

Los módulos fotovoltaicos en la edificación: posibilidades y directrices de diseño

Nuria Martín Chivelet

Photovoltaic modules in the built environment: design possibilities and guidelines

Foto: Pictelia



RESUMEN

Con el fin de conseguir una exitosa integración arquitectónica de los módulos fotovoltaicos en los edificios, es imprescindible abordar el tema desde una perspectiva completa que incluya no solo los aspectos relacionados con la ingeniería de estos sistemas, sino también las exigencias arquitectónicas. Ayuda saber que los módulos fotovoltaicos pueden convertirse en versátiles elementos constructivos de la envolvente de los edificios, si se adapta su diseño con tal fin. En efecto, las propiedades físicas y constructivas de los módulos pueden variarse hasta cierto grado: transparencia, aislamiento térmico, color, forma y estructura son algunos ejemplos. Al mismo tiempo, es importante conocer en qué medida dichos cambios afectan a la producción eléctrica del módulo, de forma que al tomar la decisión final se consiga un equilibrio entre producción eléctrica y diseño arquitectónico.

Pero en la producción final del sistema fotovoltaico integrado en un edificio intervienen otros factores de diseño, asociados no solo al generador, sino también a otros elementos de la instalación. De todos ellos el principal criterio que hay que tener en cuenta es la posición del módulo en la envolvente del edificio, que va a determinar la energía solar que es capaz de captar. Sin embargo, se demuestra que existe un amplio margen de inclinaciones y orientaciones en las que las pérdidas respecto a la posición óptima son bajas.

Encargado: 13 de septiembre de 2011
Recibido: 14 de octubre de 2011
Aceptado: 19 de octubre de 2011

Palabras clave

Energía fotovoltaica, arquitectura, eficiencia energética, generación eléctrica

Introducción a la fotovoltaica en la edificación

La integración de fotovoltaica en la edificación es ya una realidad, y se prevé que tenga un desarrollo cada vez mayor. Es una tecnología madura con una larga experiencia en sistemas tanto aislados como conectados a la red eléctrica y presenta la gran ventaja de ser fácilmente integrable en la arquitectura. Frente a las instalaciones fotovoltaicas sobre el terreno, las integradas en edificios contribuyen a preservar el paisaje natural y aportan un valor añadido muy positivo a las edificaciones que las albergan. Los módulos fotovoltaicos sustituyen tejas y otros materiales de fachada, con amplias posibilidades de diseños y acabados.

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos pueden adaptar las propiedades físicas y constructivas de estos elementos a las exigencias arquitectónicas, a la vez que se cuantifican los efectos que estos cambios causan en el rendimiento de los

módulos. Los condicionantes arquitectónicos pueden afectar también a la producción energética del sistema fotovoltaico en su conjunto. La orientación y la inclinación de los módulos en los edificios no siempre son las óptimas, es decir, las que generan una mayor energía eléctrica al cabo de un año, en el caso de los sistemas conectados a red, o las que mejor dimensionan un sistema autónomo. Además, hay una mayor probabilidad de sombreado, y la ventilación de los módulos por su cara posterior no siempre está bien resuelta, lo que afecta a su temperatura de trabajo y a su rendimiento.

El conocimiento de las posibilidades de diseño de los módulos fotovoltaicos, y de las principales directrices de diseño y operación de estos sistemas integrados en los edificios, permite que la integración de sistemas fotovoltaicos combine de forma adecuada la generación eléctrica y la función arquitectónica de dichos módulos.

ABSTRACT

With the purpose of obtaining a successful architectural integration of the photovoltaic modules in the building environment, it is essential to approach the subject from a complete perspective that includes not only the aspects related to the engineering of these systems, but also the architectural exigencies. In this task it is useful to know that the photovoltaic modules can become versatile constructive elements of the building envelope, if their designs are adapted to such aim. In effect, physical and constructive properties of the modules can be varied up to certain degree: transparency, heat insulation, colour, form and structure are some examples of this. At the same time, it is important to know to what extent these changes affect the electrical production of the module, in order to make the best decision that combines electrical production and architectural design.

But there are other factors that influence the final production of the photovoltaic system integrated into a building, related not only to the generator, but also to other elements of the installation. Amongst all of them the main criterion to be considered is the position of the PV module in the building envelope, because this will be determinant in the solar energy that it is able to capture. Nevertheless, it is demonstrated that an ample margin of inclinations and orientations exists in which losses with respect to the optimal position are low.

Commissioned: September 13, 2011
Received: October 14, 2011
Accepted: October 19, 2011

Keywords

Photovoltaic energy, architecture, energy efficiency, electric generation

Breve revisión de los sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico integrado en un edificio consta básicamente de un generador fotovoltaico, un sistema de acondicionamiento de la potencia generada y las protecciones pertinentes. El generador está constituido por una asociación de módulos fotovoltaicos que consiguen unos valores de potencia, tensión e intensidad de corriente adecuados a las necesidades de cada instalación. A la potencia máxima que es capaz de entregar un módulo fotovoltaico en condiciones estándar (irradiación solar de 1.000 vatios por metro cuadrado, temperatura del módulo de 25 °C y espectro solar típico de un día despejado AM15G) se le denomina *potencia pico*. El rendimiento de un módulo es la potencia máxima que puede generar por unidad de superficie y unidad de irradiación recibida. Se calcula dividiendo el valor de su *potencia pico* en W entre su superficie en m² y entre 1.000 W/m.

Por su parte, el inversor es un dispositivo electrónico de potencia que transforma la corriente continua proveniente del generador en corriente alterna. En general, la instalación fotovoltaica estará diseñada para el consumo directo o para inyectar la energía generada en la red eléctrica local. En el primer caso, es necesario un medio de acumulación de la energía eléctrica producida, para lo que habitualmente se utilizan baterías de tipo estacionario. Además, puede ser necesario incluir en el sistema un ondulator o inversor autónomo, que transforma la corriente continua de la batería en alterna. En cambio, en un sistema fotovoltaico conectado a red no es necesario el uso de acumuladores y lo habitual es que la energía eléctrica generada sea inyectada en su totalidad a la red eléctrica local, tras ser transformada en una señal en corriente alterna por un ondulator de conexión a red. Deben existir dos contadores de energía: uno para el registro del consumo de electricidad de la red y otro para el de cesión de la energía fotovoltaica producida.

Las tecnologías fotovoltaicas y el rendimiento

En la actualidad, la mayor parte de los módulos fotovoltaicos están fabricados con células de silicio, casi el 90% con silicio cristalino. Según sea su estructura, este material semiconductor puede ser monocristalino, multicristalino, microcristalino o amorfo. La tecnología predominante es la de silicio multicristalino con el 53% de la producción mundial total (Hering, 2011), seguida por la de silicio monocristalino, con el 33%. Existen otros materiales semiconductores con propiedades también adecuadas para la fabricación de células y módulos fotovoltaicos, como el arseniuro de galio, utilizado para células de concentración, o el telururo de cadmio y el diseleniuro de cobre e indio (CIS), materiales policristalinos con los que se fabrican módulos comerciales de lámina delgada alternativa a los de silicio amorfo.

La tabla 1 muestra rendimientos típicos de módulos comerciales actuales de distintas tecnologías. En el mercado fotovoltaico actual podemos encontrar módulos que no alcanzan estos valores típicos y otros que, por el contrario, los superan. Como ejemplos destacan los módulos cuyas células tienen todos los contactos en la cara posterior (*back contact cell*), como los fabricados por SunPower, que consiguen más del 20% de rendimiento. También los módulos de

Tecnología	Rendimiento (%)	Superficie de 1 kW pico (m ²)
Silicio monocristalino	13-15	8-6,7
Silicio multicristalino	11-14	9-7
CIS	10-11	10-9
Telururo de cadmio	9-11	11-9
Silicio amorfo	5-7	20-14

Tabla 1. Rendimientos típicos de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías y superficie media ocupada por 1 kW pico de cada tecnología.

heterounión, desarrollados inicialmente por *Sanyo*, consiguen valores de rendimiento que superan el 17%.

Mientras que los ingenieros fotovoltaicos hablan de kilovatios pico de una instalación, los arquitectos lo hacen en términos de metros cuadrados de superficie de módulos fotovoltaicos (véase la tabla 1). Ambos conceptos nos proporcionan la misma información, siempre que se conozca el valor del rendimiento de los módulos en cuestión. Por ejemplo, 10 metros cuadrados de módulos con un rendimiento del 15% equivalen a una potencia pico instalada de 1,5 kilovatios. En general, la superficie necesaria para obtener una potencia pico determinada varía en función del rendimiento de los módulos. A mayor rendimiento, menor superficie requerida.

Diseño del módulo FV para integración arquitectónica

El diseño de un módulo fotovoltaico para integración arquitectónica viene condicionado por dos tipos de exigencias. Por un lado, los criterios de generación fotovoltaica, que buscan la máxima producción eléctrica, y, por otro, los criterios arquitectónicos, que definen su función constructiva. Unos y otros pueden compaginarse en muchos casos y conseguir muy buenos resultados, tanto energéticos como funcionales y estéticos. El tipo de aplicación y las características de cada tecnología abren un amplio abanico de posibilidades, como se verá a continuación.

Características como la estructura del módulo, su tamaño y forma, el número y disposición de las células, el aspecto y el color pueden variarse dentro de unos límites, sin olvidar que algunas de estas decisiones afectan al rendimiento eléctrico del módulo. Además, hay que tener en cuenta que, a su vez, el diseño afecta al comportamiento energético del edificio, fundamentalmente, dos de sus características principales: su transparencia y su coeficiente de transmisión térmica.

Estructura constructiva

Un módulo convencional de silicio cristalino está constituido por un conjunto de células fotovoltaicas conectadas en serie, encapsuladas en un material polímero transparente y aislante que comúnmente es el etil-vinil-acetato o EVA, y protegidas por una cubierta frontal de vidrio y otra posterior de tipo plástico, que suele incluir capas de fluoruro de polivinilo. Los bordes del laminado obtenido se protegen con una junta de silicona y un marco metálico que suele ser de aluminio. Por último, se fija la caja de conexiones a la parte posterior del módulo, la cual llevará incluidos los diodos de paso pertinentes.

Aunque el modo de fabricación de los módulos de lámina delgada difiere mucho del de los basados en obleas de silicio, su estructura final estándar es similar, resultando los laminados totalmente equivalentes. Bien es verdad que materiales como el silicio amorfo presentan la ventaja de poderse depositar sobre sustratos de muy diverso tipo, lo que les confiere una versatilidad mayor.

Pero la estructura constructiva convencional del laminado fotovoltaico puede modificarse con el fin de adaptar el diseño del módulo a las exigencias arquitectónicas. Los materiales utilizados habitualmente en la fabricación de los módulos convencionales se pueden sustituir por otros que les proporcionen mejores prestaciones. Un ejemplo es el reemplazo del encapsulante que habitualmente es EVA por otros materiales como el polivinil butiral (PVB), utilizado desde hace décadas para laminar vidrios de seguridad. Esta opción es muy frecuente en la fabricación de módulos con estructura de doble vidrio para integración en fachadas y cubiertas acristaladas.

También la cubierta posterior, que suele ser de fluoruro de polivinilo, es sustituible por un vidrio. Esta configuración del laminado fotovoltaico como estructura de doble vidrio es la más utilizada para la integración en edificios, por su mayor resistencia mecánica y su transparencia. El

vidrio exterior está templado para resistir las cargas térmicas y también es muy transparente. Su espesor habitualmente es de unos 3 o 4 mm y puede estar texturado o no. Además, puede llevar una capa antirreflejante, por lo general creada mediante ataque químico, proceso que altera ligeramente el índice de refracción de su superficie y consigue aumentar su transmitancia en alrededor del 5%. El espesor del vidrio de la cara posterior se determina en función de las exigencias de resistencia mecánica en cada caso. El espesor total de este laminado configurado por los dos vidrios y las células embebidas en el encapsulante entre ellos, oscila entre 10 y 12 mm (Martín y Fernández, 2007).

Alternativamente, los materiales de soporte del laminado fotovoltaico pueden ser de tipo cerámico para la fabricación de tejas fotovoltaicas, o flexibles, tanto metálicos como de tipo plástico o incluso textil para tejas ligeras, toldos y marquesinas. La cara frontal suele ser un polímero transparente y resistente, y la posterior un material similar o una fina lámina de acero inoxidable o de aluminio.

Transparencia

La posibilidad de que los módulos fotovoltaicos puedan transmitir cierta cantidad de luz al interior de los edificios abre muchas posibilidades de integración en la arquitectura. Esto se consigue si la cubierta posterior del módulo está fabricada con un material transparente, normalmente vidrio (figura 1). En los módulos de silicio cristalino se consigue aumentar el grado de transparencia mediante la reducción del número de células, de forma que estas queden más separadas. Sin embargo, esto origina la consiguiente reducción de la potencia y rendimiento del módulo. Si se buscan grados de transparencia elevados, puede ser preferible combinar módulos con un número razonable de células con laminados transparentes de doble vidrio.

Este es el caso de la fachada de la figura 1. En ella los módulos de silicio cristalino se alternan con ventanales transparentes. Los módulos, además de generar electricidad, realizan la función de control solar. Aunque su estructura es de doble vidrio, los huecos que quedan entre las células son pequeños y por tanto el grado de transparencia es bajo.

También con los módulos de lámina delgada pueden conseguirse superficies semitransparentes, en este caso de aspecto casi homogéneo, si se aumenta la distancia entre células contiguas (figura 2). Aunque se han fabricado módulos de silicio amorfo con una transparencia de hasta el



Figura 1. Fachada fotovoltaica con módulos con estructura de doble vidrio. Las células ejercen un cierto sombreado de la cara sur del edificio y filtran parte de luz al interior. Sede social de Acciona Solar en Sarriguren, Navarra.



Figura 2. Detalle del interior de un elemento de fachada construido con módulos semitransparentes de silicio amorfo. Centro comercial La Albufera, Madrid.

50%, en general se recomienda que la transparencia no supere el 15-20%. También se han fabricado módulos de CIS en los que el material activo se alterna con puntos o con bandas transparentes. El resultado son módulos con un cierto grado de transparencia que permiten una visión tamizada a través de ellos.

Aislamiento térmico

Si el módulo fotovoltaico forma parte del cerramiento del edificio puede interesar

que presente una baja transmisión térmica, ya que ello contribuye a disminuir el consumo energético del edificio. En estos casos, con el fin de mejorar la capacidad de aislamiento del módulo, puede recurrirse a la configuración de estructuras de doble acristalamiento con cámara de aire, con un espesor optimizado para minimizar la transmisión térmica. También puede utilizarse en la cara posterior de la estructura un vidrio coloreado o con una textura determinada, para reducir o

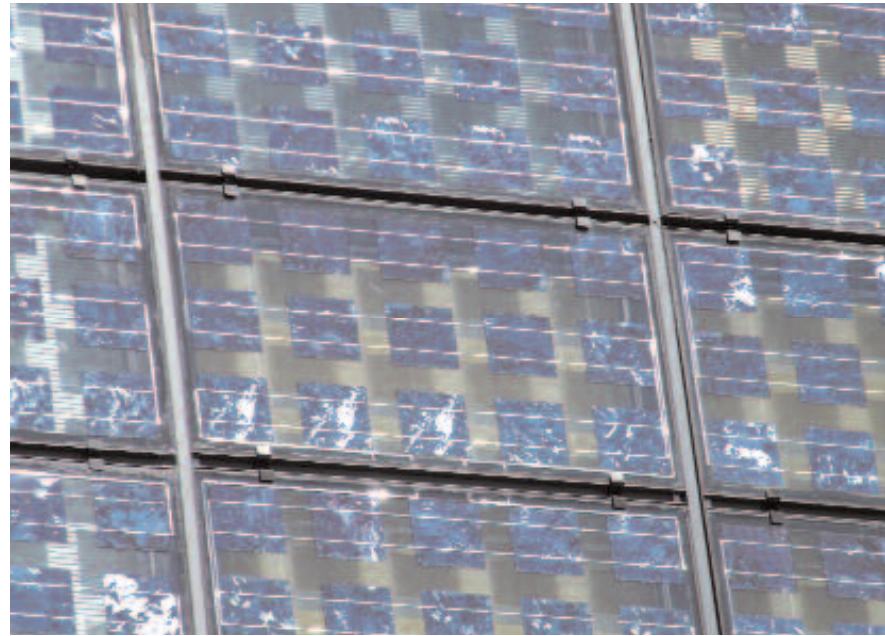


Figura 3. Muro cortina con módulos semitransparentes de silicio cristalino. Centro de Arte de Alcobendas, Madrid.

matizar la transmitancia de luz a través de los huecos entre células.

Forma y flexibilidad

Habitualmente, los módulos presentan una estructura rígida, con forma rectangular o cuadrada, de entre 0,5 y 1,5 m². Sin embargo, pueden tener otros tamaños, ya que las nuevas laminadoras permiten fabricar módulos de mayor superficie. También existen módulos triangulares o en forma hexagonal y pueden ser curvos, bien rígidos, bien flexibles. La versatilidad del silicio amorfo permite fabricar con facilidad módulos flexibles y ligeros depositando el material sobre distintos tipos de sustratos. Pero también se han desarrollado recientemente prototipos de módulos de CIS o de silicio monocristalino flexibles.

En cuanto a la forma de las células, esta varía en función de la tecnología fotovoltaica. Las células de silicio monocristalino están fabricadas con obleas circulares. Sin embargo, se tiende a cortarlas con una forma que facilite su *empaquetamiento* en los módulos. El resultado son células de algo más de 10 cm de lado con las esquinas redondeadas. Recientemente han aparecido en el mercado módulos de silicio monocristalino con células de mayor tamaño y totalmente cuadradas que buscan aumentar el rendimiento de este tipo de módulos. La misma forma tienen las células de silicio multicristalino, que provienen del corte de bloques con sección cuadrada, con longitudes de lado que oscilan entre 10 y 15 cm. Por otra parte, las células

cristalinas fabricadas con silicio crecido directamente en cinta pueden ser rectangulares de longitudes diversas.

Color

El color azulado que presentan las células de silicio cristalino puede modificarse mediante la variación del espesor de su capa antirreflectante. Esta capa está fabricada con un material cuyo índice de refracción tiene un valor próximo a la raíz cuadrada del producto de los índices de refracción del silicio y del material de la

cubierta, normalmente vidrio. El espesor de esta capa está optimizado para que la reflexión en la longitud de onda o color de interés sea mínima. Pequeñas variaciones del espesor de esa capa pueden producir cambios significativos en el rendimiento de la célula fotovoltaica, al reflejarse longitudes de onda útiles para la conversión fotovoltaica. Por ello, conviene cerciorarse del rendimiento de los módulos de colores antes de tomar una decisión.

Menos consecuencias sobre el rendimiento del módulo conlleva cambiar el color de la cubierta posterior. Pueden buscarse colores similares o diferentes a los de las células y a la vez variar el grado de transparencia. Los módulos de silicio amorfo pueden presentar distintos tonos y, si son semitransparentes y se utilizan vidrios coloreados en su cubierta posterior o en los vidrios del doble acristalamiento, las posibilidades son múltiples y los resultados muy vistosos, tanto desde fuera como desde dentro del edificio. En los módulos de CIS se pueden incluir en su superficie imprimaciones de diferente color, conformando distintos tipos de dibujos.

Sistemas de montaje

Algunos fabricantes ofertan sistemas de montaje casi universales, válidos para la mayoría de módulos y aplicaciones. Es conveniente que los sistemas de fijación de los módulos a las estructuras sean fáciles y rápidos de montar. En los cerramientos fotovoltaicos las estructuras

Figura 4. Fachada fotovoltaica con células de distintas tonalidades. Edificio prototipo para Solar Decathlon de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Stuttgart.



deben garantizar un comportamiento acorde a la aplicación que desempeñan, y cumplir con las exigencias de la construcción. Por otro lado, para cubiertas planas existe una gran variedad de estructuras de soporte y fijación. La mayoría están fabricadas en aluminio, aunque también las hay de acero y materiales plásticos. Algunas permiten modificar la posición del módulo, dentro de unos márgenes de ángulo de inclinación y de azimut.

Directrices de diseño y operación

Con el fin de conseguir un buen resultado, no solo desde el punto de vista arquitectónico sino también desde el de la generación eléctrica, es importante revisar los principales factores que afectan a la productividad de un generador fotovoltaico integrado en un edificio.

La irradiación solar recibida

Antes de analizar los distintos factores de pérdidas, es importante tener siempre presente que la energía eléctrica que genera un módulo es proporcional a la energía luminosa que recibe y que, por ello, es crucial dónde se ubica el módulo en el edificio. En lo posible se deberían buscar aquellas superficies de la envolvente que reciben la mayor cantidad de irradiación solar anual y rechazar las que implican pérdidas de más del 40% respecto del posicionamiento óptimo. Es importante tanto la orientación del

módulo como su inclinación, aunque para inclinaciones bajas la orientación no es tan crítica. La situación óptima se consigue con la orientación sur y una inclinación con valor unos 10 grados por debajo de la latitud.

El Código Técnico de la Edificación incluye un método de cálculo del factor de irradiación de las distintas superficies de la envolvente de un edificio, a partir de un diagrama para una latitud de 41°. La corrección para otras latitudes se realiza mediante una fórmula que incluye la latitud, el ángulo de inclinación y el azimut de la superficie. Para mayor precisión se pueden calcular diagramas de irradiación locales, a partir de datos de años tipo de cada lugar (figura 5). Unos y otros son herramientas útiles para el diseño de los sistemas fotovoltaicos en edificios.

Pérdidas por temperatura

Por otro lado, y en un orden menor de importancia, hay que tener en cuenta la influencia que ejercen diferentes parámetros en el rendimiento del módulo y, por tanto, en el del sistema. Un ejemplo es la temperatura de operación del módulo, cuyo incremento disminuye la potencia en mayor o menor medida, según la tecnología. Como término medio, un módulo fotovoltaico de silicio cristalino o de CIS pierde el 4% de rendimiento por cada 10 °C que aumente su temperatura. En el caso de los módulos de silicio amorfo o de telururo de cadmio,

este factor se reduce a la mitad, es decir, el 2%. Por tanto, es conveniente garantizar una buena ventilación de la cara posterior de los módulos, especialmente si se trata de silicio cristalino o CIS.

Pérdidas por sombreado

Un aspecto importante que hay que tener en cuenta en la integración de módulos fotovoltaicos en edificios es el estudio de posibles sombras. Debe evitarse en lo posible situar los módulos en zonas en las que objetos cercanos puedan proyectar sombras sobre su superficie en algún momento del año. Casetones, chimeneas, edificios colindantes y árboles cercanos son ejemplos de elementos cuyas sombras hay que evitar.

Las consecuencias del sombreado parcial del generador fotovoltaico tienen, en primer lugar, un efecto negativo sobre la energía eléctrica generada, tanto por la reducción de la cantidad de irradiación que recibe el módulo, como por la asociación eléctrica que existe entre células y entre módulos. Valga el ejemplo de una célula sombreada: la reducción de su corriente limita igualmente la que atraviesa aquellas células con las que está conectada en serie. De forma análoga ocurre con un módulo total o parcialmente sombreado y aquellos con los que está asociado. Para reducir estas pérdidas, la mayoría de los módulos lleva incluidos unos diodos de paso asociados en paralelo con grupos de células –suelen ser de 18 unidades–. Si se sombrea una célula, la corriente circula por el diodo y continúa por el resto de las células sin sombreado. Existen diversos programas de cálculo para estimar el efecto de las sombras de objetos circundantes en el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos (Mermoud et al, 2009).

Pero, además, las zonas sombreadas de un módulo pueden llegarse a calentar decenas de grados por encima de la temperatura media del resto de células sin sombreado, ya que en ellas las células pueden polarizarse a la inversa y convertirse en disipadores de la energía que genera el resto del módulo. Estas altas temperaturas pueden dañar el encapsulante o la propia célula de forma irreversible (efecto de punto caliente) (Martín et al, 2008). Si no es posible evitar las sombras en su totalidad, hay que procurar que sean de carácter temporal y asegurarse de utilizar módulos con diodos de paso.

Algo que también hay que controlar en el diseño de la fotovoltaica en edificios es que ni el marco del módulo ni el sistema de sujeción proyecten som-

Figura 5. Diagrama de pérdidas anuales de irradiación de un módulo fotovoltaico, en función del ángulo azimutal y la inclinación, para Madrid (40,45° N) (Martín y Fernández, 2007).

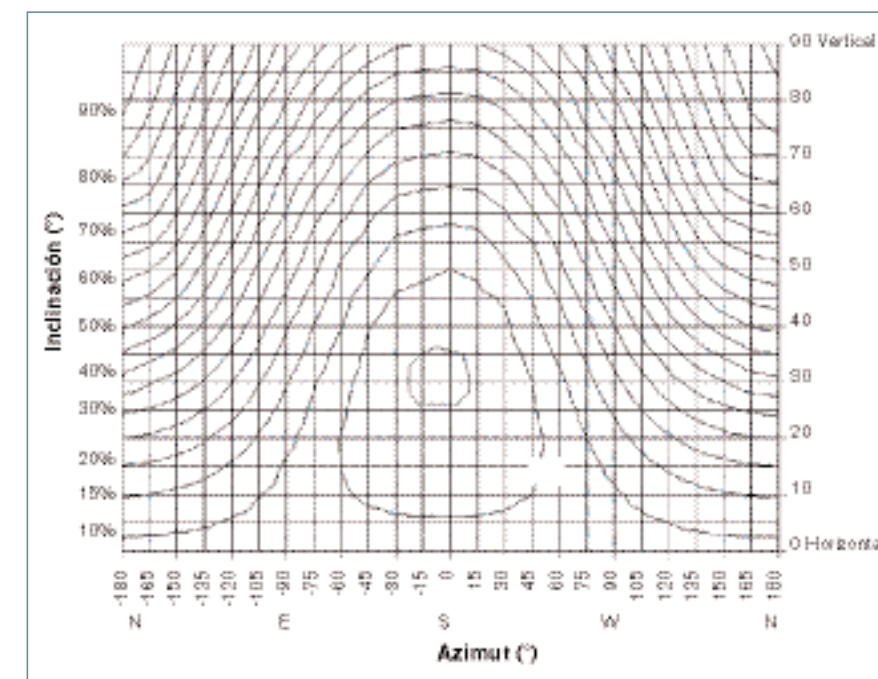




Figura 6. Fachada sur del centro de arte de Alcobendas, Madrid. La geometría de la fachada arroja sombras sobre parte de los módulos fotovoltaicos.

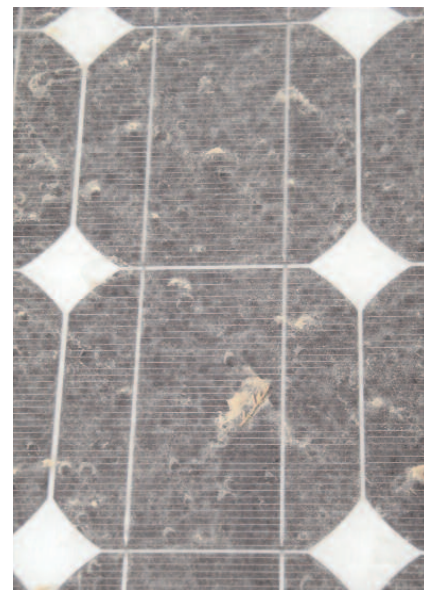
bras sobre las células. Conviene dejar un margen perimetral entre las células y el marco con la anchura suficiente para evitar este problema, o si se da el caso, pueden pintarse o serigrafarse células falsas en las zonas que van a recibir las sombras.

Pérdidas angulares y por suciedad

La suciedad superficial puede cobrar un papel significativo en las pérdidas de generación del módulo fotovoltaico. Conviene insistir en la inconveniencia de posicionar horizontalmente los módulos fotovoltaicos, ya que ello incrementa de forma notable la acumulación de suciedad superficial. Incluso en aquellos lugares en los que las lluvias son frecuentes, una baja inclinación puede impedir la autolimpieza de las superficies. Una capa de polvo sobre la cubierta frontal del módulo reduce la transmisión de radiación a su interior a incidencia normal, pero, a su vez, incrementa las pérdidas angulares por reflexión. Estas pérdidas se definen relativas a la situación de incidencia normal. Se ha constatado que la variable

que más afecta a estas pérdidas anuales es la diferencia entre la latitud y el ángulo de inclinación del módulo, aunque existen influencias de segundo

Figura 7. Superficie de un módulo en posición horizontal. La suciedad retenida se traduce en pérdidas de rendimiento eléctrico.



orden que son función de las características climáticas propias del lugar (Martín y Ruiz, 2005).

Pérdidas en el cableado

Para reducir las pérdidas que se producen en el cableado conviene acercar lo máximo posible los inversores a los módulos fotovoltaicos, de manera que las distancias que recorre la corriente en continua sean cortas. En un edificio esto puede significar habilitar para los equipos de acondicionamiento de potencia una sala especial que se encuentre próxima al generador fotovoltaico. Si los módulos están en la cubierta y esta es transitable puede interesar construir una pequeña caseta para alojar los equipos.

En todo caso, la sección de los cables debe ser la adecuada a la corriente máxima que por ellos va a transitar, como en cualquier otra instalación eléctrica.

Pérdidas por desacople

Las pérdidas por desacople o dispersión de parámetros son las que se ocasionan por conectar entre sí módulos con diferentes características eléctricas. Al aso-

ciar varios módulos en serie, la intensidad de corriente final resulta igual a la menor de las que suministra cada uno individualmente. Si se asocian en paralelo, el parámetro afectado es la tensión entregada por el conjunto. Estas pérdidas son en gran medida evitables: como en cualquier otro sistema fotovoltaico conviene, antes de instalar los módulos, conocer sus características eléctricas para clasificarlos y agruparlos. El parámetro que suele considerarse es la corriente de cada módulo en el punto de máxima potencia.

Además, en integración en edificios, hay que tener en cuenta las condiciones concretas de operación que van a tener los módulos: diferente inclinación u orientación, sombreado o temperatura. Es una buena medida dividir el sistema cuando sea necesario y asociar a distintos onduladores cada uno de los subsistemas.

Pérdidas del ondulator

Las principales características que definen el comportamiento de un ondulator son su rendimiento, la calidad de la onda que genera y su capacidad para seguir el punto de máxima potencia del generador. El ondulator, en lo que a su potencia nominal se refiere, se elegirá en función de la potencia instalada del generador, la irradiación disponible y la orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos (Nofuentes y Almonacid, 1999). En este aspecto es frecuente que en sistemas integrados en edificios, se utilicen inversores con potencias nominales claramente inferiores al valor de la potencia instalada del generador, con el fin de aumentar el rendimiento del inversor y, por tanto, del sistema.

Mantenimiento

Al igual que en cualquier otra aplicación fotovoltaica, en las instalaciones en edificios también es necesario llevar a cabo un correcto mantenimiento para asegurar su buen funcionamiento (Martín, 2010). En general, habrá que supervisar los módulos, las estructuras, las cajas de conexiones y los sistemas de conversión y transformación. Al estar la instalación en un edificio, debe hacerse especial hincapié en todo aquello que afecta a la seguridad del sistema y las personas. Deben comprobarse periódicamente, por un lado, la resistencia de aislamiento, que debe ser lo mayor posible y encontrarse dentro de las recomendaciones y, por otro, la resistencia del electrodo de tierra, que será lo más baja posible (la Norma Tecnológica de la Edificación

recomienda un valor máximo de 37 Ohm para sistemas sin pararrayos).

La limpieza periódica de los módulos puede ser necesaria si el edificio está en una zona expuesta a contaminación y las lluvias no son frecuentes. Para ello, debe preverse la accesibilidad a los paneles. En el caso de las fachadas fotovoltaicas, pueden utilizarse los métodos convencionales para la limpieza y mantenimiento de las fachadas acristaladas.

Aplicaciones arquitectónicas de la integración fotovoltaica

La integración en cubiertas ciegas

Las cubiertas ofrecen el mayor potencial de integración fotovoltaica de los edificios en los entornos urbanos, en términos de producción energética, por ser las superficies mejor situadas y de mayor extensión, libres de obstáculos y restricciones. Dependiendo del tipo de edificación, la integración se puede realizar en las cubiertas inclinadas o en las horizontales, sean o no transitables.

En las cubiertas inclinadas ya construidas suele optarse por la superposición sobre los materiales existentes. Conviene que los módulos se sitúen, en lo posible, paralelos a alguna de las aguas de la cubierta. Existen, sin embargo, estructuras de sujeción de baja altura que permiten reorientar ligeramente los módulos respecto del plano de la cubierta. En naves de tipo industrial puede resultar interesante utilizar módulos de silicio amorfo, por su bajo peso y facilidad de montaje.

Sin embargo, la verdadera integración consiste en sustituir los elementos convencionales de los tejados por módulos fotovoltaicos. Sin duda, esto es lo que se debe hacer cuando se proyecta un edificio con una cubierta fotovoltaica. Los módulos pueden tener diversos tipos de estructuras, desde simples laminados, hasta paneles de cerramiento tipo sándwich o con forma y características de tejas.

En las cubiertas horizontales, la instalación de módulos precisa de unas estructuras de soporte, normalmente de baja altura, que dispongan los módulos en la inclinación y la orientación óptimas. La fijación a la cubierta está en función del tipo de materiales que tenga el cerramiento y siempre debe preservar su estanqueidad. En general, hay dos tipos de sistemas de fijación para cubiertas planas, mediante perforación del material de la cubierta, o mediante lastres, si las cargas de viento sobre las estructuras lo permiten. Los cables deben ir protegidos, en canaletas o huecos y debe dejarse algo de espacio entre filas, tanto para el mantenimiento, como para evitar en lo posible el sombreado de unas sobre otras, según sea el caso.

La integración en cubiertas acristaladas

Resultan muy atractivas para integrar módulos fotovoltaicos las cubiertas más o menos transparentes fabricadas de vidrio y perfiles metálicos que cubren áreas amplias de los edificios, como

Figura 8. Integración de módulos fotovoltaicos con estructura de doble vidrio en uno de los accesos al centro comercial La Vaguada, Madrid.



patios, invernaderos o zonas de paso. En ellas, es sencillo reemplazar los vidrios comúnmente utilizados por módulos fotovoltaicos, manteniendo los mismos perfiles de sujeción, aunque ligeramente adaptados para albergar el cableado.

Los módulos fotovoltaicos semitransparentes, o incluso los opacos combinados con vidrio, al captar parte de la luz, disminuyen la carga térmica del edificio a la vez que actúan como eficientes productores de energía. Hay que evitar en todo caso que la inclinación de los módulos sea baja, es decir, próxima a la horizontal, porque esto implicaría una elevada acumulación de suciedad en su superficie o incluso de nieve, hojas, etcétera, con la consiguiente reducción de la producción fotovoltaica.

Además, en las localidades con latitudes medias o altas, la inclinación de los módulos favorece la captación de luz solar, si estos están bien orientados. Una solución muy interesante es la de cubierta en diente de sierra, que alterna superficies inclinadas y orientadas al sur en las que se integran los módulos fotovoltaicos, con superficies orientadas al norte que dejan paso de luz difusa al interior. También los lucernarios o las claraboyas pueden albergar módulos fotovoltaicos semitransparentes.

La integración en fachadas

Las fachadas de los edificios presentan también diversas posibilidades de integración de módulos fotovoltaicos. Destacan las fachadas ventiladas así como las estructuras de muros cortina, tanto los modulares como los montados en obra. En todas ellas, los módulos fotovoltaicos sustituyen los elementos habituales de las fachadas.

En los muros cortina los módulos fotovoltaicos pueden sustituir tanto los vidrios de visión como los elementos opacos, bien con estructura de acristalamiento simple o con estructura doble. En las zonas de visión puede resultar atractiva la utilización de módulos semitransparentes. Es importante resolver bien en cada caso la localización de las conexiones de los módulos y la conducción de los cables a lo largo de la estructura de la fachada.

También los paneles habituales de vidrio, piedra, madera, aluminio, terracota o cerámica de la hoja exterior de una fachada ventilada pueden sustituirse sin problema por módulos fotovoltaicos. Una ventaja de estas estructuras es que en ellas los módulos se mantienen ventilados por su cara posterior, lo cual per-



Figura 9. Módulos de silicio cristalino y amorfo integrados en la fachada ventilada del centro comercial La Albufera, Madrid.



Figura 10. Fachada sur fotovoltaica del centro comercial El Corte Inglés en Albacete.

mite que las temperaturas de trabajo se reduzcan y de esta forma mejore su rendimiento eléctrico. Los módulos pueden tener estructuras estándar, de doble vidrio o estar fabricados sobre distintos tipos de soportes, según convenga en cada caso.

Por otro lado, los módulos fotovoltaicos pueden integrarse, en sustitución de alguno de los vidrios exteriores de las ventanas. Lo más conveniente suele ser situarlos en la parte fija. Si se opta por alguna parte móvil es preferible que sea en aquellas que se desplazan de forma paralela al plano de la fachada y evitar las partes abatibles.

Integración en parasoles y lamas

En los países mediterráneos la aplicación arquitectónica que mejor acompaña la producción fotovoltaica con el ahorro energético del edificio es, sin duda, la de los elementos de sombra, como son los parasoles o las lamas. Con el mismo posicionamiento con el que estos controlan la acción del Sol, los módulos fotovoltaicos consiguen captar eficazmente la energía solar para producir energía eléctrica. Además, otra ventaja que presentan estas estructuras es que están muy bien ventiladas por su cara posterior, lo que reduce su temperatura de trabajo y favorece su rendi-



Figura 11. Lamas fotovoltaicas en la fachada sur del edificio de la sede de CENER en Sarriguren, Navarra.



Figura 12. Gran marquesina con módulos fotovoltaicos a la entrada de un museo en California.

miento. Los módulos pueden ser opacos o permitir cierta transmisión de luz. En este caso, suelen estar fabricados con estructuras de doble vidrio.

Algo que hay que tener en cuenta en el diseño de los parasoles o de las lamas fotovoltaicas, es la posible proyección de sombras de unos elementos sobre otros. Es importante evitar que se produzcan estas sombras a las horas centrales del día, ya que en condiciones de elevada insolación, los efectos de sombreado son más perjudiciales, tanto desde un punto de vista eléctrico como con relación al calentamiento y deterioro de los módulos sombreados.

Integración en otras estructuras constructivas

Los módulos fotovoltaicos pueden también integrarse en numerosas estructuras del entorno urbano ajenas a los edificios. De hecho, el potencial de este tipo de aplicaciones es muy alto, ya que se incluyen gran variedad de posibilidades, como marquesinas, farolas, techados de aparcamientos, barreras de sonido, paradas de autobús, paneles informativos, vallas, cabinas telefónicas y quioscos.

Al igual que ocurre en la integración de fotovoltaica en edificios, es conveniente que en el diseño del elemento esté

incluida la integración de los módulos fotovoltaicos y, en algunos casos también, el alojamiento de las baterías (sistemas autónomos con acumulación). Los temas clave por resolver en el diseño de estas estructuras urbanas fotovoltaicas son, aparte del sombreado y las correctas orientación, inclinación y ventilación, por un lado el riesgo al vandalismo y, por otro, la accesibilidad para su reparación.

Conclusiones

El conocimiento de las posibilidades de diseño de los módulos, según las tecnologías, y del efecto que esos cambios pueden ocasionar en la generación supone una práctica herramienta de diseño para la integración arquitectónica de la energía fotovoltaica en los edificios. Por otro lado, es necesario saber qué criterios de diseño del sistema fotovoltaico deben tenerse en cuenta para compaginar adecuadamente producción eléctrica y exigencias arquitectónicas. De todos ellos el principal es, sin duda, la posición del módulo en la envolvente del edificio, que va a determinar la energía solar que es capaz de captar.

Referencias

- Hering, G (2010). Year of the tiger. *Photon International* 3: 186-218.
- Martín Chivelet N, Fernández Solla I (2007). *La envolvente fotovoltaica en la arquitectura. Criterios de diseño y aplicaciones*. Reverté, Madrid. ISBN: 978-84-291-2112-4.
- Martín Chivelet N (2010). *Integración de la energía fotovoltaica en edificios*. Progenza, Sevilla. ISBN 978-84-95693-68-6.
- Martín N, Alonso-García MC, Chenlo F, Sánchez-Friera P (2008). Electrical and thermal characterisation of PV modules under partial shadowing. *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*: 2986-88.
- Martín N, Ruiz JM (2005). Annual angular reflection losses in PV modules. *Progress in Photovoltaics*, 13: 75-84.
- Mermoud A, Roecker C, Bonvin J (2009). PVSYS software v 4.37. Universidad de Ginebra, Suiza.
- Nofuentes G, Almonacid G (1999). Design tools for the electrical configuration of architecturally integrated PV in buildings. *Progress in Photovoltaics*, 7: 475-488.

Nuria Martín Chivelet

nuria.martin@ciemat.es
 Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad Politécnica de Madrid, es investigadora titular de la Unidad de Energía Fotovoltaica del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) donde desarrolla su actividad profesional desde 1989