

## Área temática: Integración Arquitectónica de Sistemas Solares.

### Integración Fotovoltaica con dispositivos de capa fina: ventajas e inconvenientes, ejemplo de aplicaciones.

J. Izard, L. Sánchez

Grupo Unisolar. El Navazo, Ctra. de Candelario Km 1,8 E-37700 Béjar (Salamanca), Spain. e-mail: [jizard@grupounisolar.com](mailto:jizard@grupounisolar.com).

#### Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de las posibilidades de utilización de los módulos fotovoltaicos de capa fina a-Si como elementos para la integración arquitectónica. En una primera parte se presentan diversos argumentos y ensayos que nos indican la idoneidad de este tipo de dispositivos para ser utilizados como elementos de generación activa y aislamiento, de forma integrada y estética. En una segunda parte del trabajo se presenta dos prototipos de dispositivos: Una fachada ventilada fotovoltaica y una chimenea solar fotovoltaica diseñadas, y fabricadas en la empresa Grupo Unisolar

#### Introducción

La energía solar fotovoltaica es todavía cara, aunque es un sistema de generación de energía que es potencialmente beneficioso para la reducción de los impactos medioambientales causados por la actividad humana; por tanto lo que se busca es alcanzar una eficiencia óptima de los módulos fotovoltaicos cuando son utilizados para integración arquitectónica y de esta manera también mejorar el rendimiento medioambiental del edificio. En este trabajo exploramos las posibilidades que la tecnología fotovoltaica de capa fina nos brinda para ser utilizada como en elementos de integración en la arquitectura bioclimática.

El objeto del presente trabajo es el estudio de los módulos fotovoltaicos de capa fina (película delgada, thin film) como elementos constituyentes de la envolvente de un edificio. Las tecnologías de capa fina se han abierto un hueco en el mercado cada vez más importante debido a su madurez tecnológica y al desabastecimiento del mercado fotovoltaico ocurrido en los años pasados. La integración arquitectónica responde a la necesidad de fomentar la generación distribuida de la electricidad y minimizar la ocupación del territorio mediante el uso de cubiertas y fachadas de edificios de todo tipo y estructuras de sombreado, principalmente cubiertas de parkings.

Con el fin de argumentar cuales son las razones por las cuales la tecnología de capa fina es más adecuada para la integración, en la primera parte de este trabajo se presenta un estudio comparativo del comportamiento de las tecnologías de silicio cristalino y amorfo en condiciones de funcionamiento real. Los parámetros eléctricos y de temperatura de los paneles fotovoltaicos que proporciona el fabricante están referidos a una condiciones climáticas de referencia STC, así como los parámetros que informan sobre la influencia de la temperatura del panel en el funcionamiento del mismo (NOTC), y los coeficientes de temperatura de la tensión, la intensidad y la potencia son obtenidos normalmente en condiciones de laboratorio. Habitualmente las medidas se realizan en un espacio interior usando como fuente de irradiancia un simulador tipo flash [1]. La modificación de la temperatura se realiza mediante una cámara climática. Por tanto estas medidas pueden no reflejar claramente el comportamiento del panel en condiciones reales [2]

En cuanto a la influencia de los factores de tipo climático sobre el rendimiento de una instalación está bien establecida la influencia de la temperatura [3] y es una información que suelen proporcionar los fabricantes. En ese sentido, los coeficientes de temperatura son mejores para las tecnologías de película delgada lo cual las hace más adecuadas que las cristalinas para zonas calurosas o para aplicaciones donde los módulos no ventilen bien, ya que la pérdida de potencia por temperatura es menor. El comportamiento con relación a la componente de la radiación (directa o difusa) no está caracterizado de manera tan precisa y solamente se conoce la mejor respuesta de unas tecnologías u otras frente a los distintos tipos de radiación. Por ejemplo, la tecnología de silicio monocristalino tiene un rendimiento muy bueno frente a la componente directa de la radiación lo cual la hace idónea para instalaciones con seguimiento o en zonas en las cuales predomine dicha componente. Por el contrario, tiene un bajo rendimiento con bajas irradiancias [4] mientras que las

tecnologías de película delgada tienen un buen rendimiento con irradiancias bajas y cuando predomina la componente difusa, dándoles ventaja en ciertos climas [5].

Respecto a la durabilidad, la de los módulos cristalinos es bastante buena, estando además bien conocida. De hecho hay una gran experiencia debido a los estudios sobre instalaciones antiguas [6][7]. Uno de los problemas más importantes es el de la formación de “puntos calientes” por diversos motivos, quizá los más importante son el sombreado y la suciedad permanente. En aplicaciones de integración arquitectónica los sombreados parciales pueden dar lugar a problemas de fiabilidad.

Una de las estrategias para limitar los aumentos de temperatura de los módulos fotovoltaicos (pues como ya es sabido el aumento de la misma afecta de forma significativa a la tensión del módulo y en consecuencia a la potencia generada por el mismo) cuando son incorporados para formar parte de la fachada de un edificio, es la de proporcionar un espacio de aire ventilado detrás del panel con el fin de permitir que este se refrigere por convección natural consiguiendo así un incremento de la energía eléctrica producida, [8] [9].

Por otra parte, también es importante el considerar una construcción fotovoltaica integrada (building integrated PV(BIPV)); esto es, considerar el sistema fotovoltaico como parte integral de la edificación, ya que superponiendo los módulos fotovoltaicos sobre la edificación sin que estos formen parte integrada en el edificio y considerando los mismos como un elemento independiente, no será posible obtener un rendimiento óptimo.

Existen diferentes estudios sobre las estrategias que son necesarias para diseñar diferentes sistemas fotovoltaicos que formen parte integral de la edificación como pueden ser los atrios [10], fachadas fotovoltaicas traslúcidas que generen energía eléctrica, pero que a su vez dejen pasar luz al interior del edificio e incluso sean utilizadas como sistemas de refrigeración en verano y calefacción en invierno, aprovechando el sistema de convección natural que se produce en la cámara de aire existente entre los módulos y el muro del edificio. [11] [12]; en este tipo de sistemas se pueden analizar en profundidad parámetros como por ejemplo el clima del lugar donde se utilizan, tipo de sombras a las que se ven sometidos los módulos a lo largo del año, área total eficiente de la fachada, rango óptimo entre la parte opaca y transparente del módulo etc [13]

De esta manera en la segunda parte del trabajo se muestran diferentes ejemplos de aplicaciones en la edificación realizadas por el Grupo Unisolar: una fachada ventilada fotovoltaica, una chimenea solar fotovoltaica, que, aunque todavía no han sido estudiadas en profundidad, los primeros estudios arrojan ya datos prometedores

## **La tecnología de capa fina como elemento en la integración**

Los módulos fotovoltaicos de capa fina son dispositivos de segunda generación que están basados en materiales con alto coeficiente de absorción de la radiación solar, propiedad ésta que permite generar energía eléctrica a partir de energía solar, utilizando una capa de material activo sorprendentemente delgada (unas 200 o 300 veces menor que el de una célula cristalina típica).

Sin duda, de las tecnologías de capa fina la de silicio amorfo a-Si es la más madura; en ella el material activo que se utiliza para la generación de corriente eléctrica, silicio amorfo hidrogenado, a-Si:H, no dispone de un entramado cristalino regular como el silicio cristalino, sino que aparece un desorden geométrico que produce tensiones mecánicas internas y vacantes; en virtud de esta amorficidad es posible depositar este material sobre sustratos baratos e incluso flexibles, siempre que éstos puedan soportar la temperatura de proceso

La técnica de depósito que utilizamos en Grupo Unisolar (G1S), es adecuada para grandes áreas y en un proceso continuo de producción en masa, por otra parte, además de la configuración opaca vidrio-vidrio que habitualmente fabricamos, también podemos fabricar otro tipo de configuraciones de módulo como vidrio-cerámica, transparencias o incluso colores, de esta manera los dispositivos son estéticamente idóneos para ser implantados como elementos arquitectónicos y además pueden ser utilizados no solo como sistema de generación energética si no también como elementos de aislamiento acústico y térmico del edificio.

Los *módulos transparentes* de capa fina son apropiados para tragaluces, vidriado de atrios y vidriado panorámico. En el caso de la tecnología de silicio amorfo a-Si, el aumento de la capacidad de transmisión de

la luz, es decir, de la transparencia, se logra ampliando los cortes por medio del láser . En los paneles transparentes el aislamiento térmico reviste gran importancia. Ello puede lograrse con la aplicación de unidades de doble vidrio o la integración de los paneles fotovoltaicos en una unidad aislante traslúcida. Asimismo, es posible fabricar módulos BIPV totalmente transparentes mediante la sustitución del contacto trasero de aluminio por otro de óxido de zinc transparente. En la **figura 1** se presentan algunos ejemplos de módulos fabricados en G1S para integración.

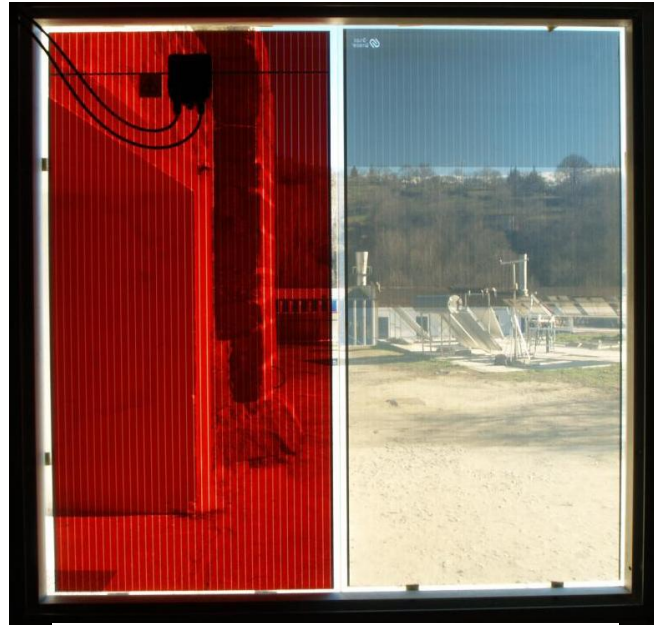


Figura 1 Módulos fotovoltaicos semitransparente

Si pensamos en el módulo fotovoltaico como *elemento de generación activa* formando parte del edificio, éste debe poseer unas características especiales como son: buena respuesta a la temperatura, al sombreado y a condiciones de baja irradiancia. En el laboratorio del G1S se ha estudiado el comportamiento de nuestros módulos frente a estas variables en condiciones de funcionamiento real y se han comparado con el de clásicos módulos de de silicio cristalino, obteniendo datos reveladores.

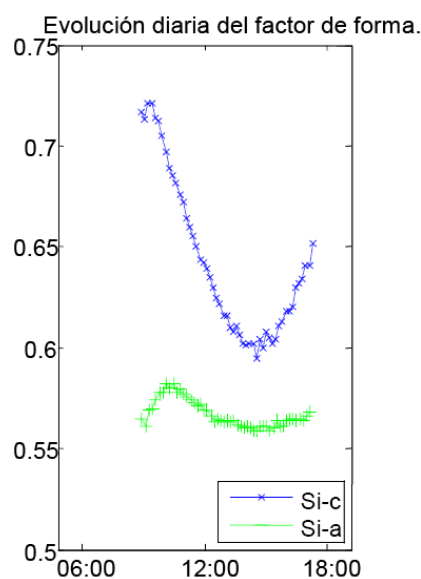


Figura 2. Evolución diaria del Factor de Forma para módulos de silicio amorfo y cristalino.

La evolución del factor de forma frente a la temperatura es un buen indicador de la evolución del rendimiento frente a esta variable. Factor de Forma (o Fill Factor) nos facilita la descripción del punto de máxima potencia de funcionamiento ( $P_{MAX} = I_{SC} V_{OC} FF$ ), obsérvese que el máximo valor que éste puede tomar es  $FF=1$ , de manera que cuánto más próximo sea este valor a la unidad, mayor será la potencia y por tanto el rendimiento que, en cada condición de funcionamiento, está entregando el módulo.

Este valor del FF depende de la temperatura y en menor grado de la irradiancia. Es conocido que el FF de un módulo cristalino en CEM, es superior al de uno de capa fina a-Si-a pero, ¿qué ocurre en otras condiciones de funcionamiento?. En la **figura 2** se muestra la evolución diaria del factor de forma para un módulo cristalino y otro de capa fina a-Si.

Se puede observar que para el módulo de capa fina (en verde) el factor de forma tiene una variación muy pequeña a lo largo del día, manteniendo su valor en un intervalo de 0,56-0,58; sin embargo no es así para el silicio cristalino el cual sufre un decrecimiento significativo en un intervalo comprendido entre 0,59-0,72.

Los motivos de la disminución del factor de forma no es otro que el aumento de la temperatura que adquiere el módulo, al recibir mayor irradiancia aumenta su temperatura disminuyendo el factor de forma y por tanto la potencia entregada por el módulo; este efecto es sin duda mucho más pronunciado cuando el captador es utilizado como elemento arquitectónico: fachada, cubierta etc.

El coeficiente de temperatura de la potencia es de  $-0.17\%/^{\circ}C$  para colectores de silicio amorfo (a-Si) y de  $-0.5\%/^{\circ}C$  para los de silicio cristalino (c-Si). Ello significa que en el caso de los paneles fotovoltaicos a-Si, a una temperatura de funcionamiento de  $55^{\circ}C$  se pierde un 5% de grado de eficiencia al respecto de las condiciones STC, mientras que en el caso de un panel fotovoltaico c-Si, dicha pérdida equivale al 15%. Es decir, en condiciones reales la pérdida de rendimiento de los paneles de silicio amorfo, pese al menor grado de eficiencia medido en condiciones STC, es más reducida que la de los paneles de silicio cristalino, alcanzando parámetros más cercanos a estos últimos

Para estudiar el *comportamiento frente a la irradiancia* se presenta la **figura 3**:

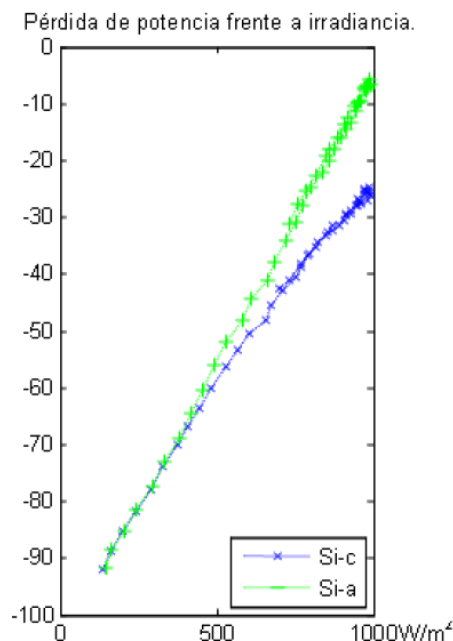


Figura 3. Pérdida de potencia del módulo respecto a la irradiancia.

En ella se muestra la pérdida de potencia con la irradiancia expresado como la diferencia en porcentaje entre la potencia para cada irradiancia respecto a la potencia máxima medida en CEM. Se puede observar que, mientras que en un módulo de capa fina la pérdida de potencia es de aproximadamente el 5%, para el módulo

de silicio cristalino la pérdida de potencia es del 25%. Este resultado es revelador, pues muestra que, aunque la tecnología de silicio amorfo tenga menor eficiencia nominal, en condiciones reales la mantiene mucho mejor que la tecnología de silicio cristalino.

Los paneles de silicio amorfo poseen asimismo otras propiedades favorables. Una de ellas consiste en que la curva I-V más suave, no permite que los puntos calientes se acumulen si se sombrea una célula individual, es decir, el sombreado parcial del panel no causa daños en el mismo, a diferencia de lo que sucede con los paneles cristalinos; por otra parte, en su estructura monolítica las células que configuran el módulo son estrechas y alargadas (15X1245mm), esto hace que el sombreado de la misma sea mucho más difícil.

### **Ejemplos de aplicaciones de integración con módulos de a-Si**

La empresa Grupo Unisolar, se encuentra ubicada cerca de la ciudad de Béjar (40 ° 22'N, 5 ° 45'W, altitud 1015m). Gracias a su ubicación en zona de montaña, se goza de días de altas irradiancias y cielos muy claros además de una variedad de situaciones climáticas, que van desde la nieve y el hielo en invierno a temperaturas muy altas en verano. La fábrica se instaló en una antigua fábrica de textil, en un esfuerzo por preservar el patrimonio arquitectónico local. Con este principio se han diseñado y construido dos prototipos de dispositivos utilizando módulos fotovoltaicos de capa fina: una chimenea solar fotovoltaica y una fachada ventilada. Los elementos en este estudio se colocaron en el edificio que la empresa posee para actividades de I + D, la chimenea solar fotovoltaica que se ubicó mirando hacia el sureste y la fachada ventilada fotovoltaica al suroeste permitiendo así una utilización óptima de los mismos. Se trata de una construcción de principios del XIX, construida con vigas de madera, piedra de granito y arcilla, esto ha supuesto alguna dificultad a la hora de colocar sobre ella los dispositivos, además los elementos fueron diseñados y colocados buscando la máxima integración.

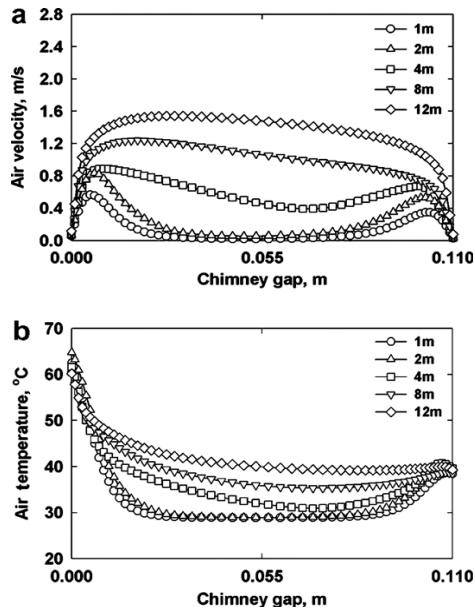
#### ***La fachada ventilada fotovoltaica:***

El objetivo del diseño de esta fachada es el de analizar que parámetros son los que influyen en la eficiencia energética global del edificio, en relación con el total de parámetros fijados en el diseño. Mediante un sistema de monitorización que servirá como dispositivo para la captación y almacenamiento de datos como : irradiancia, temperatura del aire exterior y de la cámara, velocidad del viento en el interior de la misma, gradiente de temperaturas entre entrada y salida del aire etc., se estudiará como responde la instalación a cambios de temperatura, de reducción o aumento del espacio del "gap" de la cámara, de condiciones climáticas, de orientación e inclinación, buscando la relación de compromiso entre la generación de energía eléctrica con los módulos fotovoltaicos y la energía térmica procedente de el efecto chimenea con el fin de encontrar un sistema de generación eficiente

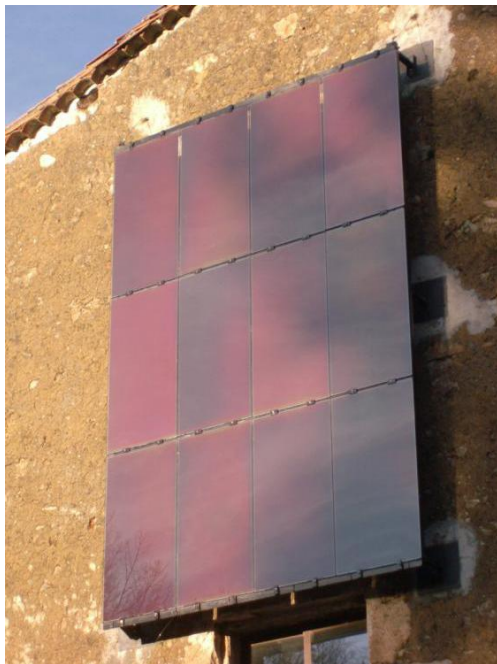
Está compuesta por doce módulos de 45W, resultando en una potencia máxima de 540W, la configuración eléctrica es de seis ramas de dos módulos y cada rama consta de dos módulos; el conjunto está conectado a la red mediante un inversor de baja potencia Soladin Mastervolt 600.

La estructura mecánica que soporta los módulos, está diseñada para poderse variar la distancia entre los módulos y la fachada del edificio con el fin de investigar la geometría óptima que daría un sistema de máxima eficiencia.

Para conseguir el efecto chimenea es necesario tener en cuenta la relación entre el gap y la dimensiones de la fachada (altura principalmente), ya que esta relación maximiza el flujo de aire natural que provoca la refrigeración de los módulos fotovoltaicos. Las dimensiones del sistema son 3,735m de altura, 2,540 m de ancho y las dimensiones de la cámara de aire podrán variar hasta 30 cm. En la **figura 4** se presentan los valores estimados de flujo de aire producido(a) y temperatura (b), obtenidos por simulación



Se trata de identificar los parámetros que consigan un óptimo aprovechamiento de de la energía generada por los módulos minimizando los efectos que la temperatura produce en la bajada del rendimiento, además se estudiará como la variación de estas distancias afecta la climatización del interior del edificio.



(a) Máxima separación



(b) condición de estancamiento

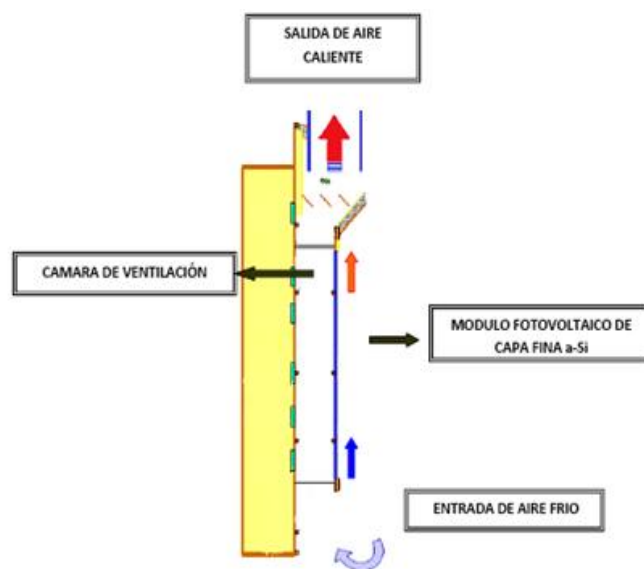
En la fotografía se presenta la fachada ventilada en las dos posiciones extremas, con la máxima separación al muro y en la posición de estancamiento.

Es importante indicar que este montaje se ha diseñado como parte integral del edificio y por tanto de su envolvente, con el propósito de evaluar el efecto de las estrategias de ventilación en el sistema, estudiando el fenómeno ventilación natural de la fachada ventilada, que al mismo tiempo tiene por objetivo proteger el cerramiento interior del edificio de las acciones climáticas, como lluvia, nieve, sol, viento, etc., obteniendo finalmente la distancia óptima de separación entre cerramiento exterior e interior, donde se encuentre el máximo aprovechamiento de la energía solar en su transformación en energía solar fotovoltaica y energía solar térmica.

## La chimenea solar fotovoltaica:

Uso de la energía fotovoltaica en estos elementos permite producir electricidad y aprovechando la energía que el módulo no transforma en electricidad, generar un flujo de aire que pueden ser utilizados para la calefacción en invierno y refrescarse en verano además, esta corriente de aire posee la función adicional de refrigeración del módulo aumentado de esta forma la eficiencia de la conversión fotovoltaica y de esta manera obtener una mayor energía del Sol. Por otra parte la cámara de aire entre los módulos y la pared también proporciona un aislamiento acústico y térmico.

Se trata de un prototipo de dispositivo fotovoltaico integrable en las fachadas de los edificios, compuesto por un conjunto vertical de 6 paneles fotovoltaicos de capa fina UNISOL PV, cerrados por la parte trasera con una cámara de aire hermética y aislada; de forma que aprovecha, además de la propia transformación fotovoltaica, la conversión térmica, creando un tiro natural de aire (efecto chimenea), en la parte trasera del panel que lo refrigera, aumentando la eficiencia del mismo, logrando además un incremento de temperatura del aire circulante. El sistema responde al funcionamiento presentado en la [figura 5](#).



Cámara central, de 0.3m<sup>3</sup> de capacidad, está formada por placas de aislamiento térmico y módulos fotovoltaicos, en la parte superior existe una cámara de 0.03m<sup>3</sup> formada por placas de aislamiento térmico y lamina de poli carbonato transparente, en el interior de esta cámara existe una lamina absorbedor para favorecer el tiro de la chimenea.

El aire frío que entra por la parte inferior, captado del exterior o del espacio interior inferior, es calentado por convección en el interior de la cámara; el calentamiento disminuye sensiblemente la densidad de forma sucesiva a lo largo de la cámara, produciendo un efecto de succión y de presión dinámica sobre el interior del recinto que se quiere climatizar, en su caso, o se expulsa al exterior. En suma, el conjunto actúa como un captador térmico y fotovoltaico de aire. La velocidad del aire en el interior de la chimenea, la transferencia de calor al interior del habitáculo y la forma en la que los módulos UNISOL PV se refrigeran está íntimamente relacionado con la geometría de la cámara: altura y anchura de la misma.

En los ensayos se han analizado las diferentes configuraciones de la chimenea y se ha logrado optimizar las dimensiones de la misma hasta resolver el compromiso entre la refrigeración del módulo fotovoltaico y el calor transferido al habitáculo. Asimismo, se señala que los resultados previstos por el modelo concuerdan con los obtenidos en el prototipo ensayado, tendiendo un valor crítico óptimo en la relación esbeltez (altura/anchura) y la separación de los módulos y la pared. Con el dispositivo se logran rendimientos de captación por encima del 40%, en los momentos de mayor insolación. Una vez demostrada la funcionalidad y prestaciones del dispositivo, G1S está diseñando las adaptaciones necesarias para su aplicación en las fachadas de los

edificios de forma normalizada e integrable, de forma que se ofrezca al mercado como un producto estandarizado (UNISOL CSTF FACHADA @pending).



Chimenea solar fotovoltaica

En la fotografías se presenta dos vistas de la chimenea solar fotovoltaica desarrollada en el edificio de I+D del.G1S.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Measurement precautions for high-resistivity silicon solar cells. King; D.L. Gee; J.M. Hansen; B.R. *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1988., 1988 Page(s):555 - 559 vol.1
- [2] Do multi-flash solar simulators measure the wrong fill factor? Ossenbrink, H.A.; Zaaiman, W.; Bishop, J.; *Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 10-14 May 1993 Page(s):1194 – 1196
- [3] *Electricidad Solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. E. Lorenzo. Progensa 1994.
- [4] Low Light Performance of Mono-Crystalline Silicon Solar Cells, Bunea, G.E.; Wilson, K.E.; Meydbray, Y.; Campbell, M.P.; De Ceuster, D.M.; *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, Volume 2, May 2006 Page(s):1312 - 1314
- [5] The Advantages of Amorphous Silicon Photovoltaic Modules in Grid-Tied Systems, Jansen et al, *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, May 2006, Volume: 2, page(s): 2363-2366
- [6] An Evaluation of 27+ Years Old Photovoltaic Modules Operated in a Hot-Desert Climatic Condition, Yingtang et al, *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, May 2006, Volume: 2, page(s): 2145-2147
- [7] The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure. Dunlop y Halton, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 14 (2005) Issue 1, Pages 53 - 64
- [8] Thermal regulation of photovoltaic cladding. Brinkworth, B.J.,Cross, B.M.,Marshall,R.H.,Yang,H., 1997.*Solar Energy* 61, 169-178
- [9] Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics. Guohui Gan *Solar Energy* 83 (2009) 1253–1273. [33] CFD modelling of air flow and thermal performance of an atrium integrated with photovoltaics.Gan,G. Riffat, S.B.,2004.*Building and Environment* 39, 735-748
- [10] CFD modelling of air flow and thermal performance of an atrium integrated with photovoltaics.Gan,G. Riffat, S.B.,2004.*Building and Environment* 39, 735-748
- [11]Optimization of the performance of double-façades with integrated photovoltaic panels and motorized blinds. Re´mi Charron, Andreas K. Athienitis.*Solar Energy* 80 (2006) 482–491
- [12]Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade. Geun Young Yun , Mike McEvoy, Koen Steemers. *Solar Energy* 81 (2007) 383–394
- [13] Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. Miyazaki, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T., 2005 *Renewable Energy* 30, 281–304.