

SILICIO FUNDIDO EN LA BASE DE UNA NUEVA GENERACIÓN DE SISTEMAS TERMO SOLARES

UN MÓDULO QUE CONTIENE 1.000 LITROS DE SILICIO FUNDIDO A 1.410 °C, COLOCADO DIRECTAMENTE EN EL FOCO DE UN CONCENTRADOR SOLAR, Y QUE ES CAPAZ DE ALMACENAR ALGO MÁS DE 1 MWH DE ENERGÍA (10 VECES MÁS QUE LAS SALES FUNDIDAS) Y PRODUCIR DIRECTAMENTE ELECTRICIDAD MEDIANTE CONVERTIDORES DE ESTADO SÓLIDO, SIN EMPLEAR PARTES MÓVILES NI FLUIDOS DE TRASFERENCIA DE CALOR. ÉSTOS SISTEMAS SE ESTÁN DESARROLLANDO EN EL INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID Y PRETENDEN DAR LUGAR A UNA NUEVA GENERACIÓN DE SISTEMAS TERMO SOLARES DE BAJO COSTE. LA CLAVE DE ESTA TECNOLOGÍA RADICA EN EL EMPLEO DE CONVERTIDORES TERMOFOTVOLTAICOS, EN VEZ DE TURBINAS, PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD DIRECTAMENTE A PARTIR DE LA RADIACIÓN TÉRMICA INCANDESCENTE DEL SILICIO FUNDIDO. EL RESULTADO ES UN DISPOSITIVO COMPACTO, MODULAR, DE FÁCIL INSTALACIÓN, SILENCIOSO Y ROBUSTO, QUE PUEDE UTILIZARSE TANTO EN GRANDES CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CÓMO EN SISTEMAS DE MENOR TAMAÑO PARA LA COGENERACIÓN DE CALOR Y ELECTRICIDAD EN NÚCLEOS URBANOS.

La tecnología termosolar de hoy en día está basada, a grandes rasgos, en los mismos conceptos que llevan utilizándose en las centrales térmicas desde principios del siglo XX: el calor generado, en este caso mediante energía solar, produce diferencias de presión en un fluido que se pone en movimiento y transfiere su energía mecánica a una turbina, que transforma dicha energía en electricidad. El empleo de una tecnología de generación eléctrica establecida y con un alto nivel de desarrollo, ha sido probablemente el motivo por el cual se han podido ejecutar proyectos de energía termosolar de gran envergadura en tan poco tiempo. Sin embargo, las tecnologías convencionales de generación pueden no ser las soluciones más adecuadas para desarrollar las centrales termosolares del futuro, donde la escalabilidad, modularidad y fiabilidad sean criterios clave a tener en cuenta.

En este sentido, existen dos aspectos fundamentales de la energía termosolar que la diferencian del resto de centrales de generación térmica, y que deberían tenerse en cuenta a la hora de concebir nuevos sistemas: primero, la naturaleza dispersa del recurso solar y segundo, la necesidad de incorporar un sistema de almacenamiento de energía térmica, aspecto diferenciador clave que le permite competir con otras tecnologías de generación renovable. Ambos aspectos confluyen en la necesidad de disponer de tecnologías de almacenamiento y generación extremadamente compactas, que faciliten la modularidad y escalabilidad del sistema y que permitan su instalación de forma sencilla en cualquier emplazamiento, especialmente en zonas próximas al consumidor final.

Con esta visión, el Instituto de Energía Solar de la UPM está trabajando en un nuevo concepto que permite integrar en un mismo módulo compacto, la absorción, acumulación y conversión de la energía solar en electricidad¹. Este módulo se sitúa

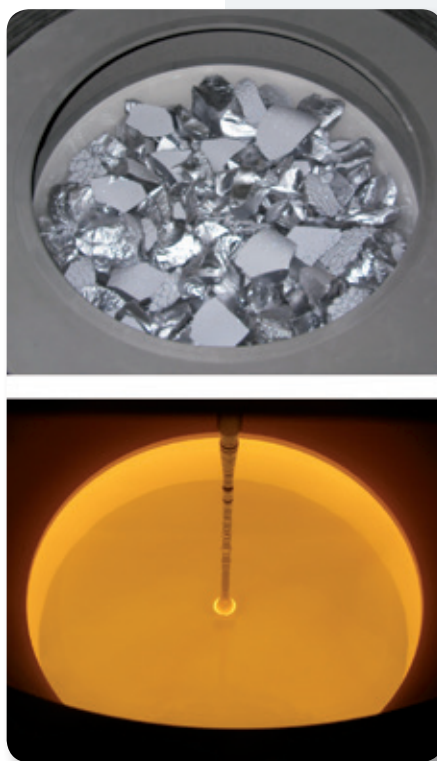
MOLTEN SILICON AS THE BASIS OF A NEW GENERATION OF CSP SYSTEMS

A MODULE THAT CONTAINS 1,000 LITRES OF MOLTEN SILICON AT 1,410°C, DIRECTLY PLACED IN THE CENTRE OF A SOLAR CONCENTRATOR THAT CAN STORE JUST OVER 1 MWH OF ENERGY (10 TIMES MORE THAN MOLTEN SALTS) AND DIRECTLY PRODUCE ELECTRICITY VIA SOLID STATE CONVERTERS, WITH NO MOVING PARTS OR HEAT TRANSFER FLUIDS. SUCH SYSTEMS ARE BEING DEVELOPED AT THE UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID'S SOLAR ENERGY INSTITUTE WITH THE AIM OF CREATING A NEW GENERATION OF LOW COST CSP SYSTEMS. THE KEY TO THIS TECHNOLOGY STEMS FROM THE USE OF THERMOPHOTOVOLTAIC CONVERTERS INSTEAD OF TURBINES, TO PRODUCE ELECTRICITY DIRECTLY FROM THE INCANDESCENT THERMAL RADIATION OF MOLTEN SILICON. THE RESULT IS A DEVICE THAT IS COMPACT, MODULAR, EASY TO INSTALL, SILENT AND ROBUST THAT CAN BE USED IN BOTH LARGE POWER GENERATION PLANTS AND IN SMALLER-SIZED SYSTEMS FOR THE COGENERATION OF HEAT AND ELECTRICITY IN URBAN CENTRES.

Today's CSP technology is largely based on the same concepts that have been used in power plants since the start of the 20th Century: generated heat, in this case via solar power, which produces pressure differences in a fluid that makes it move, transferring its mechanical energy to a turbine and transforming that energy into electricity. The use of an established electricity generation technology with a high level of development was probably the reason why it has been possible to execute large-scale CSP power projects over such a short period. However, conventional power generation technologies may not be the best solutions to develop the CSP plants of the future, in which scalability, modularity and reliability are considered as being key criteria.

In this regard, CSP power offers two fundamental aspects that distinguish it from other thermal power generation plants and that should be considered when planning new systems. First is the haphazard nature of the solar resource, followed by the need to incorporate a thermal energy storage system, a key differentiating aspect that allows it to compete with other renewable generation technologies. Both aspects combine the need to offer extremely compact storage and generation technologies that facilitate the modularity and scalability of the system, allowing easy installation in any site, and particularly, in regions close to the final consumer.

With this vision in mind, the Solar Energy Institute at the UPM is working on a new concept that can integrate the absorption, accumulation and conversion of solar power into electricity within the same compact module¹. This module is directly positioned in the centre of a solar concentrator



¹ Datas A.; Ramos, A.; Marti, A.; Del Canizo, C.; Luque, A. "Ultra high temperature latent heat energy storage and thermophotovoltaic energy conversion". Energy 107: 542-549. DOI: 10.1016/j.energy.2016.04.048. Jul 15 2016 .

directamente en el foco de un concentrador solar y produce electricidad de forma ininterrumpida día y noche. El sistema carece de partes móviles y de fluidos de transferencia de calor, lo cual le confiere un funcionamiento silencioso y con mínimas necesidades de mantenimiento, ambos aspectos muy importantes para su eventual instalación de forma descentralizada en emplazamientos urbanos.

La clave de estos sistemas radica en el empleo de convertidores termofotovoltaicos, en vez de turbinas, para producir electricidad. Estos convertidores se colocan directamente en las paredes del contenedor de acumulación térmica y permiten, por tanto, integrar la acumulación y la generación en un mismo módulo extremadamente compacto, de fácil manejo e instalación.

Conversión termofotovoltaica

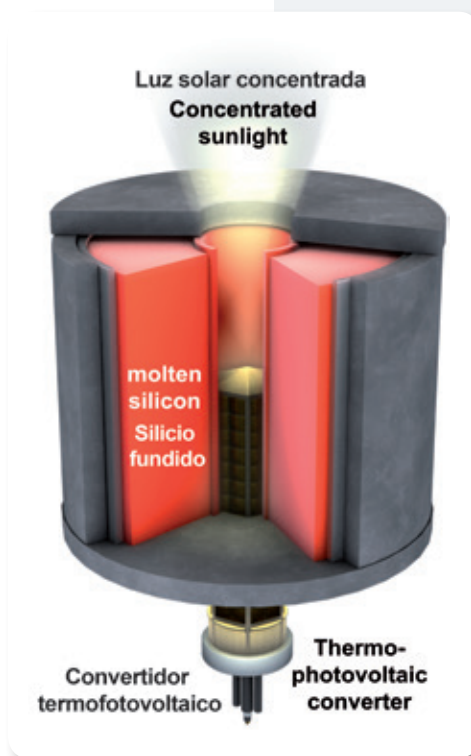
Una célula termofotovoltaica (TPV, de sus siglas en inglés) funciona de forma idéntica a una célula solar: la absorción de fotones en un material semiconductor produce electrones, que se suministran al exterior creando una corriente eléctrica. La diferencia radica en el espectro de absorción, que en 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 1.000 °C y su eficiencia de conversión, a día de hoy, está entorno al 25%². Además, pueden generar densidades de potencia eléctrica muy elevadas, por encima a los 20 kW/m², es decir unas 100 veces más que las células solares convencionales, lo cual permite alcanzar costes por unidad de potencia (en €/W) muy competitivos.

Sin embargo, la tecnología TPV está aún en una fase de desarrollo muy temprana y existe un amplio margen de mejora: hasta alcanzar eficiencias y densidades de potencia por encima del 40% y los 100 kW/m², respectivamente. El potencial de mejora en la eficiencia de estos dispositivos 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 solar. Esto puede llevarse a cabo mediante la utilización de filtros o espejos para devolver a la fuente térmica la parte del espectro no absorbida en la célula, de forma que esta radiación se reabsorba y no represente una pérdida de energía. Sobre el papel, de esta forma sería posible alcanzar eficiencias de conversión incluso superiores al 50%.

Silicio fundido como medio de almacenamiento

Para almacenar la energía solar, la mayor parte de centrales termosolares instaladas hasta la fecha han optado por la opción de utilizar el calor específico de sales fundidas, que alcanzan temperaturas no



and produces uninterrupted electricity both day and night. The system has no moving parts or heat transfer fluids (HTF), meaning that it enjoys silent running and minimal maintenance requirements, both of which are very important aspects for their eventual decentralised installation in urban locations.

The key to these systems stems from the use of thermophotovoltaic (TPV) converters instead of turbines to produce electricity. These converters are directly placed on the walls of the thermal accumulation container and as such can integrate both accumulation and generation into the same, extremely compact module, making it easy to handle and install.

TPV conversion

A 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 outwards creating an electric current.

The difference lies in the absorption spectrum that in a TPV cell is moved towards the infrared to efficiently convert thermal radiation instead of solar radiation. For this semiconductor materials are used that can absorb low energy photons, such as the germanium or gallium antimonide, instead of semiconductors that efficiently absorb sunlight such as silicon or gallium arsenide.

In general, a TPV cell works with thermal sources that exceed 1,000°C and their conversion efficiency to date is in the region of 25%². In addition, they can generate very high electrical power densities of more than 20 kW/m², in other words around 100 times more than conventional solar cells. This means that very competitive per unit power costs (in €/W) can be achieved.

However, TPV technology is still in a very early phase of development and there is much room for improvement: power efficiencies and densities of more than 40% and 100 kW/m², respectively, could be achieved. The improvement potential in the efficiency of these devices 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. This could be undertaken by using filters or mirrors to return the part of the spectrum not absorbed in the cell to the thermal source, so that this radiation is reabsorbed with no consequent energy loss. As such, on paper, it would be possible to achieve conversion efficiencies of more than 50%.

Molten silicon as a storage medium

To store solar power, most CSP plants installed to date have opted for the specific heat of molten salts that achieves temperatures of no more than ~ 500°C. In these systems, the quantity of accumulated energy is directly proportional to the temperature achieved by the salt and as such, the achievable energy density for these systems is limited, generally requiring the use of large volumes of salts. An alternative with greater potential in terms of energy density

² 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.

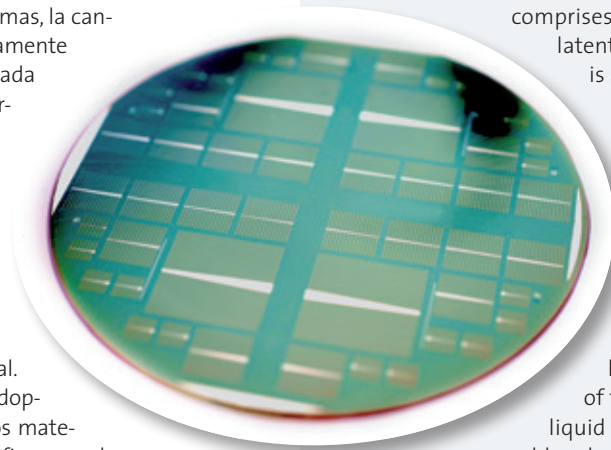
superiores a los ~ 500 °C. En estos sistemas, la cantidad de energía acumulada es directamente proporcional a la temperatura alcanzada por la sal y por tanto, la densidad energética alcanzable por estos sistemas es limitada, necesitando por lo general el uso de grandes volúmenes de sales. Una alternativa con mayor potencial en términos de densidad energética consiste en almacenar energía en forma de calor latente de fusión, donde la energía se acumula durante el cambio de fase de sólido a líquido de un material. Sin embargo, esta opción no ha sido adoptada mayoritariamente debido a que los materiales de cambio de fase tienden a solidificarse en las inmediaciones del intercambiador de calor y su baja conductividad térmica (típicamente inferior a 1 W/m-K) entorpece la extracción eficiente del calor acumulado en la fase líquida. Aunque se han propuesto soluciones a este problema, que emplean encapsulantes de alta conductividad térmica, aún no se han logrado sistemas que supongan una clara ventaja a la opción predominante basada en aprovechar el calor específico de sales fundidas.

Estos problemas se pueden resolver empleando metales de alto punto de fusión (superior a los 1.000 °C) como materiales de cambio de fase. Por lo general, estos materiales tienen una conductividad térmica y un calor latente de fusión muy elevados, lo cual permite desarrollar acumuladores compactos de los cuales es relativamente sencillo extraer el calor acumulado sin necesidad de complejos sistemas encapsulantes. Estos materiales no se han empleado aún debido a la dificultad que supone emplear fluidos de transferencia de calor que trabajen a temperaturas tan elevadas. Sin embargo, estas temperaturas encajan perfectamente con el empleo de convertidores termofotovoltaicos, que al poder situarse directamente en las paredes del acumulador térmico evitan el uso de estos fluidos.

Algunos ejemplos de este tipo de materiales de cambio de fase son metales como el hierro o el níquel, con puntos de fusión de 1.538 °C y 1.455 °C, respectivamente. Pero sin duda, de entre todos los posibles candidatos, el de mayor potencial es el silicio. Con un calor latente de 1.800 J/g, el silicio es capaz de almacenar diez veces más energía por unidad de volumen que las sales comúnmente empleadas en los sistemas termosolares. A este potencial se une el hecho de que el silicio es un material barato (~ 2 \$/kg) 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). Finalmente, con un punto de fusión de 1.410 °C, el silicio encaja perfectamente con el uso de convertidores termofotovoltaicos para generación de electricidad.

El proyecto SILSTORE

El primer prototipo de este tipo de sistemas se está desarrollando en el Instituto de Energía Solar de la UPM, dentro del marco de un proyecto EXPLORA financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. En paralelo, un grupo de investigadores del mismo centro de investigación ha puesto en marcha un proyecto empresarial denominado SILSTORE, cuyo objetivo es transferir estos desarrollos tecnológicos a la industria. Este proyecto ha sido reconocido como una de las mejores startups nacidas en la UPM en 2015, y ha sido finalista en las competiciones de creación de empresas actuaupm, Pasion>ie y más recientemente, en KIC Innoenergy Iberia. En estos momentos, están buscando socios industriales para realizar las primeras pruebas de campo de esta tecnología.



comprises energy storage in the form of latent heat of fusion, where the energy is accumulated during the phase change of a material from solid to liquid. However, this option has not been widely adopted because phase change materials tend to solidify in the immediate environs of the heat exchanger and its low thermal conductivity (typically lower than 1 W/m-K) hinders the efficient extraction of the accumulated heat from the liquid phase. Although solutions to this problem have been proposed using high thermally conductive encapsulates, systems have not yet been achieved that offer a clear advantage over the predominant option based on the use of the specific heat of molten salts.

These problems can be resolved using metals with high fusion points (over 1000°C) as phase change materials. Generally, these materials have a very high thermal conductivity and a latent heat of fusion which enables compact accumulators to be developed from which it is relatively simple to extract the accumulated heat without complex encapsulating systems. These materials have not been used due to the difficulty involved in using HTF that work at such high temperatures. However, these temperatures are perfectly in line with the use of TPV converters that can be directly placed on the walls of the thermal accumulator and as such, avoids the use of such fluids.

Some examples of this type of phase change materials are metals such as iron or nickel, with fusion points of 1538°C and 1455°C, respectively. But without a doubt, out of all the available materials, the one with the greatest potential is silicon. With a latent heat of 1800 J/g, silicon can store ten times more energy per unit of volume than the salts commonly used in CSP systems. To this potential is added the fact that silicon is an abundant and cheap material (~ 2 \$/kg), the second most widely-available on the earth's crust after oxygen and one that has a high thermal conductivity (25-50 W/m-K). Finally, with a fusion point of 1410°C, silicon is ideally-suited to the use of TPV converters for power generation.

The SILSTORE project

The first prototype of this type of systems is being currently developed at the UPM's Solar Energy Institute, under an EXPLORA project funded by Spain's Ministry of Economy and Competitiveness. In parallel, a group of researchers at the same research centre has launched a business project called SILSTORE, that aims to transfer these technological developments to industry. This project has been recognised as one of the best start-ups to have been created at UPM in 2015, and was a finalist in the business creation competitions actuaupm, Pasion>ie and more recently, KIC InnoEnergy Iberia. We are currently looking for industrial partners to carry out the first field tests on this technology.



Alejandro Datas Medina
Investigador, Instituto de Energía Solar de la UPM
Research Scientist, Solar Energy Institute of UPM