

Capítulo 7

ENERGÍA SOLAR TERMOFOTOVOLTAICA

Una nueva línea de investigación para aumentar la eficiencia de conversión de la radiación solar en electricidad.

Diego Martín^{1,2}, Alejandro Datas² y Carlos Algora²

¹ *Grupo de Diseño y Optimización de Sistemas Informáticos. ITIS - CES Felipe II. Universidad Complutense de Madrid*

² *Grupo de Semiconductores III-V. Instituto de Energía Solar. Universidad Politécnica de Madrid*

dmartin@cesfelipesecondo.com

Resumen: La energía solar fotovoltaica es una de las alternativas renovables más interesantes para afrontar el futuro energético del planeta desde el punto de vista de la sostenibilidad. Sin embargo, actualmente los sistemas fotovoltaicos comerciales son poco eficientes –aprovechan sólo el 10% de la radiación incidente– y económicamente menos atractivos que las fuentes de energía convencionales. En este trabajo se analizan las principales causas que limitan la eficiencia de conversión de radiación en electricidad y, tras ello, se presenta una novedosa línea de investigación basada en la utilización de sistemas termofotovoltaicos conjuntamente con concentradores solares, estrategia que permite incrementar la eficiencia de conversión hasta alcanzar valores por encima del 30%, algo fundamental para aumentar la competitividad de las técnicas fotovoltaicas. Por último se presenta el prototipo de Sistema Solar Termofotovoltaico que se está construyendo en el *Instituto de Energía Solar* en colaboración con los principales laboratorios de investigación europeos en la materia.

Palabras Clave: Sistemas termofotovoltaicos, energía solar, sistemas de concentración, semiconductores III-V, antimonio de galio, germanio, células fotovoltaicas, energías renovables, radiación solar, radiación infrarroja.

1. INTRODUCCIÓN

Se habla de energía solar fotovoltaica cuando se utilizan células solares convencionales, generalmente fabricadas en silicio (Si) o arseniuro de galio (GaAs) y agrupadas en paneles, para convertir la radiación que proviene del sol en electricidad por medio del efecto fotovoltaico. La eficiencia de conversión de los sistemas fotovoltaicos que actualmente se encuentran en el mercado –que básicamente expresa el porcentaje de irradiancia solar incidente que se convierte en potencia eléctrica– se sitúa, en promedio, tan sólo en el entorno del 10%. Así, de los 1000 W de potencia luminosa que inciden, en condiciones normales, en un panel solar típico de 1 m² de superficie tan sólo se extraen del mismo aproximadamente 100 W de electricidad, ¡desaprovechándose los otros 900 W!

La combinación de esta baja eficiencia y del alto precio de los materiales semiconductores con los que se fabrican las células solares incide negativamente en el precio de la energía eléctrica de origen fotovoltaico, que en 2007 se situó aproximadamente en 0,35-0,38 € por cada kWh eléctrico producido [1] [2], en unas condiciones climáticas similares a las de España. ¿Es este precio elevado? Para poder comparar, la Fig.1 muestra el precio que los consumidores domésticos pagaron por la energía eléctrica en 2007 para todos los países de la Unión Europea.

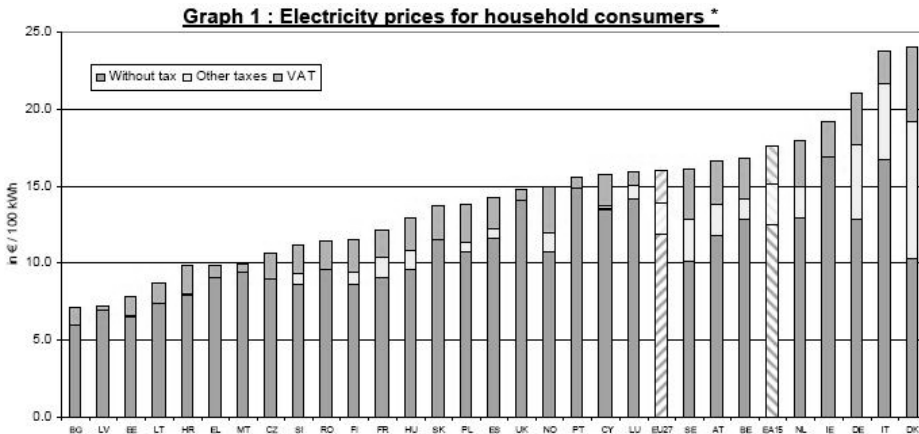


Figura 1: Precio de la electricidad en 2007 para consumidores domésticos (*fuente: Eurostat)

Como se puede apreciar, el precio medio para los 27 estados miembros de la unión se sitúa en poco más de 15 € por cada 100 kWh, o lo que es lo mismo, 0,15 €/kWh. Mientras el precio de la energía eléctrica de origen fotovoltaico se mantenga en unos niveles tan alejados de los que proporciona el resto del sector

eléctrico a los consumidores será muy difícil que pueda aspirar a aumentar su cuota de mercado en la generación eléctrica en los años venideros.

Cabe reseñar que actualmente dicha ausencia de competitividad en lo económico se ve enmascarada y corregida tanto por los numerosos incentivos, subvenciones y créditos a bajo interés para facilitar la instalación de los equipos fotovoltaicos generadores como por las primas a la producción de electricidad de origen renovable que los gobiernos de los distintos países de la Unión Europea han puesto a disposición de los productores de energía solar fotovoltaica [3] [4]. En España, por ejemplo, tras el cambio de marco regulador que tuvo lugar con el *Real Decreto 436/2004*, de 12 de marzo –mediante el cual se aumentó la potencia máxima 5 a 100 kWp de las instalaciones fotovoltaicas que tienen derecho a recibir la máxima retribución por producción de electricidad, que a su vez también aumentaba hasta situarse en el 575% de la *Tarifa Media de Referencia* del sector–, la potencia total instalada se ha multiplicado por 27, pasando de tan sólo 22 MWp en diciembre de 2004 a los 603 MWp con inscripción definitiva en el *Registro de Instalaciones de Producción en Régimen Especial* en abril de 2008 –cifra que no tiene en cuenta las instalaciones actualmente en construcción, o que ya están terminadas pero no registradas– mientras que en el mismo periodo el número total de instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica ha aumentado de 3207 a 18706. Tan sólo en el año 2007 se registraron 8614 nuevas instalaciones que aportaron una potencia total 434 MWp, lo que supuso un crecimiento del 410%. Sin embargo, tras el *Real Decreto 661/2007* ya se conoce que, habiendo superado con creces el objetivo que se establecía en el *Plan de Energías Renovables 2005-2010* del Ministerio de Industria –consistente en alcanzar una potencia total fotovoltaica conectada a la red de 371 MWp– dicho escenario de subvenciones y primas se va a ir reduciendo paulatinamente [5], lo que puede suponer un gran estancamiento en el sector fotovoltaico si éste no logra ser económicamente competitivo por sus propios medios.

Para cerrar este marco introductorio con datos algo más globales cabe reseñar que en el año 2007 la potencia eléctrica total instalada en el mundo de origen fotovoltaico rondaba los 9 GWp [4], lo que tan sólo supone el 0,15% de producción eléctrica mundial. En España, la situación es equivalente: los 603 MWp reseñados tan sólo constituyen el 0,66 % de la potencia eléctrica total instalada, que a principios de 2008 era de 90772 MW [6]. Se estima que para que sea competitiva, el precio de la energía solar fotovoltaica debe disminuir hasta situarse en el rango de 0,1-0,25 €/kWh [1], para lo cual es fundamental, entre otras actuaciones, aumentar drásticamente la eficiencia de conversión de radiación solar en electricidad.

2. RADIACIÓN SOLAR, ESPECTROS Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN

¿A qué se deben tan bajos valores de eficiencia en los sistemas fotovoltaicos convencionales? Aunque no es el único, uno de los factores limitadores de mayor peso es el relativo al propio mecanismo fotovoltaico de conversión de radiación en energía eléctrica. Hay que recordar que en un material semiconductor la mayor parte de los electrones se encuentran ligados a sus respectivos átomos. Cuando la radiación penetra en el material semiconductor, los fotones de la misma colisionan con los electrones, cediéndoles su energía en la interacción. Sólo si esta energía es igual o superior al valor del ancho de banda prohibida o *gap* del material el electrón ligado será extraído de su átomo y se podrá mover con libertad por el semiconductor, algo que en términos más técnicos se conoce como *fotogeneración de un par electrón-hueco*. Tras ello, la estructura interna de unión p/n de la célula solar es la que permitirá, tras la interacción fotón-electrón descrita, extraer el mayor número posible de electrones y huecos fotogenerados del dispositivo antes de que se vuelvan a recombinar. Pero es en dicha interacción fotón-electrón donde reside una de las claves de la eficiencia de conversión fotovoltaica, ya que:

- La radiación incidente con *energía menor que la del gap* del semiconductor no podrá contribuir a la fotogeneración, al no poder ceder la energía mínima necesaria para que un electrón de la banda de valencia (electrón ligado), pase a la banda de conducción (electrón libre). Si no se reaprovecha, dicha energía se perderá.

- La radiación incidente con *energía igual o superior a la del gap* sí contribuirá a la fotogeneración. Sin embargo, cuando la energía de los fotones incidentes es superior a la del *gap*, con ella se generan pares electrón-hueco, éstos adquieren dicha energía pero pierden el exceso paulatinamente mediante interacciones –choques, básicamente– con los átomos del semiconductor (técnicamente, se *termalizan*), siendo aprovechada sólo la energía del *gap*.

Aunque son otros muchos factores adicionales los que también contribuyen a la eficiencia del dispositivo –calidad eléctrica y óptica del semiconductor, *gap* directo o indirecto del mismo, estructura de célula optimizada (dopajes, espesores), existencia de capas antirreflectantes, minimización de las pérdidas por efecto Joule, etc.–, queda claro que uno de los requisitos para una conversión fotovoltaica eficiente es que el espectro de radiación sea lo más cercano posible al *gap* del semiconductor en el que se fabrican los dispositivos. De hecho, se ha demostrado que dispositivos fotovoltaicos de GaAs que

trabajan con luz monocromática acoplada al valor del gap del semiconductor pueden alcanzar eficiencias de conversión entre el 40 y el 50% [7].

¿Y cómo es el espectro de radiación solar que llega a la Tierra? Pues, lamentablemente, algo alejado del ideal. Recordemos que la superficie solar, situada a 150 millones de km de nuestro planeta, radia aproximadamente como un cuerpo negro a una temperatura cercana a los 5500°C. Así, el espectro de la radiación que alcanza las capas altas de la atmósfera terrestre se conoce como AM0 (de *Air Mass 0*), y se puede observar en la Fig. 2. Cuando dicha radiación atraviesa la atmósfera sufre cierta atenuación (que es mayor en algunas zonas del espectro debido a la absorción selectiva de las moléculas de vapor de agua presentes en la troposfera) y se convierte en otro de los que la comunidad fotovoltaica reconoce como estándar y denomina AM1.5D. Como se puede apreciar también en la Fig. 2, dicho espectro se extiende desde longitudes de onda de 0,3 μm hasta aproximadamente 2,5 μm , con valores máximos entre 0,5 y 0,6 μm . Convertir eficientemente un espectro de radiación tan amplio con una célula solar de Si o de GaAs (cuyas longitudes de onda de corte son de 1,11 μm y 0,88 μm a 300K, respectivamente) es una tarea muy complicada.

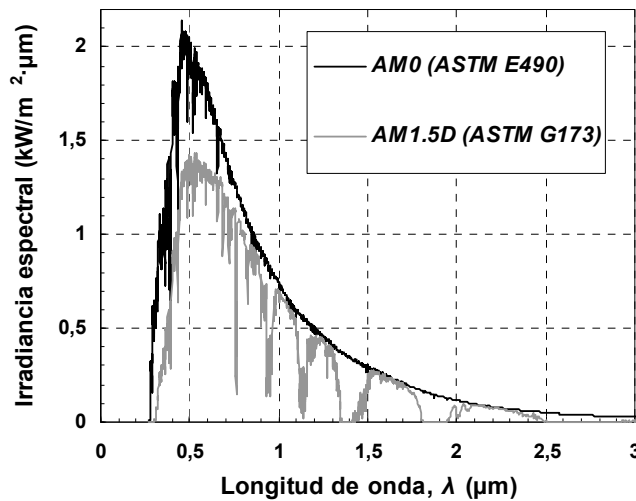


Figura 2: Espectros de la radiación solar antes y después de atravesar la atmósfera, denominados AM0 y AM1.5D (o AM1.5 Directo), respectivamente.

Por todos estos motivos, el *Instituto de Energía Solar* de la *Universidad Politécnica de Madrid* (IES-UPM) –un referente nacional e internacional en la investigación, desarrollo e innovación en el ámbito de la energía solar fotovoltaica– está inmerso desde 2003 en un proyecto europeo de gran

envergadura –perteneciente al VI Programa Marco de la UE– denominado *FullSpectrum* [8], junto con otras instituciones de prestigio en el ámbito fotovoltaico como el *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme* [9] de Friburgo (Alemania) o el *Ioffe Physico-Technical Institute* [10] de San Petersburgo (Rusia), entre otros. Juntos están explorando nuevas estrategias para aprovechar por completo el espectro solar descrito anteriormente. Una de las iniciativas más punteras y que está generando mayores expectativas se lleva a cabo en el *grupo de semiconductores III-V*, y se basa en el diseño y fabricación de *células solares multiunión o tándem*. Esta idea consiste en incorporar en una misma estructura varias células fotovoltaicas de distintos materiales semiconductores conectadas entre sí [11], lo que permite que cada una de ellas se encargue de convertir la parte del espectro para la que presenta más eficiencia, habiéndose alcanzado ya valores por encima del 40% [12]. Otras estrategias en el mismo sentido son el desarrollo de *células solares de banda intermedia*, con las que también se pueden alcanzar, en teoría, eficiencias muy elevadas [13], pero cuya viabilidad práctica se está comenzando a estudiar en la actualidad, y el diseño, construcción y caracterización de los denominados *Sistemas Solares Termofotovoltaicos*, que situarían la eficiencia en el 30-35% [14]. Esta última, que también se está llevando a cabo en *grupo de semiconductores III-V* del IES-UPM, es la línea de investigación que se presenta en las siguientes páginas.

3. SISTEMAS SOLARES TERMOFOTOVOLTAICOS

3.1 Descripción básica

¿Qué es, pues, un *Sistema Solar Termofotovoltaico* o STPV? Antes de contestar a dicha pregunta conviene recordar muy brevemente los fundamentos básicos de los *Sistemas Termofotovoltaicos* convencionales, para luego entrar en las diferencias con respecto a aquellos que incluyen el adjetivo *Solar*. Como ya se presentó en el número anterior de esta publicación [15], un sistema termofotovoltaico convierte radiación de baja energía (correspondiente a la parte infrarroja del espectro, generalmente) en electricidad por medio de dispositivos fotovoltaicos similares a las células solares convencionales, denominados *células termofotovoltaicas*. La radiación suele provenir en este caso de un material incandescente denominado *radiador* o *emisor*, que se

calienta generalmente utilizando sistemas de combustión de materiales orgánicos, isótopos radioactivos, u otras alternativas hasta alcanzar temperaturas en el rango de los 1000-1700°C. En concordancia con lo explicado anteriormente, para aprovechar eficientemente dicha radiación de baja energía del emisor se necesitan células termofotovoltaicas fabricadas con semiconductores de un ancho de banda prohibida más reducido que el de las células solares convencionales, entre los que destacan en antimonio de galio (GaSb), semiconductor III-V con un gap directo de 0,72 eV a 300 K (que le permite extender su respuesta espectral hasta 1,75 μm) o el germanio (Ge), con gap indirecto de 0,66 eV (y respuesta espectral hasta 1,86 μm).

Utilizando este mismo esqueleto, la idea básica de un *Sistema Solar Termofotovoltaico* (STPV) es sustituir la fuente de combustión que calienta el emisor por un *sistema óptico de concentración de la radiación solar*. Dicha radiación concentrada calienta el emisor hasta su temperatura de operación habitual (algo imposible utilizando luz solar sin concentrar). La Fig. 3 muestra el esquema básico de estos sistemas.

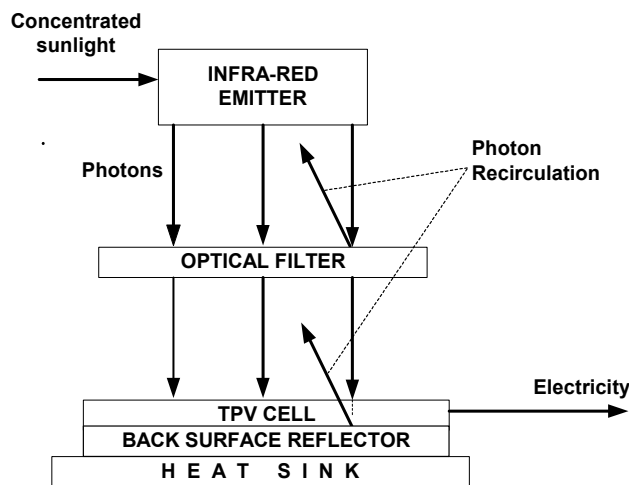


Figura 3: Esquema básico de un sistema STPV, mostrando los elementos que permiten la recirculación de fotones, característica esencial para aumentar la eficiencia del sistema (cortesía del Instituto Ioffe de San Petersburgo).

Entonces, ¿cómo consigue un sistema STPV aumentar la eficiencia de conversión de la radiación en electricidad? La respuesta se encuentra en el hecho de que la fuente de radiación se ha trasladado del astro solar,

astronómicamente lejano y, por ello, obviamente no manipulable, al interior del propio sistema.

Esto permite que el diseñador pueda actuar en dos direcciones:

- *Modificando las longitudes de onda* de la radiación incidente y *adaptándolas a la región espectral* en la que las células termofotovoltaicas presentan mayores eficiencias de conversión, de manera análoga a lo que ocurre con los sistemas fotovoltaicos iluminados con luz monocromática. Para ello se recurre a la ingeniería de materiales para la elección y fabricación del emisor o radiador del sistema.

- *Permitiendo la recuperación o recirculación de los fotones no aprovechables* por las células termofotovoltaicas, mediante la incorporación de filtros ópticos entre el emisor y las células y/o reflectores traseros (ver Fig. 3) que permiten redirigir dicha radiación de nuevo hasta el emisor, donde se reabsorbe y reutiliza para elevar la temperatura de operación del mismo.

Como ambos puntos son la clave que permite optimizar el rendimiento de la cavidad óptica en la que se basa un *Sistema Solar Termofotovoltaico*, se tratan con más detalle en las siguientes secciones. Cabe mencionar que, aunque los primeros estudios teóricos en energía solar termofotovoltaica se remontan a finales de la década de 1970 [16] [17] (entre los que destaca el trabajo realizado por P. Wurfel y W. Ruppel y titulado “*Upper limit of thermophotovoltaic solar energy conversion*” [18]) fue la ausencia de dispositivos termofotovoltaicos eficientes en esa época la que impidió que se plantease llevar a la práctica los resultados de dichos trabajos.

3.2 Modificación del espectro y tipos de radiadores

Para caracterizar un elemento radiante se requiere conocer su temperatura de operación (o perfil de la misma) y su emisividad espectral. La emisividad espectral de un cuerpo es la relación existente, para cada longitud de onda, entre la radiación emitida por dicho cuerpo y la de un cuerpo negro a la misma temperatura. En el ámbito de las técnicas termofotovoltaicas, se suele hacer una clasificación de la naturaleza de los emisores o radiadores en función de las características de su emisividad espectral, distinguiendo aquéllos cuya radiación abarca un amplio rango de longitudes de onda (*radiadores de banda ancha*), de los que presentan emisividades más selectivas (*radiadores selectivos*).

Un *radiador de banda ancha* es aquél cuya emisividad puede considerarse no nula en un amplio intervalo espectral. Como la emisividad de tales radiadores es siempre menor que la ideal (unitaria), también se les suele denominar *radiadores de cuerpo gris*. Los materiales más utilizados como

emisores de banda ancha son tanto metales como algunos compuestos cerámicos. Entre estos últimos se encuentran ciertos materiales como el nitruro de silicio (Si_3N_4), el óxido de aluminio o alumina (Al_2O_3), la circonia (ZrO_2) y el carburo de silicio. Uno de los principales inconvenientes de este tipo de emisores cerámicos radica en que las altas emisividades que presentan se extienden hasta longitudes de onda de 4-5 μm , debido a la particular configuración de su estructura. Esto obliga necesariamente al uso de sistemas de control espectral eficientes como los que se presentan en la siguiente sección, que eviten que dichas longitudes de onda no aprovechables alcancen las células termofotovoltaicas, devolviéndolas al emisor o radiador del sistema.

En general, la mayor parte de los metales también pueden ser considerados como radiadores de banda ancha. Son de especial interés aquéllos con elevados puntos de fusión (titanio, níquel, vanadio, wolframio –tungsteno– o molibdeno). Una de sus principales ventajas con respecto a los radiadores cerámicos reside en las menores emisividades que presentan en el infrarrojo medio y lejano, y que tiene que ver con su configuración electrónica. Dicha inherente emisividad ligeramente selectiva les convierte en una opción muy atractiva en los sistemas prácticos. Sin embargo, uno de los principales problemas que plantea su utilización es la facilidad con la que se oxidan cuando se los somete a elevadas temperaturas. Por ello, su operación en sistemas STPV está restringida a la presencia de atmósferas inertes o incluso a la existencia de vacío. Este requisito impone una mayor complejidad en el diseño de los sistemas, ya que deben incluir partes sellantes que resistan los amplios ciclos térmicos que se presentan en la práctica.

El metal más utilizado con radiador termofotovoltaico en sistemas con células de GaSb es, sin duda, el tungsteno. Este metal resulta especialmente idóneo puesto que sus propiedades de radiación coinciden en gran medida con la respuesta espectral de los dispositivos de GaSb. Una de las líneas de investigación en radiadores metálicos más reciente y en la línea de lo expuesto en la sección anterior se basa en la consecución de emisividades espectrales optimizadas que se acoplen con mayor fidelidad al intervalo espectral de conversión de los dispositivos fotovoltaicos. Estas mejoras, que han tomado como base el tungsteno por su citada selectividad natural –la emisividad del tungsteno se encuentra entre 0,5 y 0,6 para longitudes de onda hasta 1,5 μm , decreciendo para longitudes de onda más elevadas hasta presentar valores inferiores a 0,1 por encima de las 2 μm [19], se han centrado en tres líneas diferentes:

- El *depósito de capas de dieléctricos* sobre las superficies de los radiadores, con lo que se puede lograr aumentar la emisividad del metal en el

rango de longitudes de onda inferior a $1,7 \mu\text{m}$ hasta valores de $0,8$ [20], aumentando la densidad de potencia aprovechable por el convertidor.

- *La modificación de la estructura física de las superficies.* Desde principios del siglo XX se sabe que las estructuras metálicas con algún motivo periódico presentan interesantes propiedades de absorción y emisión [21]. Según las teorías de la difracción, la aparición de una estructura periódica en una superficie metálica permite acoplar los *plasmones* ópticos superficiales a la radiación emitida, obteniendo incrementos selectivos en la emisividad de igual manera que con los recubrimientos antirreflectantes. Estas teorías ya han sido llevadas a la práctica realizando motivos de dimensiones micrométricas en radiadores de tungsteno [22], obteniéndose buenos resultados espectrales. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de estas modificaciones es que la radiación emitida únicamente es optimizada para ángulos de incidencia perpendiculares a la superficie de emisión.

- *Fabricación de cristales fotónicos.* Un cristal fotónico [23] es aquel medio en el que el índice de refracción varía periódicamente. Si en un cristal semiconductor la variación periódica del potencial electrostático da lugar a intervalos de energía prohibida para los portadores de carga eléctrica, en un cristal fotónico la periodicidad del índice de refracción se refleja en la existencia de anchos espectrales prohibidos para la radiación absorbida y emitida, en los que la densidad de estados fotónicos (de manera análoga a los semiconductores), es nula, por lo que la emisividad también lo es. Así, haciendo coincidir las regiones espectrales sin radiación con aquellas donde los dispositivos no fotogeneran se logra aumentar la eficiencia del conjunto.

En contraposición a los anteriores, los *radiadores selectivos* se caracterizan por emitir radiación en uno o varios intervalos espectrales muy estrechos. Los materiales más utilizados para alcanzar dichas propiedades espectrales en el campo termofotovoltaico han sido y son sin duda los *óxidos de tierras raras* (lantánidos). En estos óxidos, los átomos de lantánido se encuentran ionizados positivamente. Los electrones de valencia correspondientes de los orbitales $4f$, que son los responsables de la mayor parte de las propiedades de emisión y absorción, presentan una gran localización espacial, no existiendo prácticamente interacción con los iones vecinos. Ello da lugar a la presencia de niveles electrónicos discretos, en lugar de bandas energéticas continuas, por lo que dichos materiales se comportan de manera muy similar a los compuestos gaseosos, presentando picos de emisión correspondientes a las transiciones entre uno y otro estado electrónico.

Los dos emisores selectivos más utilizados en sistemas termofotovoltaicos son aquellos basados en óxidos de iterbio (también denominados *iterbia*,

Yb_2O_3), cuyo pico de emisión se encuentra en una longitud de onda de $1\ \mu\text{m}$, y los de óxidos de erbio (o *erbia*, Er_2O_3), que presentan dicho máximo en las cercanías de $1,55\ \mu\text{m}$. Sus emisividades espectrales los hacen idóneos para su operación conjuntamente con células de Si y GaSb, respectivamente.

Aunque la gran ventaja de estos materiales es su peculiar emisividad, el principal inconveniente que presentan reside en su fragilidad y en la dificultad de fabricar emisores que resistan los ciclos de temperatura habituales en los sistemas termofotovoltaicos.

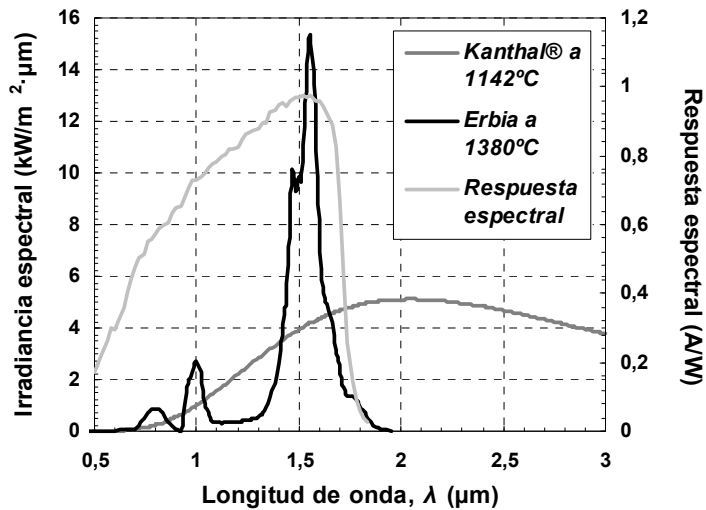


Figura 4: Irradiancia espectral medida para un radiador de cuerpo gris metálico (fabricado en una aleación de Fe, Cr y Al denominada Kanthal®) a 1142°C y un radiador selectivo de erbia a 1380°C , en el mismo sistema de combustión. Se presenta también una curva de respuesta espectral típica para una célula termofotovoltaica de GaSb.

A modo de ejemplo, la Fig. 4 presenta el espectro de radiación de un radiador selectivo de erbia y un radiador de banda ancha metálico, ambos calentados con la misma fuente. En la figura se observa claramente la gran diferencia en los espectros de emisión de las dos aproximaciones: para la misma potencia de entrada, el radiador de erbia alcanza mayores temperaturas (1380°C frente a 1142°C), su máximo de emisión es más acusado y se encuentra justo en la zona de máxima respuesta espectral de los dispositivos de GaSb, lo que permite una conversión fotovoltaica mucho más eficiente de dicha radiación.

3.3 Control espectral y recirculación de fotones

La recirculación de los fotones con energías menores al gap del semiconductor hacia el radiador es otra de las necesidades de los sistemas solares termofotovoltaicos prácticos en aras de conseguir mayores eficiencias. Mediante el control espectral se pueden alcanzar mayores temperaturas de radiador para la misma radiación solar incidente, por lo que existe una mayor proporción de radiación en la banda convertible por los dispositivos.

El elemento de control espectral ideal, cuando se sitúa entre el radiador y los convertidores fotovoltaicos, debería presentar una reflectividad nula para longitudes de onda menores que la del gap del semiconductor y del 100% de ahí en adelante. Desde el punto de vista teórico, en aras de aumentar la eficiencia se podría especular, más que en un filtro paso alto (en energía) como el descrito, en un filtro paso banda cuya transmitancia fuera no nula únicamente en un intervalo espectral cercano al ancho de banda del semiconductor, donde como ya se ha comentado la conversión de radiación es más eficiente. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, las iniciativas desarrolladas van por el camino apuntado en la primera opción. Varias han sido las aproximaciones tecnológicas ensayadas o previstas para conseguir esa respuesta:

- *Filtros ópticos interferenciales* de capas dieléctricas. La opción quizá más extendida, por su sencillez y fiabilidad, es la del depósito de múltiples capas de dieléctricos, alternando sus índices de refracción [24], sobre sustratos transparentes resistentes a las altas temperaturas, como cuarzo o Pirex. En [25] se demuestra que considerando un número suficiente de capas dieléctricas se consiguen filtros ópticos con respuestas muy cercanas a la ideal.

- *Filtros de plasma de óxidos conductores transparentes* (TCO, *Transparent Conducting Oxides*). Un TCO es un material semiconductor con un ancho de banda prohibida elevado, lo que le permite presentar un coeficiente de extinción relativamente bajo para algunas longitudes de onda. Dichos materiales pueden doparse hasta alcanzar concentraciones de portadores muy elevadas (en el entorno de 10^{20} cm^{-3}), situación en la que presentan conductividades mucho mayores que la de un dieléctrico. Mediante capas delgadas de TCO se pueden conseguir filtros de plasma que presentan muy buenas características espectrales [25]. Cuando se usan en combinación con filtros interferenciales, se pueden obtener valores de reflectividad del 90% para longitudes de onda elevadas y transmitividades del 75% [24]. Recientemente se ha considerado la integración del filtro de plasma de TCO en la propia estructura de la célula termofotovoltaica, sustituyendo a la vez a la malla de metalización y la capa

antirreflectante [26] y eliminando las pérdidas por sombreado. En cualquier caso, dicha opción todavía no se ha contrastado experimentalmente.

- *Filtros de redes resonantes*. Los filtros de redes resonantes (también denominados de *antenas resonantes*) se basan en depositar motivos metálicos periódicos de tamaño micrométrico sobre un dieléctrico, o en patrones también periódicos fabricados sobre las mismas superficies metálicas. Similarmente a lo comentado para las estructuras avanzadas de radiadores, cuando las dimensiones de los motivos son similares a la longitud de onda de la radiación se produce una interacción electromagnética entre ambos que resulta en un espectro de radiación modificado. Con redes metálicas sobre dieléctricos se consiguen altas reflectividades en una banda de longitudes de onda (filtros *supresores de banda*, también llamados filtros *capacitivos*), mientras que con las estructuras en metales se consiguen filtros paso banda (filtros *inductivos*).

- *Reflectores traseros*. La última de las opciones consideradas ha sido la de incorporar en la cara trasera de los dispositivos un espejo reflector [27]. Esta aproximación se basa, como ya se ha comentado, en la baja absorción de fotones en el dispositivo cuando aquellos tienen energías inferiores a la del gap del semiconductor. Por ello, en su superficie trasera se coloca una capa de dieléctrico, se elimina selectivamente en algunas zonas para realizar el contacto trasero y finalmente se deposita una capa metálica (comúnmente de Au o Ag) que actúa como un espejo y devuelve hacia el emisor una parte muy importante del intervalo espectral de fotones no absorbidos, tal y como ya se observó en el esquema de la Fig. 3, aumentando así la eficiencia del sistema.

Además de su importante misión espectral, cuando estos elementos se sitúan entre el radiador y los dispositivos permiten reducir la transmisión del calor por convección entre las distintas partes del sistema. Esto se traduce en que las células termofotovoltaicas trabajan a una temperatura más reducida, algo que, de paso, también mejora su eficiencia de conversión.

3.4 Células termofotovoltaicas

Debido a su relativa madurez con respecto a otras opciones, la mayor parte de los sistemas termofotovoltaicos prácticos, solares o no, se han construido utilizando células de GaSb fabricadas por difusión de Zn [25] [28]. Sin embargo en los últimos años ha aumentado el interés por los dispositivos fabricados en semiconductores III-V ternarios y cuaternarios, con el único objetivo de reducir el ancho de banda prohibido del material y extender la respuesta espectral de la célula hacia longitudes de onda más elevadas, donde los radiadores que trabajan a menores temperaturas presentan sus máximos de emisión. Sin embargo, a

costa de aumentar la longitud de onda de corte también se reduce el valor de las tensiones de trabajo de las células, por lo que han proliferado también los dispositivos con múltiples células conectadas monolíticamente en serie, lo que permite aumentar dichas tensiones de operación. En resumen, las opciones alternativas al uso de células de GaSb de mayor interés son las siguientes:

- *Semiconductores ternarios*: Se han fabricado dispositivos termofotovoltaicos fundamentalmente en dos semiconductores III-V ternarios: InGaAs e InGaSb. Los dispositivos de InGaAs se conocen con gran profundidad debido a que han sido utilizados previamente como detectores de infrarrojos, convertidores monocromáticos para iluminación láser y en células tándem para aplicaciones solares de concentración. Las capas de InGaAs ajustado en red sobre InP presentan un valor del gap (0,74 eV) similar al del GaSb, por lo que se han estudiado preferentemente compuestos con una mayor cantidad de indio, lo que provoca el desajuste en red pero permite anchos de banda prohibida de 0,50 a 0,74 eV. Aunque los dispositivos de InGaSb son menos conocidos, recientemente este material ha atraído el interés de los investigadores puesto que se han fabricado sustratos crecidos en lingotes de mediante la técnica de Bridgman [29], logrando anchos de banda prohibida de 0,56-0,60 eV. Además con ellos se han obtenido los primeros dispositivos fotovoltaicos en obleas de n-InGaSb mediante difusiones de Zn en fase vapor, con una tecnología muy similar a la utilizada para células de GaSb. Aunque los resultados todavía son mejorables, prescindir de las costosas técnicas epitaxiales hace que ésta sea una de las alternativas más interesantes de cara al futuro.

- *Semiconductores cuaternarios*. La introducción de un cuarto elemento en el semiconductor permite crecer epitaxialmente estructuras acopladas en red y seleccionar con más libertad el ancho de banda prohibida del semiconductor. Por el contrario, el grado de complejidad de los crecimientos aumenta considerablemente. La mayor parte de los trabajos en este campo se han centrado en estructuras epitaxiales de InGaAsSb sobre GaSb, crecidas tanto por LPE y MBE como por MOCVD, con las que se obtienen anchos de banda prohibida entre 0,5 y 0,6 eV. Los dispositivos alcanzan así respuestas espectrales en el rango de las 2,1-2,5 μm [30]. Otro de los semiconductores cuaternarios considerado recientemente para radiadores de muy baja temperatura es el InAsSbP, cuyo gap puede reducirse hasta tan sólo 0,4-0,5 eV. Los resultados de estos esfuerzos han sido prometedores, obteniéndose respuestas espectrales que se extienden más allá de las 3 μm , aunque todavía hay muchas posibilidades de mejora.

- *Células tándem*. Aunque, como ya se ha comentado, las células tándem monolíticas suponen actualmente uno de los puntos de atención más

importantes en el sector fotovoltaico solar, en el ámbito termofotovoltaico todavía no se han tratado con la misma intensidad, existiendo muy pocos trabajos al respecto. Esta tendencia se debe, sin duda, a la relativa inmadurez actual en el crecimiento epitaxial de los semiconductores III-V basados en antimonio y las complejas estructuras involucradas en el dispositivo tándem.

- *Células de Si y Ge.* Por último, debemos mencionar que todavía se siguen considerando sistemas termofotovoltaicos basados en células de silicio convencionales y radiadores selectivos de óxido de iterbio. La razón principal que anima estos esfuerzos es sin duda el menor precio de las células de silicio con respecto a los dispositivos de semiconductores III-V, lo que se traduce en menores costes de sistema, aunque las eficiencias de estos resultan menores [31]. Existe además un renovado interés por las células de Ge, que fueron las que se utilizaron en los primeros prototipos de sistemas STPV. Aunque el valor de su gap es adecuado, estas células se fueron descartando por sus bajas eficiencias debidas, en parte, a ser un material de gap indirecto y a la ausencia de métodos eficientes de pasivación de su superficie. Sin embargo, en los últimos años el Ge ha sido el sustrato utilizado en algunas configuraciones de células tándem para concentración solar, lo que ha permitido que las deficiencias tecnológicas existentes se resuelvan y la eficiencia de los dispositivos mejore apreciablemente. Este hecho, unido a que su coste sigue siendo menor que el de los semiconductores III-V, ha propiciado que resurja la idea de incorporar estas células a los sistemas termofotovoltaicos.

4. CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO

Aunque existen múltiples alternativas, en este proyecto se ha optado por un diseño de sistema STPV que incluye un grupo óptico de concentración de la radiación solar que consta de dos partes (Fig. 5, izquierda) [32] [33]. Como elemento primario se usa una lente de Fresnel cuadrada de 60 cm de lado que permite concentrar la radiación solar unas 100 veces, permitiendo que toda la radiación incidente en la misma se condense en un cuadrado de unos $6 \times 6 \text{ cm}^2$. Como dicha concentración es insuficiente para elevar la temperatura de operación del emisor al rango de trabajo óptimo para este tipo de sistemas, se ha incluido una segunda etapa concentradora consistente en lente biconvexa (Fig. 5, derecha), que permite disminuir el área donde la radiación se colecta otras 32 veces, permitiendo que la *concentración geométrica* total del sistema óptico –el producto de las dos anteriores– alcance valores de 3200x. Esto es equivalente a decir que toda la radiación que incide en los 3600 cm^2 de la lente de Fresnel

queda concentrada en un círculo de poco más de 7 mm de diámetro. Frente a las grandes concentraciones alcanzables, el mayor inconveniente de este tipo de sistemas ópticos de dos etapas reside en el aumento de las pérdidas de radiación por reflexión y transmisión debido a los numerosos cambios de índice de refracción que tiene que atravesar el haz de luz hasta llegar a su destino.

Dicho sistema debe montarse en un seguidor solar, para que la lente de Fresnel se encuentre en todo momento perpendicular a la radiación solar incidente. Una vez concentrada, la radiación solar incide en el radiador o emisor del sistema (Fig.5, derecha), como ya se ha comentado. En este primer prototipo se ha optado por un emisor cilíndrico y hueco de tungsteno de unos 12 mm de diámetro y 15 mm de altura, con una tapa inferior del mismo material, suspendido mediante una varilla de alúmina. Una cavidad metálica de esas dimensiones es capaz de absorber aproximadamente el 80% de la radiación que proviene del secundario [33] [34], con lo que alcanza temperaturas de operación entre 1300 y 1700°C. También se están realizando pruebas con emisores selectivos de *erbia*, aunque todavía no se han incorporado al prototipo.

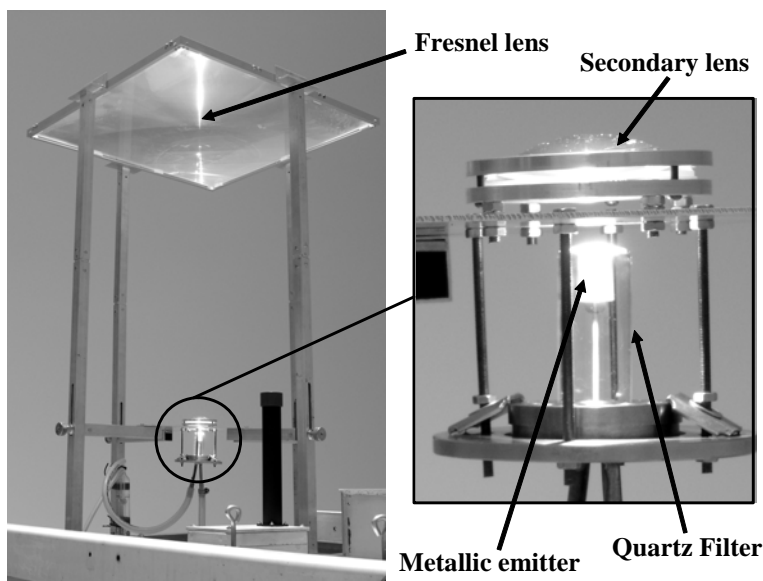


Figura 5: Fotografías del prototipo de sistema STPV desarrollado en el IES-UPM, en operación y sin las células fotovoltaicas, lo que permite observar el interior del sistema en operación: lente secundaria biconvexa, emisor metálico y filtro de cuarzo.

Entre el emisor y las células termofotovoltaicas se ha dispuesto un *elemento de control espectral* basado, en esta primera etapa del desarrollo, en un filtro

óptico cilíndrico de cuarzo [35]. En la siguiente fase del prototipo se prevé depositar en el mismo varias capas de dieléctricos que optimicen su índice de idealidad. Además, dicho elemento de cuarzo permite aislar el emisor dentro de la cavidad óptica e incorporar a la misma una atmósfera de argón que previene la degradación del emisor por oxidación y evaporación.

Como dispositivos termofotovoltaicos se está experimentando con dos opciones diferentes [35] [36]: por un lado con células de GaSb fabricadas por difusión de Zn sobre sustratos n-Gasb dopados con Te, realizadas tanto en el *IES-UPM* como en el *Ioffe Physico-Technical Institute* de San Petersburgo, y por otro células de Ge fabricadas por epitaxia MOVPE en el *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme* de Friburgo. Ya se ha comentado que las eficiencias de los dispositivos de GaSb son sensiblemente mayores que las de aquellos fabricados en Ge, pero el precio de éstos es menor.

La Fig. 6 muestra una fotografía del prototipo en operación al que se ha incorporado una estructura también cilíndrica que contiene en su interior 8 células de Ge, conectadas en serie entre sí y refrigeradas mediante un sistema de circulación de agua, incorporado en el interior del cilindro mencionado.

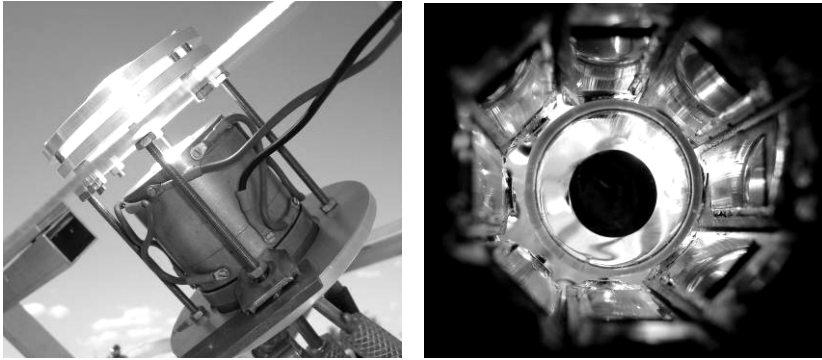


Figura 6: Prototipo en operación con las células termofotovoltaicas alrededor del emisor (izquierda). Detalle del interior de la cavidad óptica, donde se observa el emisor de tungsteno, en el centro, el filtro de cuarzo y 8 células de Ge alrededor del mismo (derecha)

En la actualidad se están llevando a cabo diferentes pruebas de evaluación de la eficiencia de conversión del sistema, a la vez que se está trabajando en optimizar aspectos clave como son elevar el rendimiento óptico de las dos etapas de concentración, aumentar la temperatura de operación del emisor de tungsteno, conseguir un perfil de iluminación de las células homogéneo, determinar el patrón de conexiones (en serie, en paralelo, o mixto) de los dispositivos que maximiza la producción eléctrica, seleccionar los materiales y

el diseño que permita la refrigeración óptima de los dispositivos, etc. Será el trabajo constante y concienzudo en cada uno de los aspectos anteriores el que permitirá, cuando la investigación avance, obtener los primeros resultados que muestren la viabilidad técnica y práctica de la novedosa línea de investigación que se ha presentado en las páginas precedentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda prestada y la colaboración permanente a sus colegas del *Ioffe Physico-Technical Institute* de San Petersburgo y del *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme* de Friburgo. A. Datas agradece la ayuda económica obtenida de la *Consejería de Educación* de la Comunidad de Madrid y del *Fondo Social Europeo* (FSE).

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la *Unión Europea* a través del proyecto *FullSpectrum* (SES6-CT-2003-502620) y por la *Universidad Politécnica de Madrid* por medio del proyecto CCG06-UPM/COM-564.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Martí, y A. Luque, editores, “*Special Issue on Photovoltaic Technology*”, ASME Journal of Solar Energy Engineering 129, 2007.
- [2] Asociación de la Industrial Fotovoltaica, “*El papel de la generación fotovoltaica en España*”, noviembre de 2007, publicado online en <http://www.asif.org>
- [3] Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía, “*El sol puede ser tuyo: respuestas a todas las preguntas clave sobre Energía Solar Fotovoltaica*”, junio de 2007, publicado online en <http://www.idae.es>
- [4] Asociación de la Industrial Fotovoltaica, “*Hacia un suministro sostenible de electricidad. La energía solar fotovoltaica en España. Informe anual 2008*”, publicado online en <http://www.asif.org>
- [5] J. Anta, “*Ajuste fotovoltaico*”, diario Cinco Días, p. 17, 9 de junio de 2008.
- [6] Red Eléctrica de España, “*Informe Anual 2007*”, publicado online en <http://www.ree.es>
- [7] R. Peña y C. Algara, “*GaAs Multiple Photovoltaic Converters with Efficiency of 45 % for Monochromatic Illumination*”, Proc. of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, pp. 228-231, 2003.
- [8] <http://www.fullspectrum-eu.org>
- [9] <http://www.ise.fraunhofer.de>