Un proceso similar de producción fue utilizado también para las obleas multicristalinas de silicio, eliminando la recristalización final. En la última década, sin embargo, se ha introducido un nuevo método de producción de silicio multi-c, que demanda menos energía y cuya carga de

Figura 2  
Tecnologías fotovoltaicas



alimentación (feedstock) de silicón de calidad solar (SG-Si) de menor pureza puede ser obtenida directamente de silicón de calidad metalúrgica (MG-Si), comparativamente más barata.

Un innovador tipo de módulos «en cinta», en base a silicón, ha comenzado a ser introducido en el mercado; en éstos, una fina capa de mc-Si molida se extiende directamente sobre los paneles de vidrio del módulo fotovoltaico, eliminándose así la ineficiente fase de laminado de las obleas.

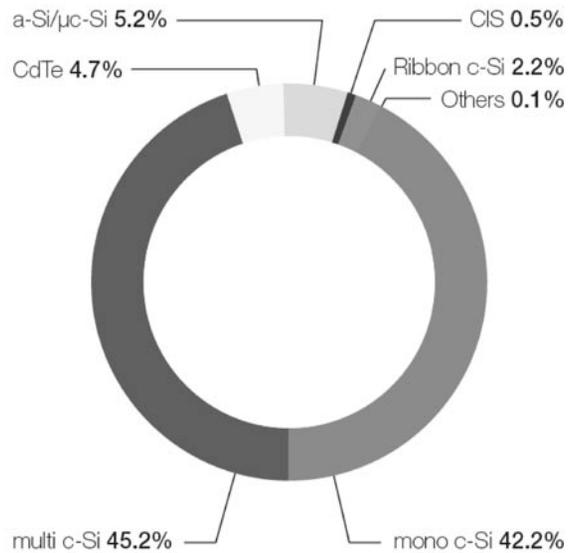
Los módulos de silicón amorfo (a-Si) utilizan una fina capa de silicón hidrogenado extendida sobre el vidrio; estos módulos son básicamente de bajas prestaciones y bajo coste, empleados frecuentemente en el sector de electrónicos de consumo.

Los módulos fotovoltaicos no basados en silicón (película fina CIS y CdTe) utilizan capas extremadamente delgadas (pocos  $\mu\text{m}$ ) de semiconductores binarios, que son electro-fijados sobre los paneles de vidrio. Estas son tecnologías comparativamente recientes, pues comenzaron a ser introducidas en el mercado a comienzos de la década del 2000.

Finalmente, bajo la etiqueta de «Dispositivos de Nuevo Concepto», se podrían agrupar tres grandes familias tecnológicas: (i) módulos orgánicos, de muy bajo coste y de baja a mediana eficiencia (basados en celdas solares de pigmentos sensibles, absorbentes extremadamente delgados, celdas de polímeros orgánicos, etc.); (ii) módulos de elevada eficiencia (basados en estructuras exóticas como las celdas Quantum y los dispositivos nanoestructurados); y (iii) sistemas concentradores solares (en los que la luz solar es dirigida sobre un conjunto de módulos fotovoltaicos mediante espejos convexos y el sistema resultante es montado sobre una gran estructura motorizada, continuamente enfocada hacia el sol). Con la única excepción de unos pocos sistemas concentradores solares, esta «tercera generación» de tecnologías fotovoltaicas continúa estando en fase de prototipos, sin haber entrado en el mercado.

Las actuales cuotas de mercado de las diferentes tecnologías fotovoltaicas se ilustran en la Figura 3.

Figura 3  
Cuotas de Mercado de tecnologías PV en 2008



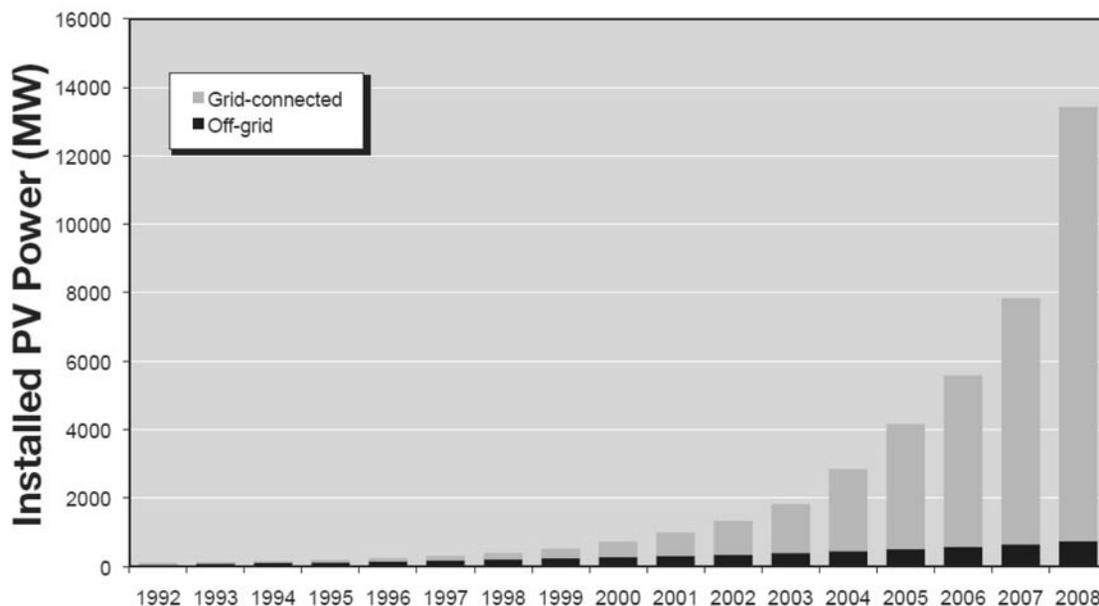
Fuente: EPIA/Greenpeace, 2008.

## EL MERCADO

La capacidad mundial de producción de sistemas fotovoltaicos viene creciendo exponencialmente a lo largo de las últimas dos décadas (Figura 4). Las estimaciones basadas en un sondeo sobre comunicados empresariales y notas de prensa de más de 200 empresas de todo el mundo indican que esta tendencia muy probablemente se mantenga en un futuro próximo, sobrepasando los 40.000 MWp en 2012 (Jaeger-Waldau, 2008).

Se pueden identificar cuatro clases de instalaciones fotovoltaicas: conectadas a la red y centralizadas (grandes centrales eléctricas); conectadas a la red pero distribuidas (sistemas más pequeños para tejados y fachadas); no conectadas a la red y de uso no doméstico (centrales eléctricas e instalaciones industriales en zonas remotas); no conectadas a la red y de uso doméstico (principalmente sistemas autónomos en tejados de viviendas en zonas remotas). Estos cuatro tipos de instalaciones se diferencian por requerir

Figura 4  
**Registro histórico de la producción de módulos fotovoltaicos**



Fuente: IEA PVPS, 2009.

componentes adicionales para su instalación y uso, como estructuras metálicas, de soporte, cimientos, cableado, convertidores de DC a AC, y dispositivos para el almacenamiento de la energía (todos ellos son denominados colectivamente como Equilibrio de Sistema, o BOS). Desde un punto de vista tanto ambiental como económico, el principal factor de discriminación es con frecuencia el almacenamiento de la energía, que, en la mayoría de las instalaciones domésticas no conectadas a la red se consigue mediante baterías industriales recargables.

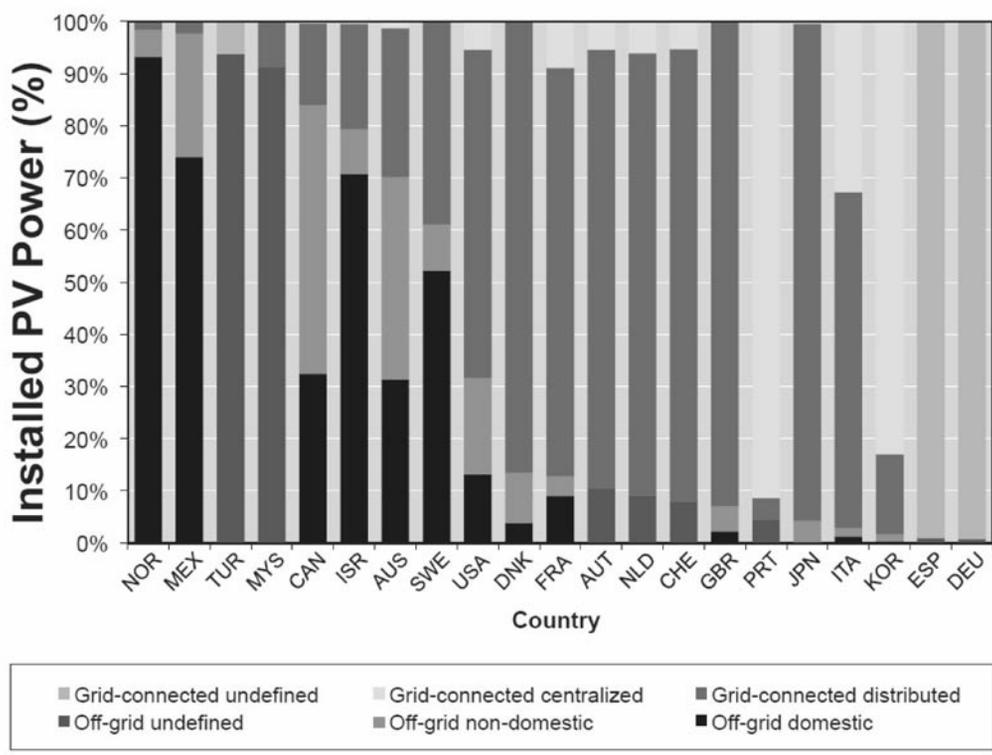
Según muestra la Figura 5, en España, Alemania y Japón (actualmente los principales mercados para la PV) hay una gran preponderancia de las instalaciones conectadas a la red; la mayoría es distribuida, pero recientemente se ha instalado un gran número de sistemas centralizados, especialmente en España. En EEUU, por el contrario, un porcentaje considerable del total instalado está representado por sistemas no conectados a la red. Esto, al menos en parte,

puede justificarse por la baja densidad de población en ese país, donde la PV con frecuencia se percibe como el medio más práctico para abastecer de electricidad a viviendas y poblaciones remotas, en lugar de una opción para reducir el consumo de combustibles fósiles.

No obstante, la fotovoltaica es por ahora económicamente competitiva sólo para aplicaciones de consumo remoto y desconectado de la red. Las aplicaciones conectadas a la red siguen necesitando el respaldo de incentivos económicos, como la reducción impositiva y las tarifas de introducción (a través de las cuales se obliga a las empresas de las redes regionales o nacionales de energía a comprar la electricidad PV, con tarifas que hacen que su instalación resulte competitiva).

El coste de los módulos fotovoltaicos se ha ido reduciendo de modo constante desde la década de 1980 (con una tasa promedio cercana al 80%), y se calcula que la paridad en la red se alcanzará entre 2020 y 2030, según los niveles

Figura 5  
Energía fotovoltaica instalada, según aplicación



Fuente: IEA PVPS, 2009.

de irradiación solar y siempre que se sigan manteniendo los actuales programas de subsidios. La Figura 6 muestra dos escenarios, para los niveles de irradiación típicos en Europa septentrional y meridional, es decir 900 y 1.800 kWh/(m<sup>2</sup>\*año), respectivamente.

Otro factor de aceptabilidad social se plantea con frecuencia cuando los sistemas fotovoltaicos deben integrarse a edificios, debido a su discutible valor estético; tal cosa es especialmente relevante en los casos de edificios con valor histórico o centros urbanos, algo que sucede con frecuencia en Europa. Sin embargo, han comenzado a desarrollarse diseños innovadores y soluciones arquitectónicas que favorecen la integración visual de los sistemas fotovoltaicos en edificios ya existentes, incluyendo monumentos históricos. Un ejemplo sobresaliente de tales esfuerzos de diseño son

los objetos de demostración resultantes del proyecto PVA-CCEPT de la UE (<http://www.pvaccept.de>).

**EL MEDIO AMBIENTE**

Paralelamente a su creciente éxito comercial, los sistemas fotovoltaicos han mejorado enormemente desde el punto de vista de su comportamiento ambiental. La producción de los primeros módulos comerciales de los años 70 y 80 demandaba mucha energía y, obviamente, esto tenía serias consecuencias sobre su impacto ambiental, afectando la credibilidad de la PV como una alternativa «verde» realmente viable.

En consecuencia, la principal preocupación en esa época era comprobar si los sistemas PV completos podrían

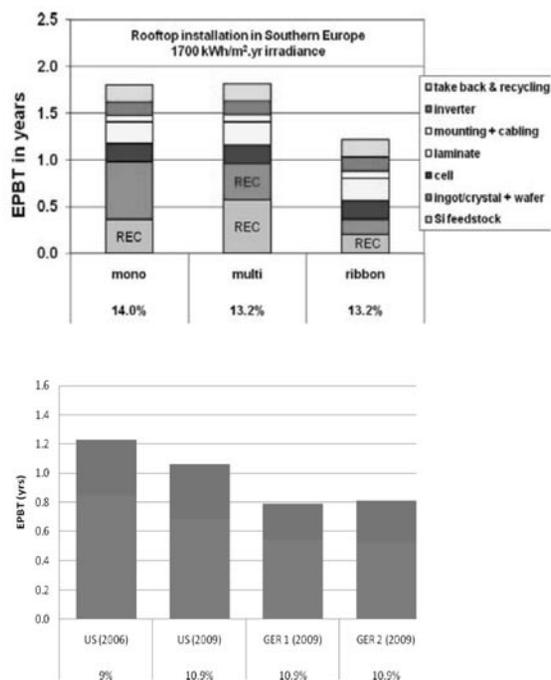
«reembolsar» la misma cantidad de energía que exigían su fabricación y su operación. Esto provocó la introducción de un indicador de comportamiento específico por sectores, el EPBT (Energy Pay-Back Time; Tiempo de reembolso energético). Dicho indicador señala cuánto tiempo le llevará a un sistema fotovoltaico generar la misma cantidad de electricidad que podría ser generada por la combinación eléctrica existente, utilizando la misma cantidad de energía primaria. Esto quiere decir que, si un determinado sistema PV tiene un EPBT de X y una esperanza de vida de Y años, producirá durante su vida útil (Y/X) veces la cantidad de electricidad que podría haberse generado de otra manera si los recursos energéticos necesarios para su fabricación y mantenimiento se hubieran utilizado directamente en centrales de energía convencionales. Sin duda, la PV sólo representa una alternativa viable si el EPBT < vida útil.

En la década de 1990, los típicos sistemas fotovoltaicos multi-c-Si, utilizando el tradicional método EG-Si para la producción de obleas, lograron un EPBT de 6-7 años, que, comparado con los plazos de vida útil de entonces, cercanos a los veinte años, alcanzaban un rendimiento que, sin ser apasionante, resultaba satisfactorio (Alsema et al., 1998; Alsema 2000). Sin embargo, con el cambio de siglo, los continuos perfeccionamientos de las tecnologías PV y la confiabilidad habían conseguido reducir el EPBT de los sistemas PV comunes muy por debajo de los tres años (Fthenakis y Alsema, 2006; Raugi et al., 2007).

Los actuales valores del EPBT para los sistemas PV más modernos se detallan en la Figura 7; el plazo de vida útil según los estándares industriales también se ha ampliado a treinta años. En consecuencia, se puede aseverar que desde un punto de vista energético, cualquier vestigio de escepticismo respecto a la viabilidad a largo plazo de la electricidad fotovoltaica, carecería ya de fundamento.

Los EPBT bajos implican también una reducción del impacto ambiental por kWh de electricidad generada, puesto que los recursos y la energía convencional requeridos para la producción y el mantenimiento de los sistemas PV se reducen y descuentan al ser mayor su vida útil. La Figura 8 muestra el rendimiento de la moderna electricidad PV en comparación con el de las alternativas convencionales, desde

Figura 7  
EPBT actualizados de los sistemas PV



(Arriba) Sistemas en base de Si, instalados en tejados; (abajo) Sistemas instalados en el suelo, de película delgada CdTe. La eficiencia de los módulos se indica debajo de cada columna; se considera que la irradiación solar es de 1.700 kWh/(m<sup>2</sup>\*año).

Fuente: Fthenakis et al., 2009.

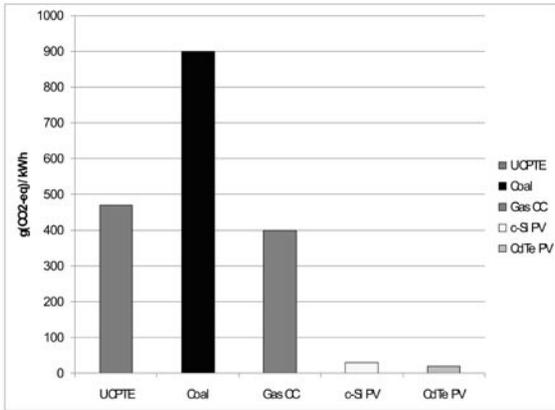
el punto de vista del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG).

## PERSPECTIVAS FUTURAS

Tres factores clave contribuirán a determinar el futuro de la electricidad fotovoltaica:

1. Reducción de costes (como hemos visto más arriba).
2. Aumento de la eficiencia. Un mayor incremento de la eficiencia es factible y deseable para todas las tecnologías fotovoltaicas. Basándonos en la extrapolación de las ten-

**Figura 8**  
**Emisiones de gases de efecto invernadero de electricidad fotovoltaica vs. convencional, expresada como gramos de equivalente a CO<sub>2</sub> por kWh**



UCPTE = combinación eléctrica de la UE; Carbón = central eléctrica en base a carbón; Gas CC = central con turbina de gas de ciclo combinado; c-Si = sistema PV de silicón monocristalina (14% de eficiencia); CdTe = sistema PV de película delgada de CdTe (10,9% de eficiencia). Irradiación solar considerada = 1.700 kWh/(m<sub>2</sub>\*año).  
 Fuente: adaptado de Fthenakis et al., 2009; Ecoinvent, 2008.

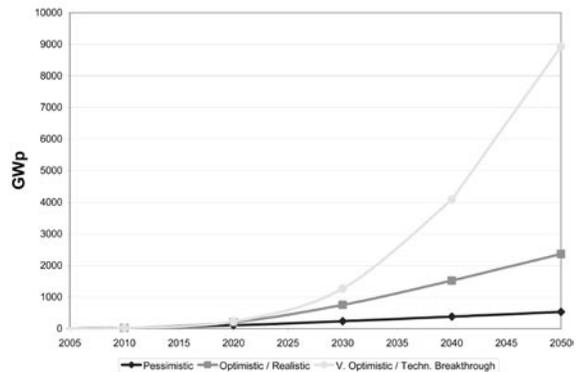
dencias previas, podemos anticipar a medio plazo una meta de eficiencia en torno al 25% del Si cristalino, mientras que las películas delgadas sin Si podrían lograr una eficiencia cercana al 16%; los dispositivos de tercera generación, de elevadísima eficiencia, podrían superar ampliamente esos porcentajes para mediados de este siglo.

- Almacenamiento de energía. La energía solar es gratis, inagotable, pero intrínsecamente intermitente. Por lo tanto, la integración de la fotovoltaica con grandes sistemas de almacenamiento de energía será indispensable para garantizar la necesaria estabilidad de la red en el caso de que la PV vaya a aportar entre el 10% y el 20% del abastecimiento eléctrico total (Denholm y Margolis, 2006). Hasta la fecha, la opción a gran escala más prometedora y menos costosa sería el Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido (CAES), a través del cual el excedente

de electricidad se utiliza para comprimir aire y bombearlo a formaciones subterráneas disponibles, como cavernas, minas abandonadas, o acuíferos y depósitos naturales de gas ya agotados. Sin embargo, durante la compresión se pierde calor, reduciendo inevitablemente la eficiencia de esta combinación de PV y almacenamiento.

Dependiendo de una serie de suposiciones sobre los avances tecnológicos, la estabilidad de los mercados y las políticas de apoyo, el reciente proyecto europeo de investigación NEEDS estableció tres posibles escenarios sobre el futuro de la PV (Figura 9). El escenario «pesimista» muestra una baja inversión en Investigación & Desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas, en el caso de que no sean suficientemente apoyadas hasta lograr ser económicamente competitivas a gran escala. Los otros dos escenarios ofrecen visiones más esperanzadoras para el futuro; en especial, el escenario «muy optimista» pronostica una enorme penetración de la PV a mediados de este siglo (la principal entre todas las tecnologías de energía renovable, con una aportación equivalente al 35% de la producción eléctrica mundial), pero esto en gran medida dependerá de que se logre resolver el problema del almacenamiento, así como de la introducción de dispositivos fotovoltaicos de nueva concepción.

**Figura 9**  
**Futuros escenarios de la capacidad mundial de la PV**



Fuente: Raugei y Frankl, 2009.

## CONCLUSIONES

Las energías fotovoltaicas experimentaron un inicio lento y hasta algo perezoso, pero actualmente se han consolidado como un cuerpo tecnológico y han demostrado científicamente que pueden convertirse en una valiosa y sostenible alternativa a la electricidad convencional. Si tales logros tecnológicos continuarán siendo mejorados en el futuro y alcanzarán el éxito comercial, es un interrogante que dependerá del nivel de apoyo político y económico que reciba la PV. La actual época de recesión económica puede inducir a los políticos a recortar, en lugar de potenciar, los incentivos «verdes», perjudicando así el éxito que en estos momentos disfruta la PV. Por otra parte, se podría argumentar que ahora es el momento preciso de hacer el esfuerzo y canalizar todos los recursos necesarios hacia las opciones más prometedoras entre las energías sostenibles, no sea que caigamos en épocas aún más duras de escasez energética y sea ya demasiado tarde para intentar el cambio.

## REFERENCIAS

ALSEMA E. (2000), «Energy pay-back time and CO<sub>2</sub> emissions of PV systems», *Progress In Photovoltaics: Research And Applications* 8(1): 17-25.

ALSEMA E., FRANKL P., KATO K. (1998), «Energy pay-back time of photovoltaic energy systems: present status and prospects», presented at the 2nd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vienna. <http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/Publicaties1998/98053.htm>.

DENHOLM P., MARGOLIS R.M., (2006), «Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in electric power systems utilizing

energy storage and other enabling technologies», *Energy Policy* 35(9): 4424-4433.

ECOINVENT (2008), *Ecoinvent data v. 2.01*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, <http://www.ecoinvent.ch>.

EPIA/GREENPEACE (2008) «Solar Generation V — Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020». The Netherlands / Belgium. <http://www.epia.org>.

FRANKL P., MENICHETTI E., RAUGEI M. (2008), «Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications, NEEDS deliverable 11.2 — RS Ia», <http://www.needs-project.org>.

FTHENAKIS V.M., ALSEMA E. (2006), «Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004—early 2005 Status», *Progress In Photovoltaics: Research And Applications* 14: 275-280.

FTHENAKIS V.M., HELD M., KIM H.C., RAUGEI M. (2009), «Update of Energy Payback Times and Environmental Impacts of Photovoltaics», 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany.

IEA (2006), «Statistics and Balances», <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>.

IEA-PVPS (2009), «Trends in photovoltaic applications», [http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1\\_18.pdf](http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_18.pdf).

JAEGER-WALDAU J. (2008), «PV Status Report 2008 — Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics», European Commission Joint Research Centre Technical Notes. EUR\_23604EN\_2008, <http://sunbird.jrc.it/refsys/pdf/PV%20Report%202008.pdf>.

RAUGEI M., BARGIGLI S., ULGIATI S. (2007), «Life Cycle Assessment and Energy Pay-Back Time of Advanced Photovoltaic Modules: CdTe and CIS compared to poly-Si», *Energy*, 32(8): 1310-1318.

RAUGEI M., FRANKL P. (2009), «Life Cycle Impacts And Costs Of Photovoltaic Systems: Current State Of The Art And Future Outlooks», *Energy*, 34(3): 392-399.