

ENERGÍA TERMOFOTOVOLTAICA: LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA DEL CALOR Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

DEL MISMO MODO QUE UNA CÉLULA SOLAR CONVIERTE LA LUZ DEL SOL EN ELECTRICIDAD, UNA CÉLULA TERMOFOTOVOLTAICA CONVIERTE EN ELECTRICIDAD LA RADIACIÓN TÉRMICA QUE EMITEN OBJETOS INCANDESCENTES. ES DECIR, REALIZAN UNA CONVERSIÓN DIRECTA DEL CALOR EN ELECTRICIDAD, SIN NECESIDAD DE EMPLEAR PARTES MÓVILES NI FLUIDOS. ENTRE LAS MUCHAS APLICACIONES DE ESTA TECNOLOGÍA, EN EL INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR DE LA UPM ESTAMOS TRABAJANDO EN UN NUEVO CONCEPTO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA QUE UTILIZA SILICIO FUNDIDO, A UNOS 1400°C Y CÉLULAS TERMOFOTOVOLTAICAS PARA TRANSFORMAR EL CALOR ALMACENADO EN ELECTRICIDAD. DE ESTA FORMA, ES POSIBLE ALCANZAR DENSIDADES DE ENERGÍA DE MÁS DE 1 MWh POR METRO CÚBICO, UNA DE LAS MAYORES DE ENTRE TODAS LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO EXISTENTES.

Conversión termofotovoltaica

Una célula termofotovoltaica (TPV, de sus siglas en inglés) funciona de forma idéntica a una célula solar: la absorción de fotones en un material semiconductor produce electrones que se suministran al exterior creando una corriente eléctrica. La diferencia radica en que el espectro de absorción, que en una célula TPV está desplazado al infrarrojo para convertir eficientemente la radiación térmica en vez de la radiación solar. Para ello se emplean materiales semiconductores capaces de absorber fotones de baja energía, como por ejemplo el germanio o el antimonio de galio, en vez de semiconductores que absorben eficientemente la luz solar, como el silicio o el arseniuro de galio.

Por lo general, una célula TPV trabaja con fuentes térmicas que superan los 1000°C y su eficiencia de conversión, a día de hoy, está entorno al 20%¹. Además, pueden generar densidades de potencia eléctrica muy elevadas: del orden de 1 W/cm² para temperaturas de 1100° C y unos 10 W/cm² si la temperatura asciende a 1900°C. Estos valores son de entre 50 y 500 veces, respectivamente, la potencia generada por una célula solar convencional, lo cual permite alcanzar costes por unidad de potencia (en €/W) relativamente bajos, incluso si se utilizan compuestos semiconductores III-V (caros pero más eficientes) para su fabricación.

De todos modos, hay que tener en cuenta que la tecnología TPV está aún en una fase de desarrollo muy temprana y existe un amplio margen de mejora: hasta alcanzar eficiencias por encima del 40% y densidades de potencia de entre 3 y 40 W/cm² para temperaturas en el rango de 1000-2000°C. Estos valores son comparables a las células solares de multiunión empleadas en sistemas de concentración fotovoltaica, que ya han logrado eficiencias por encima del 45% y densidades de potencia de unos 40 W/cm² (para una concentración de 1000 soles).

El potencial de los dispositivos TPV, en términos de eficiencia, radica en que se puede ajustar el espectro de emisión de la fuente térmica a la respuesta espectral de la célula, algo que es imposible en una célula so-



THERMO-PHOTOVOLTAIC ENERGY: PV HEAT CONVERSION AND ITS APPLICATION IN ENERGY STORAGE SYSTEMS

JUST AS A SOLAR CELL CONVERTS SUNLIGHT INTO ELECTRICITY, A THERMO-PHOTOVOLTAIC (TPV) CELL CONVERTS THE THERMAL RADIATION EMITTED BY INCANDESCENT OBJECTS INTO ELECTRICITY. IN OTHER WORDS, IT DIRECTLY CONVERTS HEAT INTO ELECTRICITY WITH NO NEED FOR MOVING PARTS OR FLUIDS. THE SOLAR ENERGY INSTITUTE AT UPM IS WORKING ON ONE OF THE MANY APPLICATIONS OF THIS TECHNOLOGY: A NEW CONCEPT IN THERMAL ENERGY STORAGE THAT USES MOLTEN SILICON AT AROUND 1400°C AND TPV CELLS TO TRANSFORM STORED HEAT INTO ELECTRICITY. AS SUCH IT IS POSSIBLE TO ACHIEVE ENERGY DENSITIES OF MORE THAN 1 MWh PER CUBIC METRE, ONE OF THE HIGHEST OF ANY OTHER EXISTING STORAGE TECHNOLOGY.

Thermo-photovoltaic conversion

A thermo-photovoltaic (TPV) cell works in exactly the same way as a solar cell: the absorption of photons into a semiconductor material produces electrons that are supplied to create an electric current. The difference lies in the absorption spectrum which in a TPV cell is displaced towards the infrared to efficiently convert thermal radiation instead of solar radiation. For this, semiconductor materials are used that are able to

absorb low energy photons, such as for example, germanium or gallium antimonide, instead of semiconductors that efficiently absorb sunlight such as silicon or gallium arsenide.

In general terms a TPV cell works with thermal sources that exceed 1000°C and their conversion efficiency to date is in the region of 20%¹. In addition they can generate very high electric power

densities: in the region of 1 W/cm² for temperatures of 1100°C and some 10 W/cm² if the temperature rises to 1900°C. These values are between 50 and 500 times, respectively, the power generated by a conventional solar cell. This makes possible to achieve relatively low costs per unit of power (in €/W), even when III-V compound semiconductors are used (that are expensive but more efficient) for their manufacture.

In any event, it should be remembered that TPV technology is still in the early days of development and there is much room for improvement: up to achieving efficiencies of over 40% and power densities of between 3 and 40 W/cm² for temperatures in the range of 1000-2000°C. These values are comparable with those of multi-junction solar cells that are used in PV concentrator systems that have already achieved efficiencies of over 45% and power densities of around 40 W/cm² (for a concentration of 1,000 suns).

The potential of TPV devices, in terms of efficiency, stems from the ability to adjust the emission spectrum of the thermal source to the spectral response of the cell, something that is impossible in a solar cell. For this, one option is to modify, at

¹ Wernsman, B. et al. "Greater than 20% radiant heat conversion efficiency of a thermophotovoltaic radiator/module system using reflective spectral control" IEEE Transactions on Electron Devices, 2004.

lar. Para ello, una opción es la de modificar, a escala nanométrica, la superficie de la fuente emisora para cambiar sus propiedades ópticas y que sólo pueda emitir radiación en un rango espectral determinado. A estos materiales se les denomina cristales fotónicos y es uno de los campos de investigación más activos actualmente. Otra opción sería la de utilizar filtros o espejos para devolver a la fuente térmica la parte del espectro que no produce electricidad en la célula, de forma que esta radiación se reabsorba y no represente una pérdida de energía. Cualquiera de estas estrategias permite, sobre el papel, alcanzar eficiencias de conversión por encima del 50%.



nanometric scale, the surface of the emitter source to change its optical properties so that only radiation within a determined spectral range can be emitted. These materials are called photonic crystals - one of the most active fields of research today. Another option would be to use filters or mirrors to return the part of the spectrum not producing electricity in the cell to the thermal source so that this radiation is reabsorbed with no

loss of energy. On paper at least, any of these strategies could achieve conversion efficiencies of over 50%.

Reseña histórica y situación actual

Los dispositivos TPV se empezaron a desarrollar a principios de 1960, principalmente en los Estados Unidos y para aplicaciones militares. Sin embargo, en la década de los 70 se abandonaron la mayoría de estos trabajos debido, principalmente, a la carencia de materiales semiconductores de infrarrojo de alta calidad. Por ello, las actividades no se retomaron con fuerza hasta que, a principios de los 90, se fabricaron las primeras células de GaSb (Boeing) y de InGaAs (NREL) con eficiencias razonablemente altas. Estos resultados hicieron renacer el interés por esta tecnología y desde entonces y hasta mediados de los 2000, se produjo el mayor avance en el desarrollo de estos dispositivos.

Actualmente y desde mediados de los 2000, la actividad entorno a dispositivos TPV se ha ralentizado considerablemente y se concentra mayoritariamente en universidades y centros de investigación, principalmente en los Estados Unidos. Gran parte de estos trabajos tratan de nuevos conceptos para los distintos elementos de la tecnología, como por ejemplo nuevos diseños de emisores térmicos selectivos que no se degraden tras un uso prolongado², o nuevos dispositivos semiconductores que permitan aumentar la eficiencia de conversión empleando, por ejemplo, nanoestructuras cuánticas³.

Existen dos empresas que desarrollan dispositivos TPV, ambas en EEUU. JX Crystals⁴ comercializa células y módulos de GaSb y tiene un extenso catálogo de sistemas para distintas aplicaciones que van desde la cogeneración en calderas domésticas hasta sistemas portátiles o de recuperación de calor en la industria. MTPV⁵ está desarrollando un nuevo concepto de conversión TPV, en el que el emisor térmico y la célula se colocan a distancias micrométricas para aumentar de este modo la transferencia de energía y la densidad de potencia generada.

Aplicación en sistemas de almacenamiento de energía

Entre las muchas aplicaciones de un dispositivo TPV, está la de generación de electricidad en sistemas de almacenamiento de energía térmica de alta temperatura. El ejemplo más representativo de estos sistemas es el de las centrales termosolares, donde la energía solar queda almacenada en forma de calor en sales fundidas. En estos sistemas se utilizan fluidos para transferir el calor almacenado a una turbina, que es la encargada de generar electricidad. El problema es que estos fluidos se degradan a temperaturas cercanas a los 450°C, y por lo tanto existe un límite superior para la temperatura de operación de la central, lo cual limita a su vez la eficiencia de conversión y la densidad energética alcanzable por el sistema.

Historical overview and current situation

TPV devices started to be developed at the start of the 1960s, mainly in the United States and for military applications. However, most projects were abandoned during the 1970s mainly due to the lack of high quality infrared semiconductor materials. As such, activities did not restart in earnest until, at the start of the 1990s, the first GaSb (Boeing) and InGaAs (NREL) cells were manufactured, with reasonably high efficiencies. These results reawakened interest in this technology and from then on and up to mid-2000, the biggest advance in the development of these devices took place.

To date and since mid-2000, activity surrounding TPV devices has slowed down considerably and is now mostly concentrated in universities and research centres, above all in the United States. The majority of current projects focus on new concepts for different areas of the technology, such as for example new designs for selective thermal emitters that do not break down after extended use², or new semiconductor devices that increase the conversion efficiency using, for example, quantum nanostructures³.

Two companies are developing TPV devices, both of which are based in the USA. JX Crystals⁴ commercialises GaSb cells and modules, offering an extensive catalogue of systems for different applications. These range from CHP for domestic boilers to portable and heat recovery systems for industry. MTPV⁵ is developing a new concept in TPV converters, in which the thermal emitter and the cell are positioned micrometric distances apart to increase energy transfer and the power density generated.

Application in energy storage systems

The many applications of a TPV device include electricity generation in high temperature thermal energy storage systems. The most representative example of these systems is found in CSP plants where solar power is stored in the form of heat in molten salts. These systems use fluids to transfer the stored heat to a turbine that is responsible for generating electricity. The problem is that these fluids break down at temperatures close to 450°C and as such, there is an upper limit for the plant's operating temperature, which in turn limits the conversion efficiency and energy density achievable by the system.

This problem can be solved if TPV converters are used instead of turbines as these devices do not require heat transfer fluids

² Veronika Rinnerbauer et al., "Recent developments in high-temperature photonic crystals for energy conversion" *Energy Environ. Sci.*, 2012, 5, 8815-8823

³ Jian Yin and Roberto Paiella, "Multiple-junction quantum cascade photodetectors for thermophotovoltaic energy conversion" *Opt. Express* 18, 1618-1629 (2010)

⁴ <http://jxcrystals.com/>

⁵ <http://www.mtpv.com/>

Este problema se puede resolver si se emplean convertidores TPV en vez de turbinas, ya que estos dispositivos no requieren de fluidos de transferencia de calor y por lo tanto, permiten aumentar drásticamente la temperatura de operación de la central, por encima de los 1000°C. Además, el empleo de dispositivos TPV tiene otras ventajas clave: Primero, al no tener partes móviles, permite un funcionamiento silencioso y con menores requerimientos de mantenimiento. Segundo, permiten alcanzar densidades de potencia (ratios de potencia-peso y potencia-volumen) muy elevadas. Estas dos características permiten concebir sistemas compactos y silenciosos que puedan instalarse de forma descentralizada y cerca de núcleos urbanos, no sólo en grandes centrales termosolares.

El proyecto SILSTORE: almacenamiento de energía en silicio fundido

Una de las mayores ventajas de aumentar la temperatura de operación es la de poder utilizar materiales de alto punto de fusión como medio de almacenamiento térmico. Por lo general, estos materiales tienen un calor latente de cambio de fase muy elevado, lo cual permite almacenar una gran cantidad de energía por unidad de volumen. Algunos ejemplos son metales como el hierro o el níquel, o sales como el fluoruro de magnesio con puntos de fusión de entre 1200 y 1500°C. Pero sin duda, de entre todos los posibles materiales, el de mayor potencial es el silicio.

El silicio, con un punto de fusión de 1410°C, tiene un calor latente de cambio de fase anómalamente alto de 1.2 MWh/m³, lo cual le permite almacenar unas diez veces más energía por unidad de volumen que las sales empleadas actualmente. Como referencia de escala, en unos 25 litros de silicio se podrían almacenar 30 kWh, que es toda la energía consumida en una vivienda española, incluyendo electricidad y calefacción. A este potencial se une el hecho de que el silicio es un material barato y abundante, el segundo más abundante en la corteza terrestre (después del oxígeno) y que tiene una conductividad térmica elevada (25-50 W/m-K), lo cual permite extraer el calor eficientemente sin emplear encapsulados sofisticados, necesarios en el caso de las sales.

Para poder utilizar silicio como medio de almacenamiento térmico, en el Instituto de Energía Solar de la UPM⁶ estamos desarrollando un sistema (pendiente de patente en EEUU) que utiliza dispositivos TPV, en vez de turbinas, para generar electricidad. En estos sistemas la energía queda almacenada en forma de calor latente de cambio de fase en silicio fundido y se devuelve en forma de electricidad mediante convertidores TPV, proceso durante el cual el silicio vuelve a su estado sólido inicial.

El proyecto SILSTORE, que aún está en fase conceptual, ha sido finalista en las competiciones de creación de empresas Pasion>ie (promovido por Accenture y el Instituto Empresa) y actuaupm, donde además ha recibido uno de los premios a mejor idea de negocio. En estos momentos estamos buscando socios industriales y financiación para comenzar a fabricar los primeros prototipos.

Otras aplicaciones: recuperación del calor en la industria

Otra de las aplicaciones prometedoras de los dispositivos TPV es la recuperación de calor en industrias de alta temperatura. En industrias como la del acero, el vidrio o metalúrgicas en general, se estima que más del 50% de la energía consumida se pierde en forma de calor. En estos entornos, los dispositivos TPV se pueden utilizar para recuperar parte de dicho calor y generar electricidad que podría usarse en el propio emplazamiento o venderse a la red.

⁶ www.ies.upm.es/

and as such can drastically increase the operating temperature of the plant to more than 1000°C. Moreover, the use of TPV devices offers other key advantages: firstly, as it has no moving parts, it offers silent running and lower maintenance requirements; and secondly, it can achieve very high power densities (power-to-weight and power-to-volume ratios). These two characteristics lead to the creation of compact, silent systems that can be installed off-site and close to urban nuclei, not just in large CSP plants.

The SILSTORE project: energy storage in molten silicon

One of the biggest advantages of increasing the operating temperature is the ability to use materials with a high melting point as a medium for thermal storage. In general, these materials have a very high latent heat phase change allowing the storage of a large quantity of energy per unit of volume. Some examples are metals such as iron and nickel or salts such as magnesium fluoride with melting points of between 1200 and 1500°C. But without a doubt, silicon is the one material that offers the greatest potential.

Silicon, with a melting point of 1410°C, has an abnormally high latent heat phase change of 1.2 MWh/m³, allowing it to store around ten times more energy per unit of volume than the salts currently used today. As a scale of reference, 25 litres of silicon could store 30 kWh or the total energy consumed by a dwelling in Spain, including electricity and heating. To this potential is linked the fact that silicon is cheap and plentiful, the second most abundant material on the Earth's crust (after oxygen). Its high thermal conductivity (25-50 W/m-K) allows heat to be efficiently extracted without using sophisticated encapsulations that are required in the case of salts.

To be able to use silicon as a thermal storage medium, the Solar Energy Institute at UPM⁶ is developing a system (US patent pending) that uses TPV devices instead of turbines to generate electricity. In these systems, energy is stored in the form of molten silicon latent heat and converted back into electricity by means of TPV converters, a process during which the silicon returns to its natural solid state.

The SILSTORE project, still in its conceptual phase, was the finalist in the business entrepreneurship competitions Pasion>ie (promoted by Accenture and the Instituto Empresa) and actuaupm, where it received one of the prizes for the best business idea. The project is currently looking for industrial partners and funding to start manufacturing the first prototypes.

Other applications: heat recovery in industry

Another of the promising applications for TPV devices is heat recovery in high temperature industries. In industries such as steel, glass or metallurgy in general, it is estimated that more than 50% of the energy consumed is lost in the form of heat. Within these environments, TPV devices could be used to recover part of this heat and generate electricity that may then be used by the site itself or sold to the grid.



Alejandro Datas

Research Scientist at Instituto de Energía Solar -
Universidad Politécnica de Madrid
Research Scientist at the Solar Energy Institute,
Universidad Politécnica de Madrid