

Estudios
Universitarios de
Arquitectura

12

*Nuria Martín Chivelet
Ignacio Fernández Solla*

La envolvente FOTOVOLTAICA en la arquitectura



Criterios de diseño y aplicaciones

**Editorial
Reverté**

**Estudios
Universitarios de
Arquitectura**

12

**La envolvente
FOTOVOLTAICA
en la arquitectura**

Colección dirigida
por Jorge Sainz

**Estudios
Universitarios de
Arquitectura**

12

*Nuria Martín Chivelet
Ignacio Fernández Solla*

La envolvente FOTOVOLTAICA en la arquitectura

Criterios de diseño y aplicaciones

Proemio
Antonio Luque

Prólogo
César Bedoya

Edición
Jorge Sainz

**Editorial
Reverté**

© Nuria Martín Chivelet, 2007

nuria.martin@ciemat.es

© Ignacio Fernández Solla, 2007

ignacio.fernandez@arup.com

Esta edición:

© Editorial Reverté, SA, Barcelona, 2007

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

EDITORIAL REVERTÉ, S.A.

Calle Loreto 13-15, local B

08029 Barcelona

Tel: (+34) 93 419 3336

Fax: (+34) 93 419 5189

Correo E: reverté@reverte.com

Internet: www.reverte.com

Impreso en España · *Printed in Spain*

ISBN 10: 84-291-2112-9

ISBN 13: 978-84-291-2112-4

Depósito Legal: B-???

Impresión: Reinbook Imprès, Barcelona

Índice

Proemio	7
Prólogo	9
Introducción	11
Láminas	17
I Fundamentos de energía fotovoltaica	33
II Criterios de generación fotovoltaica	57
III El diseño de la piel del edificio	69
IV Sistemas de fachada ventilada	83
V Muros cortina tradicionales	95
VI Muros cortina modulares	111
VII Lamas y parasoles	123
VIII Cubiertas y lucernarios	133
Conclusiones	145
<i>Apéndices</i>	
A El Código Técnico de la Edificación	149
B Costes, subvenciones y amortización	153
C Fabricantes de sistemas fotovoltaicos	165
D Programas de simulación y diseño	171
E Legislación y normativa	175
F Bibliografía y referencias	185

Proemio

Antonio Luque

La energía solar fotovoltaica va a ser una de las más importantes fuentes de electricidad del mundo en el curso del presente siglo. Este objetivo se va a conseguir por una combinación de logros técnicos y empeños sociales. Actualmente, la electricidad fotovoltaica goza en España de un importante apoyo económico por parte del sector público, que sin embargo es insignificante desde un punto de vista macroeconómico. Gracias a ese apoyo, los costes de la electricidad solar irán bajando hasta llegar a ser competitivos en precio, para el usuario final, con la electricidad de otros orígenes. Pero entre tanto, el apoyo financiero recibido del sector público va a permitir a la industria asegurarse el aprendizaje necesario para llegar a la deseada reducción de los costes.

Más allá de esto, la electricidad fotovoltaica debe seguir progresando hasta ser competitiva con las tecnologías de generación de electricidad que utilizan intramuros las compañías eléctricas. Pero para esto no basta con la tecnología ya disponible; hace falta una ruptura tecnológica que, sin embargo, ya se vislumbra en el horizonte.

El primer objetivo señalado (ser competitiva para el usuario final) ya está al alcance de la electricidad fotovoltaica con las tecnologías actualmente en uso. Además, la normativa vigente –y esperamos que la que se promulgue en el futuro– hace lo necesario para que la instalación de energía fotovoltaica no sea gravosa para el que la emprenda. Por eso la arquitectura fotovoltaica es un tema de rabiosa actualidad y en modo alguno una ensoñación de futuro.

La familia que se decide por un hogar fotovoltaico, como la institución que decide dotarse de una sede fotovoltaica, están expresando con este hecho su posicionamiento en la sociedad; están diciendo que han recibido el evangelio de la solidaridad intergeneracional, como antes habían recibido el de la caridad con el próximo y más tarde el de la solidaridad global; están declarando que han tomado partido por un mundo sostenible y están contribuyendo eficazmente, y no sólo simbólicamente, a ello; lo están haciendo mediante una generación de energía limpia que cuando se multiplique por el número creciente de adeptos llegará a ser muy importante; y además, están contribuyendo a hacer crecer una industria capaz de llegar a hacer plenamente viable esta opción como la más económica.

Antonio Luque es doctor ingeniero de Telecomunicación y catedrático de Electrónica Física en la Universidad Politécnica de Madrid; en 1979 fundó el Instituto de Energía Solar en esa misma universidad; y en 1981, la empresa Isofotón, fabricante de células solares.

Prólogo

César Bedoya

La reciente aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) va a suponer una gran transformación en los campos del proyecto, la construcción y la rehabilitación de edificios, que propiciará el fomento de la innovación y el desarrollo tecnológicos, tanto en los procedimientos edificatorios como en los materiales constructivos, para alcanzar el objetivo de construir unos edificios más habitables, seguros, eficientes energéticamente y respetuosos con el medio ambiente.

Entre las acciones relacionadas con la energía y el medio ambiente que incorpora el CTE destaca la obligación de instalar sistemas de energía solar térmica en todos los nuevos edificios con demanda de agua caliente sanitaria (ACS), y sistemas de energía solar fotovoltaica para producción de electricidad en los nuevos edificios del sector terciario a partir de determinada superficie. Estas medidas en favor de la eficiencia energética en los edificios permitirán reducir la emisión de gases de efecto invernadero, y minimizar, por tanto, los efectos del cambio climático.

Aunque la tecnología fotovoltaica ha venido desarrollándose desde hace mucho tiempo, tanto en España como en el resto del mundo, todavía son pocos los ejemplos de edificios españoles con integración de sistemas fotovoltaicos, es decir, sistemas en los que los paneles solares cumplan una doble función: energética y arquitectónica. Por otra parte, esta ausencia de integración de sistemas solares en los edificios perjudica el avance de los aprovechamientos de fuentes de energía renovables que impulsa el CTE, y concretamente el de los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. Ésta es la razón por la que el CTE prima la integración sobre la superposición o, todavía más, sobre lo que denomina ‘caso general’, que es cuando ni la orientación ni la inclinación del campo de captación se relacionan con los ejes principales de la edificación, ni con la envolvente de la misma.

La publicación del presente libro sobre ‘la envolvente fotovoltaica en la arquitectura’ viene a cubrir esta carencia, pues incide en los aspectos arquitectónicos de las instalaciones fotovoltaicas, por lo que es de esperar que sirva de estímulo hacia el desarrollo de la integración fotovoltaica en edificios en España.

Esta visión arquitectónica de las instalaciones fotovoltaicas abarca desde el estudio de las variantes en la fabricación de las células (con atención, por tanto, a los materiales, colores y tama-

César Bedoya es doctor arquitecto y profesor titular del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, y coautor (con Javier Neila), entre otros libros, de Acondicionamiento y energía solar en arquitectura y Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental (Madrid, 1986 y 1997).

A Rafa, y a Lucía y Eva,
por su ilusión por todo.
NMC

A Amelia, Julia y Berta (mis chicas),
por su paciencia.
IFS

Introducción

La energía fotovoltaica es una fuente de generación eléctrica limpia y renovable que, por sus características, se integra muy bien en el medio urbano. Los sistemas fotovoltaicos no producen ruido ni incluyen partes móviles, y son modulares y fácilmente manejables como elementos de la construcción. A la ya larga experiencia de los sistemas fotovoltaicos se une la de los sistemas integrados en edificios, que avalan la alta fiabilidad de estas instalaciones. Son miles los ejemplos de sistemas fotovoltaicos integrados con éxito en muchos edificios de Europa, Japón o los Estados Unidos. Sin embargo, en España la integración fotovoltaica en edificios es aún escasa.

La reciente legislación que rige la conexión a la red eléctrica de los sistemas fotovoltaicos y garantiza unas sustanciales primas, junto con las subvenciones que ofrecen las distintas administraciones públicas, han animado el mercado fotovoltaico nacional y han hecho proliferar las llamadas ‘huertas solares’. Sin embargo, este crecimiento no ha alcanzado a los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios y cabe, por tanto, preguntarse por qué.

Seguramente el miedo a lo desconocido se hace más patente cuando se trata de nuestro propio edificio. Los potenciales propietarios de estos sistemas no conocen lo suficientemente bien lo fiable y segura que es esta tecnología. Esta incertidumbre la comparten muchos arquitectos, que pueden considerar que los paneles solares son una intromisión no deseada en su proyecto, y los ven como algo ajeno al proceso de diseño. Por su parte, los promotores comprueban que el coste de la instalación integrada aumenta la inversión inicial del edificio, y no se sienten motivados a considerarla, aunque a largo plazo las cuentas sí salgan.

En cambio, el nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE) obliga a la inclusión de los sistemas fotovoltaicos en determinados tipos de edificios de nueva construcción. Desde septiembre de 2006, los edificios de oficinas y los de uso comercial, administrativo, hotelero y hospitalario deben incorporar en su proyecto cierta cantidad de potencia fotovoltaica que estará en función de su superficie. Por tanto, ahora se plantea la necesidad de suministrar herramientas de apoyo especialmente orientadas a los arquitectos.

El propósito de este libro es ayudar a resolver esta carencia. En muchas ocasiones, los arquitectos se ponen en manos de los fa-

Láminas

I. Centro Alzheimer de la Fundación Reina Sofía, Madrid.

Arquitectos:
Estudio Lamela.

Sistema fotovoltaico:
Abasol, Shüco (módulos).

Fotos:
cortesía de Abasol.



Fundamentos de energía fotovoltaica

Introducción

La unidad básica fotovoltaica es la ‘célula solar’, y con ella se constituyen los ‘módulos fotovoltaicos’, elementos de fácil manejo que conectados entre sí componen el generador eléctrico de una instalación fotovoltaica. Los módulos fotovoltaicos transforman directamente la luz solar en electricidad y pueden incluirse en la envolvente de los edificios de muy diversas maneras. En la mayoría de los casos estos ‘edificios fotovoltaicos’ están conectados a la red eléctrica, pero existen también casos de edificios autónomos.

Para lograr una mejor integración arquitectónica, el diseño de estos módulos puede ajustarse dentro de ciertos límites. Cada tecnología fotovoltaica ofrece distintas posibilidades y, a su vez, tiene sus limitaciones. En este capítulo se describen las células y módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías. Características como la transparencia del módulo, su forma y su tamaño, su aspecto y su color o su estructura constructiva se analizan para módulos de silicio cristalino y distintos tipos de módulos de lámina delgada.

El análisis de las tecnologías fotovoltaicas desde el punto de vista de su integración en el diseño de un edificio y las opciones que ofrecen al proyectista se completan con una descripción muy general de los otros componentes de los sistemas fotovoltaicos, tanto de sistemas conectados a red como de sistemas aislados.

Células y módulos fotovoltaicos

La célula solar

Las células solares fotovoltaicas transforman directamente la energía solar en energía eléctrica. Fabricados con materiales semiconductores, estos dispositivos absorben parte de la radiación solar que incide sobre ellos y la transforman, con mayor o menor eficacia, en electricidad. Si se conecta una célula solar a una carga eléctrica y se ilumina, producirá una diferencia de potencial en esa carga y hará circular una corriente a través de ella (figura 1.1). Bajo estas condiciones de operación, la célula funciona como un generador de energía eléctrica.

Las células convencionales están fabricadas con obleas (finas láminas) de silicio cristalino de unos 100 centímetros cuadrados

Criterios de generación fotovoltaica

Introducción

Cualquier superficie de la envolvente de un edificio que esté libre de sombras y bien orientada puede ser susceptible de albergar módulos fotovoltaicos. Desde el punto de vista de la generación de energía, la posición óptima para los sistemas fotovoltaicos conectados a red corresponde a la orientación sur (en latitudes norte), con una inclinación unos cuantos grados (entre 5 y 10) por debajo del valor de la latitud local. Para los sistemas integrados en edificios no siempre es posible contar con estas condiciones, pero sí es recomendable que los módulos reciban al menos un 80 % de la irradiación máxima anual local.

En el diseño de los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios entran en juego varios factores que interactúan mutuamente: la generación fotovoltaica, la función y el diseño arquitectónico, el comportamiento térmico, la transmitancia luminosa de los módulos y el coste. Es importante alcanzar un compromiso entre todos ellos, al tiempo que se deberán cumplir las exigencias de seguridad que afectan a la instalación, tanto desde el punto de vista eléctrico como arquitectónico.

Pero a su vez, estos parámetros de diseño están determinados por otras variables, que son las que hay que conocer y analizar para encontrar una solución óptima en cada caso: ejemplos claros son la radiación solar local, la latitud, el uso que se va a dar al edificio, el entorno en el que está ubicado y la elección de una tecnología fotovoltaica determinada.

Existen programas informáticos de simulación y diseño de sistemas fotovoltaicos en general o para la integración en edificios en particular, que pueden ser de utilidad en la toma de decisiones sobre el diseño de estos sistemas. En el apéndice D se da un listado de muchos de ellos. Sin embargo, conviene tener en cuenta que algunos de los factores mencionados pueden verse sujetos en parte al criterio personal del arquitecto o del propietario, lo cual puede hacer que se modifique parcialmente la solución convenida, siempre procurando mantener un equilibrio razonable entre todos los factores.

Conviene resaltar que una buena integración arquitectónica de los módulos en los edificios es clave para el éxito de esta aplicación. Lo ideal es incluir el sistema fotovoltaico ya en la fase de di-

El diseño de la piel del edificio

Diseño del sistema fotovoltaico

Hasta muy recientemente, los módulos fotovoltaicos se han diseñado con un único objetivo: la generación de electricidad a partir de la energía solar. El sistema de módulos o paneles fotovoltaicos era un nuevo artilugio, no bienvenido, que solía terminar en la cubierta del edificio, totalmente ajeno al concepto de diseño del arquitecto. Además, los costes se duplicaban: el revestimiento de la fachada se terminaba primero por completo, y después se montaba el sistema fotovoltaico como una fachada superpuesta.

No fue hasta mediados de los años 1990 cuando los arquitectos y la industria fotovoltaica encontraron una base común para integrar de manera efectiva los módulos fotovoltaicos en los cerramientos de fachada. El primer paso para una integración efectiva es darse cuenta de que casi todos los edificios emplean sus ventanas como una fuente de energía solar pasiva (que proporciona luz todo el año y ganancias de calor en invierno). Convertir las superficies opacas del edificio (fachadas, cubiertas o parasoles) en productores activos de electricidad, integrando en ellas paneles fotovoltaicos, es parte del mismo proceso de diseño que abre huecos en una fachada para conseguir iluminación y ventilación.

En términos constructivos, esta nueva misión de los elementos fotovoltaicos significa que la fachada fotovoltaica integrada tiene que desempeñar el mismo papel que la fachada tradicional o los elementos de cubierta a los que sustituye (figura 3.1). Entre estos requerimientos están el color, la imagen y el tamaño de los elementos del cerramiento, la impermeabilidad, la estabilidad, la resistencia a las cargas de viento, la resistencia al fuego, la durabilidad y el mantenimiento, la seguridad eléctrica durante la construcción y ya en uso, y finalmente el coste.

Si queremos que los paneles fotovoltaicos cumplan con estos nuevos requerimientos en tanto que materiales de revestimiento, no podemos dejar de lado las exigencias que ya hemos mencionado en los capítulos anteriores, como la orientación y la inclinación, la evitación de sombras y la aportación de calor y ventilación. Para poder dar respuesta a ambos tipos de requerimientos (los de la construcción y los de la producción energética) es fundamental que la opción fotovoltaica se discuta desde el principio

3.1. Cerramiento de paneles fotovoltaicos y terracota en fachada. Cubierta parasol con paneles fotovoltaicos integrados. Foto: cortesía de Oskomera.



Concepto de fachada ventilada

Típicas de la construcción en madera de países fríos y húmedos, las fachadas ventiladas son la respuesta tradicional al problema de la entrada de agua a través de un cerramiento ligero. El concepto se basa en dividir la fachada en dos pieles independientes y con usos distintos, separadas por una cámara de aire ventilada. La piel interior es la fachada resistente, estanca y aislada, mientras que la piel exterior tiene como objetivo proteger a la interior de la acción directa de la lluvia. Por eso el nombre en inglés de estos sistemas es ‘pantalla de lluvia’ (*rainscreen façade*). El nombre alemán –‘fachada fría’ (*kalt Fassade*)– hace referencia al hecho de que la piel exterior no está aislada.

El estudio pionero de G.K. Garden sobre la penetración de la lluvia y su control, publicado en 1963,¹ explicaba cómo el principio de la fachada ventilada podía resolver de manera definitiva el riesgo de la entrada de agua a través de los cerramientos, sin dejar de apreciar sus otras ventajas: mayor tolerancia a los movimientos del edificio, protección de la barrera impermeable, mejor posición del aislamiento, menor riesgo de condensaciones intersticiales y, finalmente, contribución a una reducción de las cargas térmicas en verano, gracias a la ventilación del aire caliente en la cámara.

La hoja interior de una fachada ventilada puede ser un muro de hormigón o ladrillo, o una pared de bloques o de paneles prefabricados. En su cara exterior se fija un aislamiento térmico, se intercala una barrera de vapor entre el aislamiento y el muro, y se añade una lámina impermeable respirante al exterior del aislamiento. El aislamiento térmico por fuera de la hoja interior, la barrera de vapor y la membrana impermeable protegen dicha hoja interior de los efectos de la humedad y de la radiación solar, con lo que se minimizan los efectos de dilataciones y contracciones térmicas. Además, es fácil evitar los puentes térmicos generados por los elementos estructurales.

Sobre la hoja interior se fijan unos anclajes puntuales o unos perfiles que permiten la colocación de los paneles que forman la hoja exterior. La cámara de aire entre las dos hojas se construye de manera que todas o algunas de las juntas de la hoja exterior estén abiertas. El agua que penetra a través de las juntas exterior-

1. G.K. Garden, “Rain penetration and its control”, *Canadian Building Digest*, nº 40, abril 1963; el artículo completo puede verse en http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd040_e.html. Una buena actualización –que compara el funcionamiento de la fachada ventilada con el *cavity wall* inglés– es el artículo de M.Z. Rousseau, “Facts and fictions of rain-screen walls”, *Canadian Building Digest*, 1990; el artículo completo puede verse en http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cp/wal3_e.html.

Muros cortina tradicionales

Concepto y tipos de muro cortina

El muro cortina es la fachada ligera llevada a su máxima expresión, pues supone la respuesta lógica a las estructuras de pórticos de la arquitectura del siglo xx, en las que la fachada ha dejado de ser un elemento portante. La carrera por conseguir la máxima ligereza, reducción de espesor y apertura de huecos comenzó en Chicago hacia 1880, y terminó en la década de 1950 con el concepto maduro del muro cortina o fachada continua de vidrio que recubre como un guante todo el edificio. En las seis décadas que han pasado desde la construcción de la Lever House (de Gordon Bunshaft para SOM) y el edificio Seagram (de Mies van der Rohe), ambos en Nueva York, no hemos hecho más que perfeccionar el modelo, pero sin poner en cuestión el paradigma.

La mayor crítica a la fachada acristalada continua se produjo tras la primera crisis energética de 1973, y ahora se ha convertido en el motor de la evolución del tipo. Efectivamente, si desde el punto de vista constructivo los muros cortina son una solución probada y fiable, su eficiencia energética, en especial el control de las ganancias de calor en verano, está todavía lejos de haberse resuelto. Como veremos a continuación, la integración de los paneles fotovoltaicos puede ayudar a reducir el problema.

El concepto constructivo que caracteriza el muro cortina es que se trata de un cerramiento colgado, no apoyado. Por tanto, el nombre de ‘cortina’ (del inglés *curtain wall*) es el adecuado. La razón es que la pequeña sección de los perfiles verticales –generalmente de aluminio– que soportan el peso de los vidrios no permite su trabajo a compresión, pues podrían doblarse por pandeo. Si se cuelgan de anclajes fijados en el forjado superior, el proble-

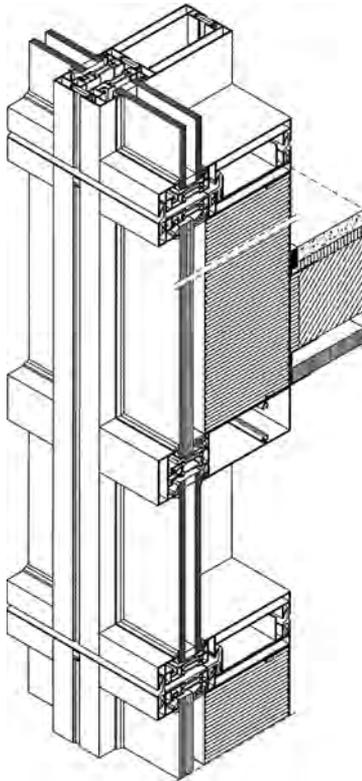
5.1. Ejecución de un muro cortina a base de montantes y travesaños; los montantes se cuelgan de la viga metálica de cubierta y se apoyan sobre el forjado inferior. Nueva terminal del aeropuerto de Asturias. Sistema de muro cortina: Technal



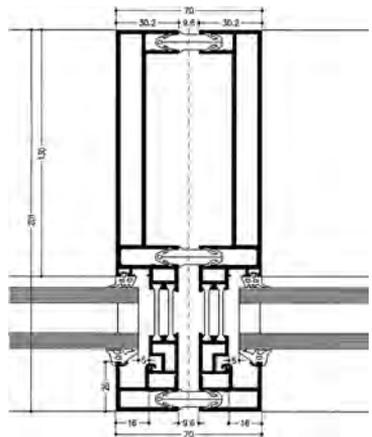
Muros cortina modulares

Concepto de muro cortina modular

Los muros cortina modulares se desarrollaron para resolver los problemas originados por la instalación en obra de los muros cortina tradicionales a base de montantes y travesaños. Los objetivos principales eran reducir el tiempo de instalación en obra y mejorar la calidad, así como evitar repasos posteriores. Si bien se pueden encontrar precedentes en el trabajo temprano de Jean Prouvé en Francia, la solución modular se generalizó en los Estados Unidos a partir de 1960 con el nombre de *unit system*. Cada módulo de fachada es un gran panel completamente prefabricado en taller, con el vidrio, las juntas de goma y los elementos de fijación incorporados (figura 6.1). La dimensión está limitada por el transporte o por la manejabilidad en obra. Generalmente se tra-



6.1. Detalles de un muro cortina modular con perfilería vista al exterior: en la axonometría (izquierda), se aprecia la solución de unión entre módulos en el montante y en los dos travesaños por encima de los forjados; en la sección (derecha), se aprecia la rotura térmica en los semimontantes y los junquillos exteriores del acristalamiento. Cortesía de Wicona.



Lamas y parasoles

Introducción

La preocupación por el ahorro energético ha espoleado a los países con mayores demandas de energía hacia diseños y normativas que supongan un ahorro real de recursos. Por otra parte, la arquitectura evoluciona hacia el aumento de las superficies acristaladas en los edificios, para dotar de luz natural y confort a sus ocupantes. La solución para compatibilizar ambos requerimientos en países de alta radiación solar es emplear lamas y parasoles, que limitan los excesos puntuales de energía incidente. Esta necesidad se ha convertido en una virtud para muchos arquitectos, que han hecho de la integración de celosías y lamas una parte bien establecida de su lenguaje (figura 7.1). Las lamas o parasoles pueden ser fijas u orientables, de vidrio o metálicas, grandes o pequeñas, y estar adheridas a la fachada o separadas de ésta y crear así un espacio intermedio para el mantenimiento.

Los elementos de sombreado exterior suponen un poderoso refuerzo para la imagen de un edificio si se usan adecuadamente; en la arquitectura española nunca han dejado de estar en un lugar prioritario entre las opciones disponibles de control solar y luminoso. Si se conocen y usan bien sus efectos, se puede conseguir un control energético adecuado sin perder demasiada iluminación natural, a la vez que se reduce el riesgo de deslumbramiento.

7.1. Sede de Caltrans, Los Ángeles. La fachada corta del edificio está orientada al sur y se ha recubierto con lamas fotovoltaicas de vidrio laminado con células de silicio monocristalino. Fotos: cortesía de Arup.



Cubiertas y lucernarios

Introducción

Hemos dejado para el final las áreas del edificio donde la integración fotovoltaica es más habitual: las cubiertas. Considerada a menudo como la quinta fachada, la cubierta puede ser algo más que un cierre estanco o una planta técnica en la que se acumulan los equipos mecánicos y eléctricos del interior del edificio.

Distinguimos entre dos familias de soluciones de cubierta, que requieren distintas respuestas de integración fotovoltaica. Por una parte están las cubiertas ciegas –que podemos subdividir en planas e inclinadas–, en las que los módulos pueden integrarse como un revestimiento adicional o como un componente intrínseco del sistema estanco. Por otra parte están las cubiertas acristaladas –tanto en la versión de gran tamaño (atrios) como en la versión más reducida (lucernarios)–, que deben responder a las exigencias simultáneas de transparencia y de estanquidad. Un tipo secundario de cubierta acristalada son las pérgolas exteriores (figura 8.1).



8.1. Estación de autobuses, Kanazawa (Japón): pérgola acristalada con paneles fotovoltaicos de silicio amorfo. Foto: cortesía de Avanzza Japan (véase en color en la lámina X).

Conclusiones

En los capítulos anteriores se han revisado los fundamentos de la energía solar fotovoltaica y las distintas tecnologías existentes, así como los criterios de generación eléctrica que deben estar presentes en el diseño de una instalación fotovoltaica integrada en un edificio.

La orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos determinan la irradiancia que reciben, que es el parámetro más influyente en la producción eléctrica. Un módulo fotovoltaico orientado al sur e inclinado unos pocos grados por debajo del valor de la latitud local produce la máxima generación eléctrica en términos anuales. El margen de ángulos que permiten una insolación suficiente del módulo está determinado sobre todo por la latitud del lugar. Así, las fachadas verticales presentan unas pérdidas respecto al valor máximo en torno al 40 por ciento como media, en la Península Ibérica. En cambio, las inclinaciones de hasta 15° mantienen sus pérdidas por debajo del 20 por ciento.

Aunque de segundo orden en relación con la irradiancia, el control de la temperatura es otro factor importante en los sistemas integrados en edificios. Por tanto, es conveniente permitir la ventilación de la cara posterior de los módulos, especialmente en los de silicio cristalino y los de seleniuro de cobre e indio (CIS).

Se han expuesto otras medidas que contribuyen a mejorar el rendimiento eléctrico, como son evitar la conexión en serie de módulos con diferentes características o situados en diferentes planos, acortar la distancia entre los paneles y el inversor, o usar cables y sistemas de conexión adecuados. También se ha destacado, en el diseño de la instalación, la accesibilidad a los módulos para su limpieza, tanto en las fachadas como en las cubiertas, y la importancia de evitar que estén sombreados.

Por otro lado, desde el punto de vista constructivo, los elementos fotovoltaicos deben cumplir una serie de requerimientos tales como el aspecto deseado (color, imagen, tamaño, transparencia, etcétera), la impermeabilización, la resistencia a las cargas de viento, la durabilidad y el mantenimiento, la seguridad durante la construcción y el uso, o el coste.

Para poder dar una respuesta conjunta a los requerimientos de la producción energética y de la integración constructiva es fundamental que la opción fotovoltaica se discuta desde el comienzo del diseño del edificio. El arquitecto decidirá si el sistema foto-

El Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado por Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, establece las exigencias básicas que deben cumplir los edificios en relación con la seguridad y la habitabilidad. Se ha creado también el Consejo para la Sostenibilidad, Innovación y Calidad de la Edificación (Real Decreto 315/2006, de 17 de marzo). De este Consejo depende la Comisión del Código Técnico de la Edificación, creada para asesorar y dar asistencia en todo lo referente a la aplicación, el desarrollo y la actualización del documento.

El CTE adapta la normativa de la construcción en España a las nuevas necesidades ambientales de la sostenibilidad. Entre sus claves destacan la exigencia de una mayor eficiencia energética y la instalación de energía solar, tanto térmica como fotovoltaica. El Código Técnico contiene un Documento Básico de Ahorro de Energía donde se establecen las exigencias básicas en cuanto a eficiencia energética y energías renovables que deben cumplir los nuevos edificios y los que se reformen o rehabiliten. Este Documento Básico consta de varias secciones, de las cuales la HE 5 es la correspondiente a la contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

Desde su entrada en vigor en septiembre de 2006, el CTE exige a ciertos tipos de edificios la instalación de determinada potencia fotovoltaica. Los edificios afectados son: hipermercados, centros comerciales y de ocio, grandes almacenes, oficinas, hoteles y hostales, hospitales y clínicas privadas, y pabellones de recintos feriales. La potencia mínima que se debe instalar se calcula en función del tipo de uso del edificio, del clima y de la superficie construida del edificio, mediante la fórmula:

$$P = C \times (A \times S + B)$$

donde

- P es la potencia a instalar, en kilovatios;
- A y B son dos coeficientes cuyos valores vienen dados por el uso del edificio (tabla A.A);
- C es el coeficiente de la zona climática (tabla A.B); y
- S es la superficie construida del edificio, en metros cuadrados.

En la tabla A.A se recogen los valores de los coeficientes A y B, mientras que el coeficiente C varía entre 1 y 1,4 según los datos

Costes, subvenciones y amortización

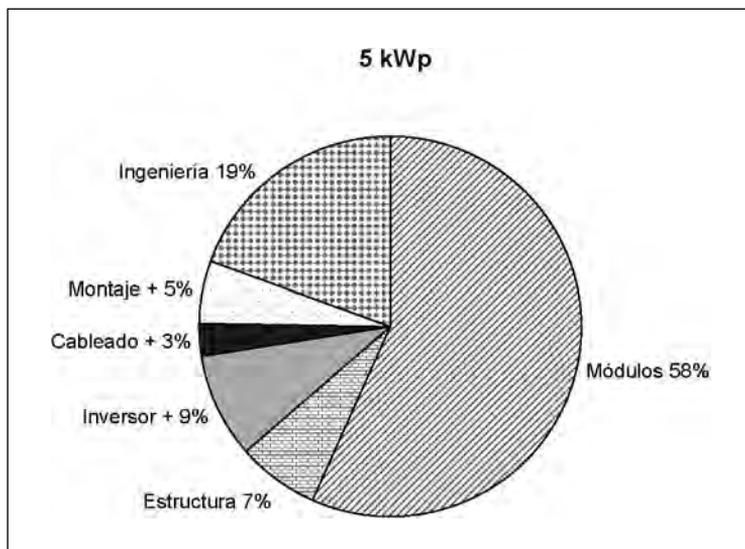
Costes medios de instalación

Sistemas fotovoltaicos conectados a red

Tabla B.A. Desglose de los costes, en euros, de un sistema fotovoltaico conectado a red de 5 kWp y otro de 100 kWp. Fuente: ASIF, 2006.

	5 kWp	100 kWp
Módulos	19.000	365.000
Estructura soporte y elementos mecánicos	2.291	38.208
Inversor, protecciones, contador, monitorización	3.013	54.000
Cableado y varios	940	15.000
Montaje y puesta en marcha	1.754	20.761
Ingeniería, gastos generales, administración y beneficio industrial	6.502	107.031
Total	33.500	600.000
Total Euros/Wp	6,7	6,0

B.1. Reparto de costes en un sistema fotovoltaico de 5 kilovatios de potencia pico conectado a red, a partir de los datos de la tabla B.A.



Fabricantes de sistemas fotovoltaicos

Módulos con diseños especiales para su integración en edificios

Producto	Descripción	Fabricante
Fassadenmodul	Módulos de silicio multicristalino para fachadas	3S (Suiza) www.3-s.ch/de/solarsysteme
Evalon V-Solar 204 Evalon V-Solar 272 Evalon V-Solar 408	Módulos de silicio amorfo de gran tamaño para cubiertas (Unisolar)	Alwitra (Alemania)
Laminados de doble vidrio	Laminados de doble vidrio de módulos de cualquier tecnología y tamaño	Atlantis Energy Systems (EEUU) www.atlantisenergy.org
Atlantis Sunslates	Tejas planas de silicio monocristalino (400×720) mm ²	Atlantis Energy Systems (EEUU) www.atlantisenergy.org
BMC Sunclay tile	Tejas con forma y tamaño similar a las convencionales que albergan tres células de silicio cristalino	BMC Solar Industrie GmbH (Alemania)
Voltarlux Asiopak 30 SG	Schott Silicio amorfo	Glasswerke Arnold (Alemania)
Pv Quick	Módulos con marcos adaptados para su integración como tejas de silicio multicristalino (Schott)	Lafarge (Alemania) www.lafarge.com www.lafarge-braas.com
SRT 40	Módulos con marcos adaptados para su integración como tejas de silicio multicristalino (BP Solar)	Lafarge (Reino Unido) www.lafarge.com

Programas de simulación y diseño

PV*SOL

Programa para el dimensionado, análisis y simulación de sistemas fotovoltaicos, tanto conectados a red como autónomos. Herramienta profesional de fácil manejo para diseñadores, ingenieros y especialistas en energía, puede utilizarse también con fines educativos por universidades o centros de investigación. Disponible en alemán e inglés (versión 2.2).

Contacto: Dr. Valentin, EnergieSoftware GmbH

Dirección: Stralauer Platz 33-34 · Berlin D-10243 (Alemania)

Teléfono: +49 (30) 588 439-0

Fax: +49 (30) 588 439-11

Correo electrónico: info@valentin.de

Sitio en Internet: www.valentin.de

PVCAD

Programa para el diseño de fachadas fotovoltaicas. La versión 1.2.1 ofrece interfases para los sistemas de ingeniería civil de CAD (DXF-Import). Utiliza una extensa base de datos meteorológica y de componentes fotovoltaicos. Incluye el cálculo del sombreado de módulos. Requiere conocimientos básicos sobre ingeniería eléctrica y sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Orientado a ingenieros eléctricos y técnicos fotovoltaicos. Sólo en alemán hasta la versión actual.

Compañía: ISET e V

Dirección: Königstor 59 · Kassel 34119 (Alemania)

Fax: +49 (561) 7294 200

Correo electrónico: M.Viotto@iset.uni-kassel.de

Sitio en Internet: www.iset.uni-kassel.de/pvcad

PVSYST

Programa para el estudio, dimensionado, simulación y análisis de datos de sistemas fotovoltaicos completos, tanto conectados a red como autónomos. Incluye una extensa base de datos meteorológica y de componentes y una herramienta para el cálculo de sombras. El programa, de fácil uso, requiere conocimientos básicos

Legislación y normativa

Legislación de ámbito europeo

- Directiva 2003/96/CE del Consejo, de 27 de octubre de 2003, por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad.
- Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad.
- Directiva 96/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de diciembre de 1996, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad.
- Propuesta de directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía. COM (2002) 415 final. 2002/0185 (COD).
- Comunicación de la Comisión · Energía para el futuro: fuentes de energía renovables · Libro Blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios. COM (1997) 599 final.
- Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- Libro Verde: hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético. COM (2000) 769 final.
- Libro Verde sobre la eficiencia energética o cómo hacer más con menos. COM (2005) 265 final. *Contiene 27 medidas prioritarias para garantizar la seguridad del suministro, la competitividad de la economía europea y el desarrollo sostenible.*

Legislación de ámbito nacional

Listado de leyes

- Ley 54/1997, de 27 noviembre, del sector eléctrico. *Esta ley establece los principios de un nuevo modelo de funcionamiento basado en la libre competencia e impulsa el desarrollo de instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial.*

Bibliografía y referencias

Libros y tesis doctorales



BISSCHOP, Freerk *et al.*; BÖTTGER, Willem O.J.; SCHOEN A.J.N. (edición). *Building with photovoltaics*. International Energy Agency · Noviembre. La Haya: Ten Hagen & Stam, 1995.

CAAMAÑO, Estefanía. *Edificios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: caracterización y análisis*. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.

CASTRO GIL, Manuel-Alonso *et al.* *Edificios fotovoltaicos: técnicas y programas de simulación*. Mairena del Aljarafe (Sevilla): Promotora General de Estudios, S.A. (PROGENSA), 2004.



LORENZO, Eduardo. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. Mairena del Aljarafe (Sevilla): Promotora General de Estudios, S.A. (PROGENSA), 1994.

MAÑÁ, Fructuoso; *et al.* *La cubierta captadora en los edificios de viviendas*. Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 2002.

MARTÍN CHIVELET, Nuria. *Estudio de la influencia de la reflexión, el ángulo de incidencia y la distribución espectral de la radiación solar en los generadores fotovoltaicos*. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 1999.



— *Integración de módulos en la arquitectura urbana*. Colección ‘Documentos CIEMAT’. Madrid: CIEMAT, 2004.

SICK, Friedrich; Erge, THOMAS (edición). *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*. International Energy Agency. Londres: James and James, 1996.



THOMAS, Randall (edición). *Photovoltaics and architecture*. Londres: Spon Press, 2001.

Artículos de revistas y actas de congresos

JAHN, Ulrike; NASSE, Wolfgang. “Operational performance of grid connected PV systems on buildings in Germany”. *Progress in Photovoltaics*, n° 12, 2004, páginas 441-448.

KAAN, Henk; REIJENGA, Tjerk. “Photovoltaics in an architectural context”. *Progress in Photovoltaics*, n° 12, 2004, páginas 395-408.

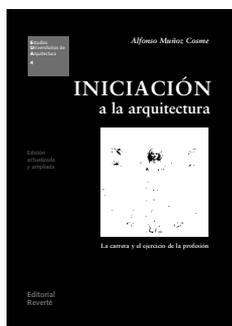
KREUTZMANN Anne. “Solar modules 2006: Market survey over 500 products”. *Photon International*, n° 2, febrero 2006.

Colección **Estudios Universitarios de Arquitectura**
Dirigida por Jorge Sainz

1



4



Alfonso Muñoz Cosme
Iniciación a la arquitectura
La carrera y el ejercicio de la profesión

Edición actualizada y aumentada
ISBN: 84-291-2104-8
204 páginas · 48 ilustraciones

5



Steen Eiler Rasmussen
La experiencia de la arquitectura
Sobre la percepción de nuestro entorno

Edición íntegra
ISBN: 84-291-2105-6
224 páginas · 193 ilustraciones (8 en color)

6



Jorge Sainz
El dibujo de arquitectura
Teoría e historia de un lenguaje gráfico

Edición corregida y aumentada
ISBN: 84-291-2106-4
253 páginas · 177 ilustraciones (12 en color)

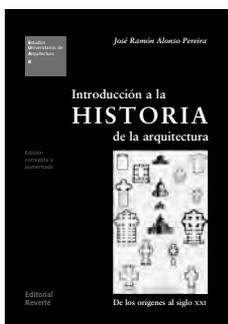
7



Christian Norberg-Schulz
Los principios de la arquitectura moderna
Sobre la nueva tradición del siglo XX

ISBN: 84-291-2107-2
283 páginas · 239 ilustraciones

8



José Ramón Alonso Pereira
Introducción a la historia de la arquitectura
De los orígenes al siglo XXI

Edición actualizada
ISBN: 84-291-2108-0
378 páginas · 520 ilustraciones

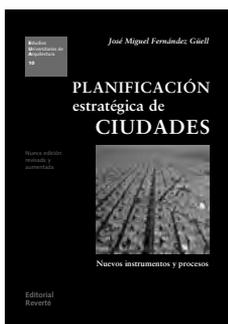
9



Jan Gehl
La humanización del espacio urbano
La vida social entre los edificios

ISBN: 84-291-2109-9
217 páginas · 289 ilustraciones

10



José Miguel Fernández Güell
Planificación estratégica de ciudades
Nuevos instrumentos y procesos

Nueva edición, revisada y aumentada
ISBN 10: 84-291-2110-2
ISBN 13: 978-84-291-2110-0
299 páginas · 135 ilustraciones

11



Andrew Charleson
La estructura como arquitectura
Formas, detalles y simbolismo

ISBN 10: 84-291-2111-0
ISBN 13: 978-84-291-2111-7
259 páginas · 334 ilustraciones

12



*Nuria Martín Chivelet
Ignacio Fernández Solla*
La envolvente fotovoltaica en la arquitectura
Criterios de diseño y aplicaciones

ISBN 10: 84-291-2112-9
ISBN 13: 978-84-291-2112-4
187 páginas · 205 ilustraciones

En preparación:

Inmaculada Esteban · Fernando Valderrama
Curso de AutoCAD para arquitectos
Planos, presentaciones y trabajo en equipo

Lilia Maure
La arquitectura del clasicismo en Inglaterra
De Inigo Jones a John Soane

Colin Rowe · León Satskowski
La arquitectura del siglo XVI en Italia
Artistas, mecenas y ciudades

Darío Álvarez
El jardín en la arquitectura del siglo XX
Naturaleza artificial en la cultura moderna

Sigfried Giedion
Espacio, tiempo y arquitectura
El origen de una nueva tradición

Juan Bordes
La fotografía de arquitectura
Modos de mirar el espacio, 1839-2005

Este libro, compuesto con tipos
Sabon (de Jan Tschichold, 1964) y
Syntax (de Hans Eduard Meier, 1969),
se imprimió en Barcelona,
el mes de abril del año 2007,
en los talleres de **Reinbook Impres**.

La envolvente fotovoltaica en la arquitectura



Este libro está dirigido específicamente a los arquitectos, a los estudiantes de arquitectura y a los promotores inmobiliarios, aunque puede ser de gran interés para un amplio espectro de lectores interesados en las energías renovables.

El Código Técnico de la Edificación obliga a la inclusión de sistemas fotovoltaicos en determinados tipos de inmuebles de nueva construcción. Desde septiembre de 2006, los edificios de oficinas y los de uso comercial, administrativo, hotelero y hospitalario deben incorporar en su proyecto cierta cantidad de potencia fotovoltaica que estará en función de su superficie. Por tanto, ahora se plantea la necesidad de suministrar herramientas de apoyo especialmente orientadas a los profesionales.

El objetivo de este libro es que tanto los arquitectos como los promotores entiendan que la integración de la energía fotovoltaica no es una obligación más, sino un nuevo producto constructivo, con sus reglas pero también con una gran flexibilidad de dimensiones y acabados, que puede convertirse en una herramienta de diseño muy valiosa para el resultado final del edificio.

Esta novedosa tecnología se presenta aquí desde el punto de vista de su aplicación práctica a edificios reales, teniendo en cuenta las condiciones geográficas y las posibilidades constructivas de nuestro país. El planteamiento consiste en considerar los módulos fotovoltaicos desde un punto de vista tectónico, como un nuevo material de construcción, con sus exigencias y sus limitaciones, pero también con unas enormes posibilidades de innovación y de eficacia.

Las fotografías, los gráficos y los detalles se han adecuado al carácter de manual de construcción que constituye el enfoque del libro. Las tablas y los gráficos se han preparado especialmente para la ocasión, y tienen en cuenta la latitud y las condiciones climatológicas de la Península Ibérica.

NURIA MARTÍN CHIVELET (Madrid, 1966) es licenciada (1989) en Ciencias Físicas por la Universidad Autónoma de Madrid y doctora (1999) por la Universidad Politécnica de Madrid; actualmente es Investigadora Titular de la Unidad de Energía Solar Fotovoltaica del CIEMAT.

IGNACIO FERNÁNDEZ SOLLA (Melilla, 1964) es arquitecto (1989) por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid; especialista en fachadas, ha trabajado para firmas instaladoras (Robertson Cupples) y para proveedores de sistemas de fachadas (Hydro-Technal); actualmente es asociado de Ove Arup & Partners.

Ilustración de cubierta:
Estudio Lamela, Centro Alzheimer de la Fundación Reina Sofía, Madrid, 2007.



Editorial Reverté

www.reverte.com

ISBN 10: 84-291-2112-9
ISBN 13: 978-84-291-2112-4



9 788429 121124